



ISSN 1001-5868
CODEN BAGUE5



在线投稿 阅读

半导体光电

SEMICONDUCTOR OPTOELECTRONICS

6

2020

第41卷

中文核心期刊

Scopus数据库来源期刊

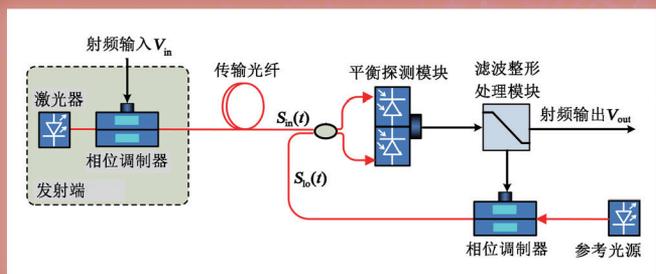
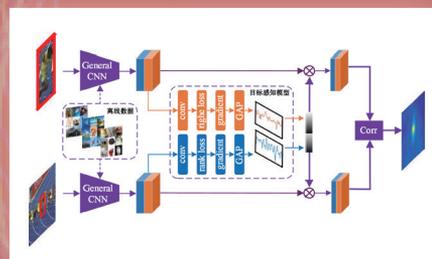
RCCSE中国核心学术期刊(A)

本期导读

- 高帧频高灵敏度线列PIN-CMOS图像传感器研究
- 三维成像用128×2线性模式APD焦平面探测器设计
- 谐振式光纤陀螺的信噪比研究
- FBG形状传感器应变传递与传感性能研究
- 一种双模大模场面积多芯光纤的设计和特性分析
- 基于特征数不变量的插针特征点匹配算法研究
- 卫星激光通信中一种基于矩阵扩展的RC-LDPC码构造方法

基于深度学习的目标跟踪技术的研究综述

对目标跟踪技术的发展历程进行了回顾和梳理, 详细介绍并对比了部分典型的基于深度学习的目标跟踪方法; 介绍了几种目标跟踪领域的典型数据集; 对基于深度学习的目标跟踪技术的研究进行了总结, 并对未来的发展方向进行了展望。



基于相位调制的大动态微波光子链路仿真研究

针对相位调制微波光子链线性解调困难的问题, 开展了基于锁相环非线性相位解调方法的理论研究。建立了详细的链路模型, 充分考虑噪声和非线性畸变的影响, 推导得到了链路关键参数的变化趋势。同时结合实际链路器件参数, 完成了链路关键参数的仿真研究。结果显示, 基于锁相环, 在200 MHz的射频频率下, 链路动态范围可达到127 dB·Hz^{2/3}, 较传统强度调制方法提升近20 dB。

ISSN 1001-5868



9 771001 586206

重庆光电技术研究所 主办

Chongqing Optoelectronics Research Institute

目 次

※动态综述※

基于深度学习的目标跟踪技术的研究综述	罗元, 肖航, 欧俊雄(757)
低噪声 CMOS 图像传感器技术研究综述	刘嵘侃, 邢德智, 唐昭焯, 等(768)
航空发动机叶尖间隙测量技术研究进展	许欧阳, 童杏林(774)

※光电器件※

高帧频高灵敏度行列 PIN-CMOS 图像传感器研究	陈世军, 王欣, 丁毅, 等(779)
三维成像用 128×2 线性模式 APD 焦平面探测器设计	邓光平, 马华平, 鹿婷婷, 等(784)
谐振式光纤陀螺的信噪比研究	韩松延, 胡宗福(788)
基于 Alq ₃ 光耦合层的新型顶发射蓝光有机电致发光器件	王振, 陈家雯, 卢永生, 等(794)
基于双锥形光子晶体光纤的折射率传感器	王婷婷, 杨凌旭, 李帅, 等(798)
P3HT 为空穴传输层的碳基钙钛矿太阳能电池	万雪健, 梁春军(802)
MIM 波导结构中的等离激元诱导透明和慢光效应	张利伟, 黄星, 孟威威, 等(808)
用于卫星次镜座结构的光纤光栅温度传感器设计	王天奇, 孟凡勇, 王永千, 等(815)
基于光学干涉法的翻新电子元器件鉴别方法	温景超, 吴立强, 赵彦飞, 等(822)

※材料、结构及工艺※

印刷烧结工艺对单晶硅太阳能电池栅线形貌及电学性能的影响	李琰琪, 沈鸿烈, 杨汪扬, 等(827)
FBG 形状传感器应变传递与传感性能研究	张冬伟, 金靖, 朱云鸿, 等(833)
一种双模大模场面积多芯光纤的设计和特性分析	赵丽娟, 王贺晴, 徐志钏(839)
光纤研磨纸粒度对侧边研磨塑料光纤传感器灵敏度的影响	冯利民, 巫涛江, 赵杰, 等(845)
ITO 薄膜的电阻并联效应研究	王松林, 杨崇民, 张建付, 等(850)
三维多孔石墨烯的制备及其电化学性能研究	李建勇, 邵庆国(855)
两种微型热管传热性能对比研究	魏智康, 侯燕, 段彦军, 等(860)

※光电技术及应用※

基于特征数不变量的插针特征点匹配算法研究	李慧鹏, 李科(865)
基于多尺度分析的快速相位立体匹配	蔡超, 刘文波, 郑祥爱, 等(870)
基于自适应筛选 Harris 角点检测的快速图像配准算法	蔡欣展, 刘艳艳(875)
卫星激光通信中一种基于矩阵扩展的 RC-LDPC 码构造方法	袁建国, 袁雅琴, 刘议靖(879)
空间激光通信高速多制式光调制技术	兰枫, 韩婷, 郭精忠(884)
螺旋布设光纤光栅的软体操作器形状传感方法	朱伟涛, 孙广开, 何彦霖, 等(889)
基于改进 Camshift 算法的 NAO 机器人目标跟踪	王立玲, 单忠宇, 马东, 等(896)
基于相位调制的大动态微波光子链路仿真研究	王超, 庾财斌, 肖永川, 等(902)

CONTENTS

Research on Target Tracking Technology Based on Deep Learning	LUO Yuan, XIAO Hang, OU Junxiong(757)
An Overview of Low Noise CMOS Image Sensor Technique	LIU Rongkan, XING Dezhi, TANG Zhaohuan, et al. (768)
Research Progress of Aero-engine Blade Tip Clearance Measurement Technology	XU Ouyang, TONG Xinglin(774)
Study on High Frame and High Sensitivity for Linear PIN-CMOS Image Sensors	CHEN Shijun, WANG Xin, DING Yi, et al. (779)
A Design of 128×2 Linear Mode APD Detector for 3D Imaging	DENG Guangping, MA Huaping, LU Tingting, et al. (784)
Research on Signal to Noise Ratio of Resonant Fiber Optic Gyro	HAN Songyan, HU Zongfu(788)
Blue Top-emission Organic Light-emitting Device Based on Alq_3 Light-coupling Layer	WANG Zhen, CHEN Jiawen, LU Yongsheng, et al. (794)
Research on Mach-Zehnder Interferometer Based on Biconical Photonic Crystal Fiber	WANG Tingting, YANG Lingxu, LI Shuai, et al. (798)
Study on Perovskite Solar Cells with P3HT Hole Transport Layer	WAN Xuejian, LIANG Chunjun(802)
Plasmon Induced Transparency and Slow Light Effect in MIM Waveguide	ZHANG Liwei, HUANG Xing, MENG Weiwei, et al. (808)
Design of Fiber Bragg Grating Temperature Sensor for Satellite Secondary Mirror Base Structure	WANG Tianqi, MENG Fanyong, WANG Yongqian, et al. (815)
Identification Method of Refurbished Electronic Components Based on Optical Interferometry	WEN Jingchao, WU Liqiang, ZHAO Yanfei, et al. (822)
Influence of Screen Printing and Sintering Process on Grid Morphologies and Electrical Properties of Single-Crystalline Silicon Solar Cells	LI Yanqi, SHEN Honglie, YANG Wangyang, et al. (827)
Research on Strain Transmission and Sensing Performance of FBG Shape Sensor	ZHANG Dongwei, JIN Jing, ZHU Yunhong, et al. (833)
Design and Characteristic Analysis of A Dual-mode Large-mode-area Multi-core Fiber	ZHAO Lijuan, WANG Heqing, XU Zhiniu(839)
Influence of The Particle Size of Optical Fiber Grinding Paper on The Sensitivity of Edge-lapping Plastic Optical Fiber Sensor	FENG Limin, WU Taojiang, ZHAO Jie, et al. (845)
Research on Resistance Parallel Effect of ITO Films	WANG Songlin, YANG Chongmin, ZHANG Jianfu, et al. (850)
Preparation and Electrochemical Properties of Three-dimensional Holey Graphene	LI Jianyong, SHAO Qingguo(855)
Comparative Study on The Heat Transfer Performance of Two Types of Micro Heat Pipes	WEI Zhikang, HOU Yan, DUAN Yanjun, et al. (860)
Research on Pin Feature Point Matching Algorithm Based on Characteristic Number Invariant	LI Huipeng, LI Ke(865)
Fast Phase-based Stereo Matching Based on Multi-scale Analysis	CAI Chao, LIU Wenbo, ZHENG Xiangai, et al. (870)
Fast Image Registration Algorithm Based on Adaptive Screening Harris Corner Detection	CAI Xinzhan, LIU Yanyan(875)
A Construction Method of RC-LDPC Codes Based on The Matrix Extension for Satellite Laser Communications	YUAN Jianguo, YUAN Yaqin, LIU Yijing(879)
Multi-format Optical Modulation Technique with High Bit Rate for Space Laser Communication	LAN Feng, HAN Ting, GUO Jingzhong(884)
Shape Sensing Method of Soft Manipulator Based on Fiber Grating with Spiral Layout	ZHU Weitao, SUN Guangkai, HE Yanlin, et al. (889)
NAO Robot Target Tracking Based on Improved Camshift Algorithm	WANG Liling, SHAN Zhongyu, MA Dong, et al. (896)
Simulation of Large-dynamic Microwave Photonic Link Based on Phase Modulation	WANG Chao, YU Caibin, XIAO Yongchuan, et al. (902)

基于深度学习的目标跟踪技术的研究综述

罗元*, 肖航, 欧俊雄

(重庆邮电大学 光电工程学院, 重庆 400065)

摘要: 深度学习技术在计算机视觉领域的应用日趋广泛,基于深度学习的目标跟踪技术是当前计算机视觉领域的一项重要研究课题。文章首先对国内外目标跟踪技术的发展历程进行了回顾和梳理,详细介绍并对比了部分典型的基于深度学习的目标跟踪方法;然后介绍了几种目标跟踪领域的典型数据集;最后对基于深度学习的目标跟踪技术的研究进行了总结,并对未来的发展方向进行了展望。

关键词: 深度学习; 计算机视觉; 目标跟踪

中图分类号: TP18; TP391.41 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0757-11

Research on Target Tracking Technology Based on Deep Learning

LUO Yuan, XIAO Hang, OU Junxiong

(College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN)

Abstract: The application of deep learning technology in the field of computer vision is becoming more and more extensive, and the target tracking technology based on deep learning is an important research topic in the field of computer vision. In this paper, firstly, the development process of target tracking technology at home and abroad is reviewed, and some typical target tracking methods based on deep learning are introduced in detail and compared; then, several typical data sets in the field of target tracking are summarized; finally, the research progress of the target tracking technology are summarized, and the future development directions are prospected.

Key words: deep learning; computer vision; target tracking

0 引言

目标跟踪是计算机视觉领域中具有重要研究意义的课题之一,该课题与目标检测有相似之处,但主要研究内容与研究方法存在一定差异。文献[1]中指出,目标检测是对于给定的任意图像或视频,判定是否存在来自预定义类别的语义对象的任何实例,如果存在,则输出实例的空间位置和所占范围。该过程需要将图像或视频中的目标对象与其他无关的信息进行区分并完成对目标对象的标注,而目标跟

踪不仅需要视频图像序列中标注出目标对象所在的空间位置,还需要将视频连续帧中标注的目标对象连接起来得到目标对象的运动轨迹路径。

近年来,随着计算机性能的不提高与深度学习技术的不断发展,基于深度学习的目标跟踪技术逐渐成为了研究热点,在取得突破性进展的同时被广泛应用于模式识别^[2]、无人驾驶^[3]、人机交互^[4]、智能机器人^[5]和智慧医疗^[6]等领域。目前,基于深度学习的目标跟踪技术大量开源,为思想的碰撞创造了更多可能,所以本文旨在对目标跟踪技术的发展历程进行梳理,对基于深度学习的目标跟踪技术中的经典网络进行模型解构、特点剖析并进行性能对比,对目标跟踪领域应用广泛的典型数据集进行简要介绍,最后对基于深度学习的目标跟踪技术的

收稿日期:2020-06-28.

基金项目:国家自然科学基金项目(61801061);重庆市教委科技项目(KJQN201800607).

*通信作者:罗元 E-mail: luoyuan@cqupt.edu.cn

研究进行展望和总结。

1 传统目标跟踪

1.1 均值漂移

均值漂移由 Comaniciu 等^[7-8]运用到目标跟踪领域,该方法利用图像特征构造概率密度函数,之后通过迭代沿着概率密度函数的梯度方向搜索函数的局部最大值,并以搜索到的局部最大值作为跟踪目标的位置。

基于均值漂移的目标跟踪方法具有如下优点:

1)算法原理简单易实现;2)以灰度统计直方图作为图像特征,对目标旋转、轻微形变的鲁棒性较好;3)对目标中心位置采用分块加权处理,能够有效克服目标被轻微遮挡时错误的位置信息对实时跟踪的影响。但该方法仅使用灰度统计直方图表征目标,图像特征单一,易出现因目标特征不完备而被无关背景信息干扰导致跟踪失败的情况。并且,由于使用大小固定不变的核函数,所以对目标尺度大幅变化的鲁棒性较差。此外,利用概率密度函数搜索局部最大值需要经过多次迭代,导致其难以实现对高速移动目标的跟踪。

1.2 粒子滤波

粒子滤波最早由 Nummiaro 等^[9]运用到目标跟踪领域,该方法采用序列蒙特卡洛的滤波方法将贝叶斯滤波方法中的积分运算转化为粒子采样,进而求得样本均值,解决了难以在实际应用中获得贝叶斯滤波概率最优解的问题。粒子滤波算法在应用时首先需要完成状态空间粒子初始化,之后每个迭代周期^[10]的主要步骤包括重要性采样、权重更新和重采样,最终根据计算得到的权重估计粒子集合的状态平均值,并根据权重增加的方向实现跟踪,以此作为目标跟踪的输出结果。

基于粒子滤波的目标跟踪方法具有如下优点:

1)算法简单,系统易实现;2)采用序列蒙特卡洛的滤波方法,能有效处理非高斯分布的噪声并得到目标最优位置估计;3)具有无参数估计特性,对非线性运动模型表现出优越性,适用于非线性动态系统分析。

但基于粒子滤波的目标跟踪方法的跟踪精度和跟踪速度严重依赖粒子数目且二者难以协同,粒子数越多精度越高但速度越慢,反之亦然。并且在重要性采样过程中使用重要性概率密度函数会导致粒子退化问题的出现。利用重采样解决粒子退化问题时,又易因大量重复的粒子导致粒子多样性的丧失。

系统噪声越小,多样性丧失问题越明显。同时,仅以颜色直方图表征目标,目标特征表达单一,易受无关背景或环境信息的影响而导致跟踪失败。

除上述均值漂移和粒子滤波外,传统目标跟踪方法还包括卡尔曼滤波^[11-13]等,但传统方法均存在易受背景信息或环境信息干扰而导致跟踪失败,对于形状、尺度和速度等各类变化的鲁棒性亟待提高等不足,所以目前传统目标跟踪方法的使用已经逐渐减少。

2 基于相关滤波的目标跟踪

2.1 MOSSE 与 CSK

最小均方误差滤波(Minimum Output Sum of Squared Error, MOSSE)是由 Bolme 等^[14]提出并最先用于目标跟踪领域的基于相关滤波的跟踪方法。该方法在视频第一帧中确定跟踪目标,通过对下一帧图像进行滤波,以滤波后最大响应值所在位置作为目标的新位置,根据新位置完成目标运动轨迹的在线更新。MOSSE 利用傅里叶变换使滤波过程在频域执行,其跟踪速度高达 600~700 f/s,明显优于同时期的 IVT^[15]和 MILTrack^[16]等跟踪方法。

Henriques 等^[17]通过视频帧与帧之间目标移动距离有限的潜在结构信息发现数据矩阵呈环状,并依据循环矩阵理论提出一种循环结构跟踪器(Circulant Structure Tracker, CSK)。该跟踪器利用循环采样使得计算量大大减少,完美解决了密集采样的问题,又利用核函数和傅里叶变换计算相邻两帧图像的相关性,在提高跟踪效果的同时保证了较快的跟踪速度。

无论是 MOSSE 还是 CSK,采用的图像特征均为单通道灰度特征,因此在很大程度上限制了这两种跟踪方法在面对复杂背景或目标与背景颜色相近时的跟踪能力。

2.2 KCF, DCF 与 CN

为了克服利用单通道灰度特征进行目标跟踪时的不足,Henriques 等^[18]在 CSK 的基础上进行改善,继而提出了核化相关滤波器(Kernelized Correlation Filter, KCF)和对偶相关滤波器(Dual Correlation Filter, DCF)。KCF 和 DCF 均使用多通道方向梯度直方图(Histogram of Oriented Gradients, HOG)特征替代单通道灰度特征,因为 HOG 特征能够很好地表征目标对象的表面纹理和轮廓形状,所以提升了跟踪器在复杂环境下对运动

模糊和光照变化的鲁棒性。KCF与DCF的区别在于：KCF使用高斯核函数，DCF使用线性核函数。文献[18]表明，由于核函数的不同，相比于DCF，KCF的平均精度从72.8%提高到73.2%，速度从292 f/s下降到172 f/s。

除了KCF和DCF，由Danelljan等^[19]提出的颜色命名(Color Name, CN)算法也是基于CSK进行改进的。CN采用多通道颜色特征增强了对目标对象的表征能力，提高了跟踪器对光照变化和颜色失真的鲁棒性，同时利用主成分分析方法对特征进行降维，提高了算法的运行速度，此外还引入贝叶斯公式对前景和背景进行区分，降低了复杂背景对目标跟踪的干扰程度。

KCF, DCF和CN通过对图像特征选取的改进提高了跟踪器面对复杂背景时的处理能力，但对于目标本身尺度变化导致的跟踪漂移问题的处理能力仍然有待提高。

2.3 DSST, FDSST与SAMF

以进一步提高目标跟踪算法对目标本身尺度变化的鲁棒性为目标，Danelljan等^[20]在KCF的基础上引入尺度估计，提出了判别尺度空间跟踪器(Discriminative Scale Space Track, DSST)。DSST将目标跟踪视为位置变化和尺度变化两个独立问题，分别训练平移滤波器和尺度滤波器。用平移滤波器确定当前帧的目标位置后，在目标所处位置提取多个尺寸不同的像素块并使用尺度滤波器完成尺度估计，以最大响应值对应的尺度作为当前帧的最优目标尺度。DSST的分步策略不仅在特征选择上保持高度的灵活性，而且尺度估计模块可以迁移到其他算法，具有良好的推广性，但仍存在计算复杂度高、计算量大的问题。

针对以上问题，Danelljan等^[21]继续提出快速判别尺度空间跟踪器(Fast Discriminative Scale Space Track, FDSST)。FDSST使用降维策略和QR分解的方法充分减少了算法计算量，文献[21]显示，FDSST相比于DSST，平均速度提升超一倍，由25.4 f/s提高到54.3 f/s，并且其他性能也得到一定改善，如：平均距离精度(Mean Distance Precision, Mean DP)由75.7%提高到80.2%，平均重叠精度(Mean Overlap Precision, Mean OP)由67.7%提高到74.3%。

另一种基于KCF改进的解决尺度变化问题的跟踪器是Li等^[22]提出的多特征集成尺度自适应跟

踪器(Scale Adaptive with Multiple Feature Tracker, SAMF)。SAMF融合了灰度、CN和HOG特征来提高算法性能，同时引入尺度池，对初始目标进行七个不同尺度的缩放，通过相关滤波得到对应的响应值，以最大响应值对应的尺度作为跟踪目标的最优尺度，实现尺度自适应。与DSST相比，SAMF更像是全局寻优的过程，所以响应最高的全局最优在具体到每一帧的时候并不能保证是局部最优，但SAMF只需要单个滤波器，无需为尺度估计进行额外的滤波器训练。

除了对图像特征选取的改进和对目标尺度变化的改进，后续还出现了对边界效应问题改进的相关研究，比如Danelljan等^[23]提出的空间正则相关滤波器(Spatially Regularized Correlation Filter, SRDCF)、Kiani等^[24]提出的有限边界相关滤波器(Correlation Filter with Limited Boundaries, CFLB)和Galoogahi等^[25]提出的背景感知相关滤波器(Background-Aware Correlation Filter, BACF)等，都对目标跟踪时出现的边界效应问题提供了较好的解决方法。此外，由于近年来深度学习技术的兴起和飞速发展，目标跟踪领域已经出现了相关滤波算法和深度学习相结合，用深度特征替代传统的手工设计的特征的研究，这类研究进一步提高了基于相关滤波的目标跟踪算法的跟踪性能。

3 基于深度网络的目标跟踪

基于深度网络的目标跟踪算法可以分为两类：一类是将深度特征与相关滤波相结合的跟踪方法，如将HOG特征替换为利用VGG-net^[26]提取的深度特征的HCF^[27]，HCFT^[28]和HDT^[29]，在SRDCF基础上改进的DeepSRDCF^[30]和DMSRDCF^[31]，运用传统特征和深度特征相融合的C-COT^[32]和ECO^[33]等；另一类是构造端到端的深度网络的目标跟踪方法，如通过多域学习的MDnet^[34]，融合卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)特征和循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)特征的SAnet^[35]，以及运用多个CNN构成树结构的TCNN^[36]等。

3.1 DeepSRDCF与DMSRDCF

DeepSRDCF(Deep Features for SRDCF)是由Danelljan等^[30]在SRDCF的基础上引入深度特征提出的。DeepSRDCF利用VGG-net提取深度特征，并探索了不同卷积层的深度特征对跟踪效果的

不同影响,发现使用 VGG-net 的第一层卷积所得特征的效果优于使用深层特征的效果。同时,浅层特征的提取速度更快,保证了算法的运行速度。证明了浅层卷积层比深层卷积层更适用于目标跟踪。

Gladh 等^[31]将传统手工特征与深度运动特征融合于 SRDCF 框架,提出了 DMSRDCF (Deep Motion Features for SRDCF)。由于深度运动特征与目标物体的表观特征充分互补,对运动目标的表征更加精确,从而显著提高了算法的跟踪性能。随后,Danelljan 等进一步扩展对 DMSRDCF 的研究工作,并在文献[37]中详细阐述了深度运动特征的适用条件和对目标跟踪的具体影响。

表 1 对比了 SRDCF,DeepSRDCF 和 DMSRDCF 三者在不同数据集中测评的各项性能指标。

表 1 SRDCF,DeepSRDCF 和 DMSRDCF 性能对比

指标	SRDCF	DeepSRDCF	DMSRDCF
Mean OP (OTB-2015)	72.9%	77.3%	84.1%
Mean OP (Temple-color)	62.2%	65.4%	71.2%
鲁棒性 (VOT-2015)	1.24	1.05	0.92
准确度 (VOT-2015)	0.56	0.56	0.58

由表 1 可知,利用深度特征的 DeepSRDCF 和 DMSRDCF 无论是在数据集 OTB-2015 还是在 Temple-color 上,都对 Mean OP 进行了提高。采用深度运动特征的 DMSRDCF 在数据集 VOT-2015 中的鲁棒性和准确度性能表现最佳。

3.2 C-COT 与 ECO

Danelljan 等^[32]发现 DCF 方法中仅使用单一分辨率的特征图,基于此改进提出了 C-COT (Continuous Convolution Operators for Visual Tracking)。C-COT 采用多分辨率深度特征图,并通过隐式插值将不同分辨率的特征图插值到连续空间域,实现了传统手工特征与深度特征的融合,能够精准完成亚像素定位,提高跟踪精度,但是由于使用高维特征需要训练大量滤波器,使得算法复杂度高,运算速度较慢。

随后 Danelljan 等^[33]从滤波器构造、样本集大小和模型更新策略三个方面对 C-COT 进行改进,继续提出了 ECO (Efficient Convolution Operators for Tracking)。ECO 使用矩阵分解的卷积方法对滤波器进行降维,然后利用混合高斯模型对具有类

内相似性和类间差异性的样本组合进行表征,在降低样本数目的同时提高了样本的辨识度。最后利用稀疏型模型更新策略,间隔多帧完成一次更新,通过降低更新频率来提高效率,进一步降低算法复杂度、减少计算量。

C-COT 与 ECO 在数据集 VOT-2016 中的测评结果如表 2 所示。结果显示,ECO 在保证精度的基础上,相比于 C-COT,对 EAO (Expected Average Overlap) 和鲁棒性均有所优化。

表 2 C-COT 和 ECO 性能对比

跟踪方式	EAO	鲁棒性	准确度
C-COT	0.331	0.85	0.52
ECO	0.375	0.73	0.53

文献[38]进一步开展了将深度特征运用于目标跟踪的研究,得出了深度特征能够编码高级抽象信息且不受复杂外观变化的影响,但需要大量数据且更深更复杂的网络架构对目标跟踪性能提高无益的结论。基于以上结论,提出了利用数据增强扩充训练集,将深度特征和浅层特征自适应融合的方法,完成对 ECO 的进一步优化,并在数据集 VOT-2017 中进行测评,得到结果如表 3 所示。

表 3 各类算法性能对比

跟踪方式	EAO	鲁棒性	准确度
C-COT	0.267	0.318	0.494
ECO	0.280	0.276	0.483
文献[38]	0.378	0.182	0.532

表 3 显示,利用文献[38]提出的方法对 ECO 优化后,其目标跟踪的各项性能均得到了提高。

3.3 MDnet, SAnet 与 TCNN

MDnet (Multi-Domain Network) 是 Nam 等^[34]基于迁移学习的思想,采用 VGG-net 的部分结构,提出的一种端到端的多域学习的深度网络,该网络由特征提取通用的共享层和多分支检测的全连接层两部分组成,具体网络结构如图 1 所示。

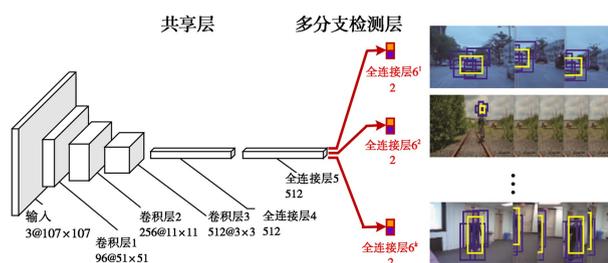


图 1 MDnet 网络结构

在 MDnet 的训练阶段,数据集中每个视频序列

通过训练得到独立的全连接层6(fc6层),共享层对所有视频序列通用,以便获得对不同运动目标通用性更强的深度特征;在目标跟踪阶段,保留并固定用于目标特征提取的共享层,根据要进行目标跟踪的新视频序列构建新的全连接层,二者结合组成新的端到端网络。通过新视频序列的第一帧样本更新网络,利用之后每一帧的跟踪结果生成正负样本,并在线微调fc4~fc6层,以实现网络的自适应调整,有效

区分目标物体和背景的特征表达,保证更好性能的目标跟踪。

由于MDnet利用卷积操作将目标跟踪作为目标与背景的二分类问题处理,导致其在跟踪过程中易受目标相似物的干扰,并且对目标遮挡的鲁棒性较差。针对该问题,Fan等^[35]在MDnet的基础上进行改进,提出了SAnet(Structure-Aware Network),其网络结构如图2所示。

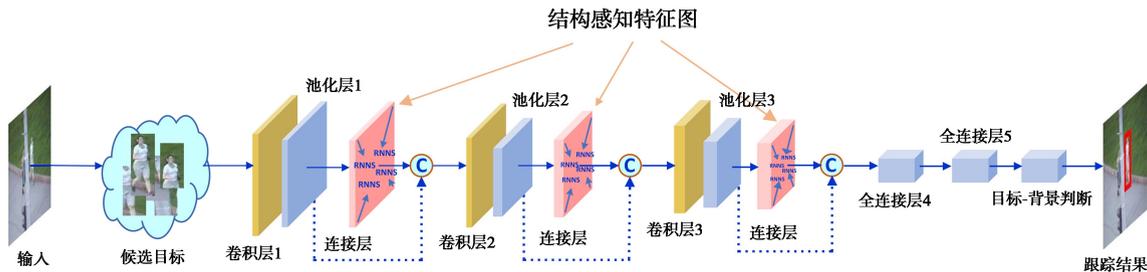


图2 SAnet网络结构

SAnet通过引入RNN提取目标物体的结构信息,可以获得视频序列中目标前后帧的长期依赖关系,并将得到的目标显著特征使用跳跃式连接的方式与CNN特征融合。融合过程中,CNN特征主导目标物体与背景之间的判辨,RNN特征主导目标物体与相似物之间的判辨,以此增强SAnet在目标跟踪过程中的抗干扰能力。

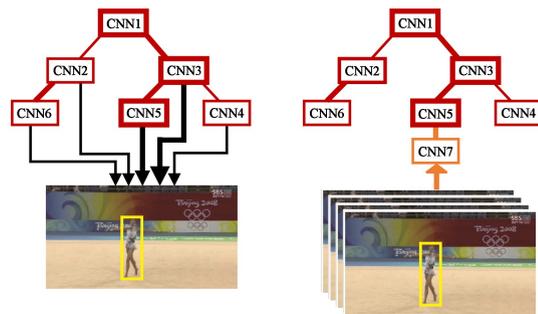


图3 TCNN网络结构

除MDnet之外,Nam等^[36]还提出了利用多个CNN构成树结构并协作以完成目标跟踪的TCNN(CNNs in A Tree Structure)。TCNN针对研究模型可靠性问题,认为以往部分目标跟踪模型随目标物体变化而以统一规则持续更新,但对于部分帧中目标被遮挡致使跟踪失败,导致更新的模型可靠性降低的问题并没有解决。

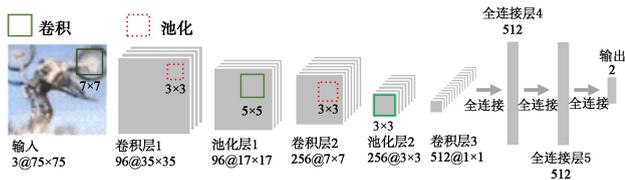


图4 TCNN中各CNN网络结构

TCNN的结构如图3所示,图中框线越粗,对应CNN模型可靠性越高;框与框的连接线越粗,对应两个CNN之间的相关性越高;箭头指示线越粗,对应CNN影响目标跟踪的权重越高。

TCNN中所有CNN共享卷积层(Conv层)的所有参数,通过避免冗余的网络评估减少了不必要的计算,同时节省了存储空间。

TCNN对每个CNN进行可靠性评估以确定权重,并利用所有CNN进行加权检测,充分发挥每个CNN的作用。此外,每十帧创建一个新节点,同时删除一个距离创建时刻最久的旧节点,并选择使新节点可靠性最高的节点作为父节点,完成在线微调,避免邻近帧之间的过拟合,以此保证TCNN在整个跟踪过程中的可靠性。参与构成TCNN的所有CNN的结构相同,如图4所示。

MDnet,SAnet和TCNN在VOT-2015中的测评结果如表4所示。尽管MDnet,SAnet和TCNN在准确度,鲁棒性和EAO方面表现良好,但是MDnet和SAnet的速度仅为1f/s,TCNN速度较前两者稍快但也只有1.5f/s,均难以满足实时跟踪的需求,这与目标跟踪要求精度高且速度快的初衷相悖。随着孪生网络这种特殊网络结构的出现与发展,如今基于孪生网络的目标跟踪已经可以实现精

度与速度的平衡,各项性能相较于以往的深度网络都有了极大改善,已经成为目标跟踪领域的研究热点。

表 4 MDnet, SAnet 和 TCNN 性能对比

跟踪方式	准确度		鲁棒性		EAO
	位列	得分	位列	得分	
MDnet	1.2	0.6	1.62	0.69	0.378 3
SAnet	1.17	0.61	1.58	0.69	0.389 5
TCNN	1.58	0.59	2.83	0.74	0.340 4

4 基于孪生网络的目标跟踪

孪生网络(Siamese Network)由两个及以上数目的子网络构成,子网络结构通常相同,使得孪生网络具有对称性,并且子网络同时接收视频帧输入,实现网络间权值共享,将不同子网络获得的图像特征用于获取相关响应图像,以此判断目标位置并完成目标跟踪。近年来,大量研究在原始孪生网络框架的基础上进行改进,如加入不同功能模块、使用双重孪生结构、优化骨干网络以及利用级联操作等方法,强化了孪生网络用于目标跟踪时的性能。

4.1 SINT 与 SiamFC

SINT(Siamese Instance Search for Tracking)是由 Tao 等^[39]提出的基于孪生网络结构并最先用于目标跟踪的方法。SINT 通过生成多个候选目标与示例图像对比,选择差异最小的候选目标作为网络输出结果。虽然 SINT 将目标跟踪过程巧妙转化为目标匹配过程,为目标跟踪的实现提供了全新的思路,但是需要处理大量的候选目标,这导致了算法计算量大、耗时严重的问题。

随后 Bertinetto 等^[40]提出了速度更快的 SiamFC (Fully-Convolutional Siamese Networks for Object Tracking)。SiamFC 在孪生网络结构中融入了全卷积网络 (Fully Convolutional Network),其网络结构如图 5 所示。

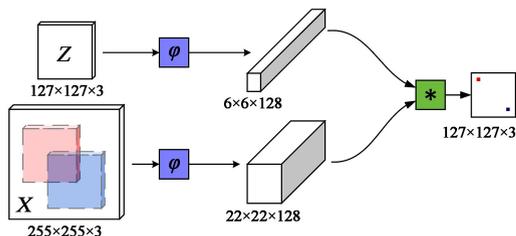


图 5 SiamFC 网络结构

SiamFC 有两条网络分支,其中模板分支用于保存目标模板信息,检测分支用于获取图像特征。

通过卷积实现两条分支中图像相关性的计算,得到目标位置的最大响应并以此实现目标定位及完成目标跟踪。尽管 SiamFC 作为早期的基于孪生网络的目标跟踪算法的代表能够满足实时跟踪的需求,但是在精度和鲁棒性上与以往将深度特征和相关滤波相结合的方法仍存在一定差距。

4.2 SiamRPN 与 SiamMask

为了解决 SiamFC 在面对目标尺度变化时鲁棒性较差的问题, Li 等^[41]借鉴了目标检测领域的 Faster R-CNN 算法^[42]中使用的区域建议网络 (Region Proposal Network, RPN), 将 RPN 加入 SiamFC 框架, 提出了 SiamRPN。SiamRPN 由两个功能模块组成, Siamese 模块用于特征提取, 其结构与 SiamFC 中网络结构相同, RPN 模块用于生成建议, 即生成候选目标区域。RPN 模块的两条支路分别用于分类与回归, 分类分支实现目标与背景的判别, 回归分支实现对目标的精确定位。SiamRPN 的网络结构如图 6 所示。

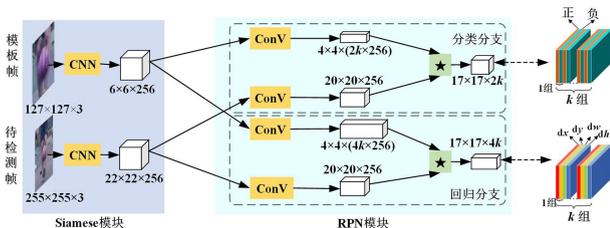
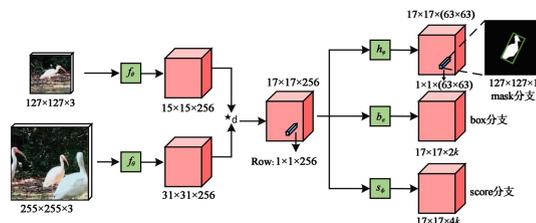


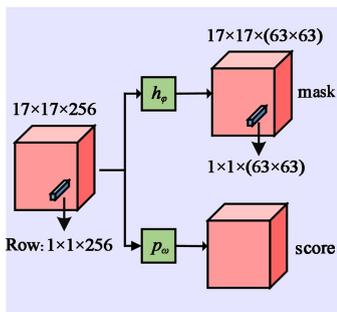
图 6 SiamRPN 网络结构

另一种基于 SiamFC 增加功能模块进行改进的方法是由 Wang 等^[43]提出的、可同时实现目标分割与目标跟踪的 SiamMask。SiamMask 有二分支和三分支两种形式,具体结构如图 7 所示,其中三分支结构是在具有 mask 分支和 score 分支的二分支结构的基础上增加了 box 分支。

SiamMask 利用 mask 分支实现目标二值化分割,并将目标分割任务中的细节性特征用于目标跟踪任务。利用 box 分支得到目标候选区域,利用 score 分支完成候选区域的筛选,最终可实现不受目标类别差异影响的目标无差别实时跟踪。



(a) 三分支结构



(b) 二分支结构
图7 SiamMask网络结构

4.3 SA-Siam 与 TADT

除了使用功能模块来提升跟踪器在面对目标尺度显著性变化或类别任意时的鲁棒性,还可以通过改变网络结构来达到相同目的。

由 He 等^[44]提出的 SA-Siam 使用双重孪生的网络结构,具有语义分支和表观分支,可以利用并融合具有互补性质的图像分类任务中学习到的语义特征和相似度来匹配任务中学习到的表观特征,其网络结构如图8所示。

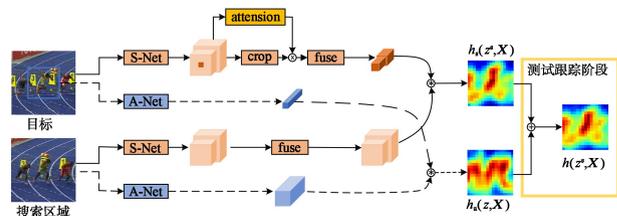


图8 SA-Siam网络结构

SA-Siam 的两条分支独立训练以保证两个 Siamese 网络的异质性,直到测试跟踪阶段才完成合并。此外,对于语义分支,加入了通道注意力模块(Channel Attention Module),使对目标跟踪影响更大的通道获得更大的权重,以此增强语义分支面对目标外观变化时的判别能力,提高网络鲁棒性。

Li 等^[45]针对目标性质不可知的跟踪情况,即面对任意尺度的任意目标对象类别,提出了 TADT 网络模型。TADT 使用目标感知模型(Target-Aware Model)指导选择目标跟踪所需要的有效特征。目标感知模型由回归损失(Regression Loss)部分(即岭损失(Ridge Loss)部分)和排序损失(Ranking Loss)部分组成。TADT 的网络结构如图9所示。TADT 通过目标感知模型从预先训练的 CNN 中选择具有目标运动特征和尺度敏感特征的目标感知卷积滤波器进行目标识别,之后通过相似度匹配计算

相似度得分,以得分最大值所处位置表示目标位置,完成目标跟踪。优化后的 SA-Siam, TADT 和 SiamFC 在不同数据集中的评测结果如表5所示。

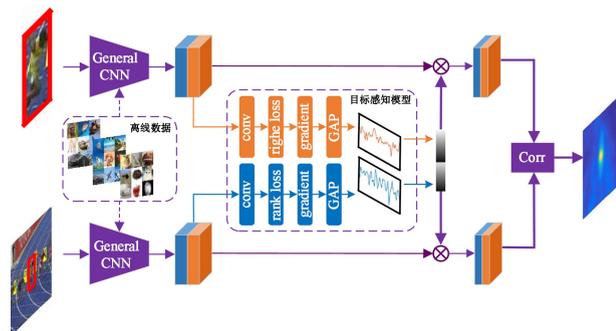


图9 TADT网络结构

表5 各类算法在不同数据集性能对比

数据集	指标	SiamFC	SA-Siam	TADT
VOT-2015	EAO	0.292	0.31	0.327
	准确度	0.54	0.59	0.59
	鲁棒性	1.42	1.26	1.09
VOT-2016	EAO	/	0.291	0.299
	准确度	/	0.54	0.55
	鲁棒性	/	1.08	1.17

4.4 SiamDW, SiamRPN++ 与 C-RPN

SiamDW 是由 Zhang 等^[46]通过对孪生网络的骨干网络进行优化而得到的一种模型。SiamDW 认为网络层数越深,提取到的特征越好,但大量目标跟踪算法仍使用传统的 AlexNet^[47],这限制了算法改进的可能。文献[46]综合分析了 AlexNet, VGG-net, Inception^[48]和 ResNet^[49]等四种网络在不同网络步长、输出特征尺寸、感受野大小以及有无填充情况下的跟踪效果,发现各影响因素之间并不完全独立,且对于全卷积的孪生网络,填充操作会导致跟踪性能退化。基于以上结论,SiamDW 使用基于残差模块改进的 CIR 单元(Cropping-Inside Residual Units)来削弱由填充操作引起的偏差对目标跟踪的负面影响。

SiamRPN++ 是由 Li 等^[50]在 SiamRPN 的基础上改进骨干网络得到的使用多层特征融合的深层孪生网络模型。SiamRPN++ 采用空间感知采样策略(Spatial Aware Sampling Strategy),使均匀采样在图像中心附近偏移后进行,克服了深层网络在特征学习过程中对图像中心位置分配更大权重的位置偏见,为使用 ResNet 作为骨干网络创造了条件。SiamRPN++ 的网络结构如图10所示。

由于 ResNet 的不同层级可以获得不同图像特征,因此 SiamRPN++ 采用了多级级联的方式完成

特征的逐层聚合,有助于目标跟踪性能的提升。SiamRPN++与SiamRPN在VOT-2018中的性能测评结果对比如表6所示。表6显示,对SiamRPN

的骨干网络进行改进后得到的SiamRPN++,其各项性能均得到优化。此外,SiamRPN++能以35 f/s的速度保持跟踪的实时性。

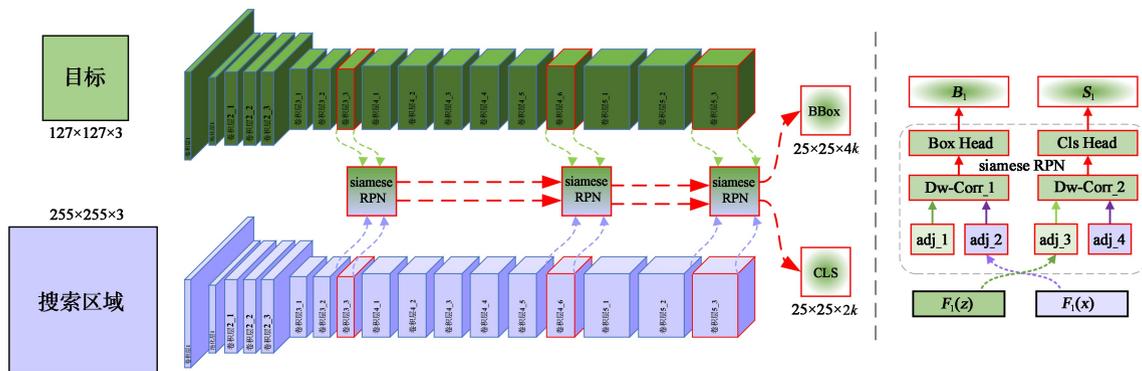


图10 SiamRPN++网络结构

表6 SiamRPN和SiamRPN++性能对比

跟踪方式	EAO	鲁棒性	准确度
SiamRPN	0.383	0.276	0.586
SiamRPN++	0.414	0.234	0.600

另一种以级联的方式对SiamRPN进行改进得到的多层特征融合的网络模型是由Fan等^[51]提出的C-RPN,其网络结构如图11所示。

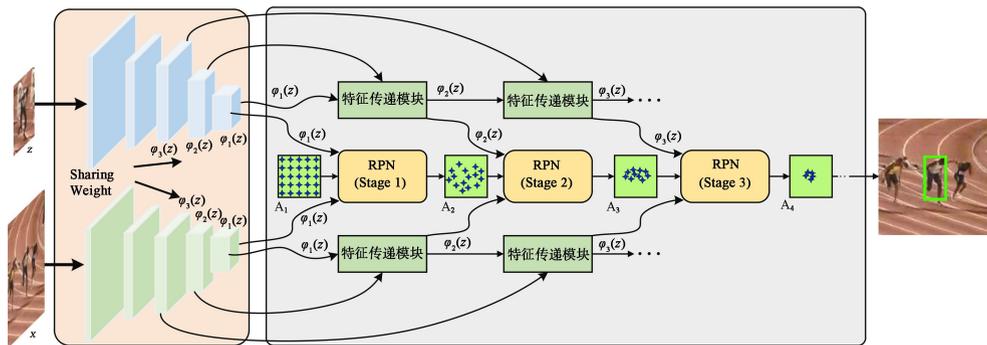


图11 C-RPN网络结构

C-RPN在进行不同层间的特征融合时,不同于SiamRPN++采用的线性加权求和方式,而是运用原创的特征传递模块(Feature Transfer Block)以获得更好的特征表达,有助于目标跟踪精度的提高。C-RPN与SiamRPN在VOT-2016中的性能测评结果对比如表7所示。

表7 SiamRPN和C-RPN性能对比

跟踪方式	EAO	鲁棒性	准确度
SiamRPN	0.344	1.12	0.560
C-RPN	0.363	0.95	0.594

4.5 ATOM

除了本文4.1~4.4小节中所介绍的利用具有结构对称性的孪生网络完成目标跟踪的方法外,还有部分方法虽然借鉴了孪生网络的并行框架,但是结构并不严格对称,如Danelljan等^[52]提出的

ATOM就可被视为类孪生结构的目标跟踪模型,其网络结构如图12所示。ATOM主要包括目标估计模块和目标分类模块,并借鉴目标检测领域的IoU-Net^[53]设计了用于目标估计模块的IoU-Predictor网络。IoU-Predictor网络的结构如图13所示。

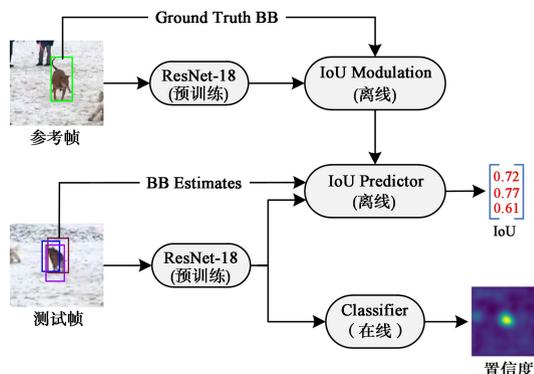


图12 ATOM网络结构

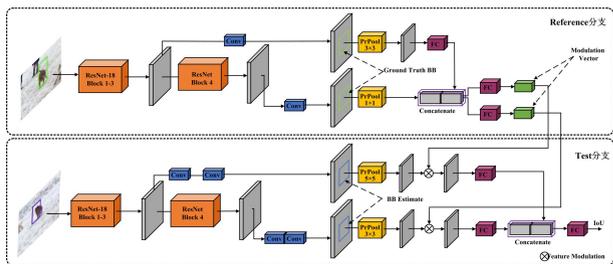


图 13 IoU-Predictor 网络结构

IoU-Predictor 网络主要包含 Reference 分支和 Test 分支。两分支的结构差异主要体现在 PrPool 层尺寸以及 PrPool 层前面放置的 Conv 层数量。

ATOM 在 VOT-2018 中的测评结果如表 8 所示。ATOM 的网络结构虽然并不严格对称,但利用并行框架仍然保证了良好的跟踪性能,并且能够以超过 30 f/s 的速度达到实时跟踪的要求,有效实现速度与精度的平衡。

表 8 ATOM 性能测评结果

跟踪方式	EAO	鲁棒性	准确度
ATOM	0.401	0.204	0.590

5 目标跟踪数据集

5.1 OTB

OTB 包括发布于 2013 年的 OTB-50 以及更新于 2015 年的 OTB-100 数据集,其中 OTB-100 包含 OTB-50 中的所有视频序列。OTB 数据集中的视频序列分为灰度视频序列和彩色视频序列,包括了针对目标形变、目标遮挡、目标尺度变化、光照变化、高速运动、运动模糊、超出观察视野、复杂背景干扰、图像分辨率低以及平面内、外旋转等目标跟踪领域常见问题的样本。此外,OTB 中每个样本序列对应一个用于记录人工标注的跟踪目标对象中心位置和跟踪目标跟踪框大小的文本文件。

5.2 VOT

VOT 是为目标跟踪领域每年的 VOT 竞赛而准备的数据集,数据集中样本每年持续更新,且难度逐年增大。VOT 数据集中均为彩色视频序列且视频序列的分辨率普遍较高。VOT 涉及的性能测评指标除了 EAO,准确度和鲁棒性,还包括 EFO (Equivalent Filter Operations)。EFO 旨在消除不同硬件平台和不同编程语言等外在因素对不同跟踪器速度的影响,进而以统一标准更客观地评价不同的目标跟踪算法。

5.3 TrackingNet

TrackingNet^[54] 是目标跟踪领域的第一个大规模数据集,其包含 3 万多个视频图像序列以及超过 1 400 万个标注框,改变了以往间隔多帧标注一个目标的设计,实现了数据集所含每帧图像中目标的逐一标注,有效解决了基于深度学习的数据需求型跟踪算法缺乏专用的大规模数据集的问题。

5.4 GOT-10k

GOT-10k^[55] 是由中国科学院发布的建立在 WordNet 结构主干之上的目标跟踪数据集,同时也是目标跟踪领域第一个使用 WordNet 的语义层次指导类填充的数据集。GOT-10k 的训练集包括 560 多种目标类别和 87 种运动模式,测试集包括 80 多种目标类别和 32 种运动模式,实现了野外常见运动目标对象的广泛覆盖,并且训练集和测试集的样本零重叠。

除上述数据集外, Temple-color, ALOV++, UAV123 以及 VIVID Tracking 等数据集在目标跟踪领域同样得到大量使用。

6 展望与总结

通过对目标跟踪领域不同发展阶段的各类型方法进行特点剖析和性能对比,发现各方法仍存在的问题,结合近年研究趋势,对目标跟踪领域的未来发展方向展望如下:

1) 全面或专用数据集的增加。从网络类型出发,针对数据需求型的深度网络,设计涵盖更广泛目标类别、更多种常见动作的超大规模数据集;从应用领域出发,针对不同应用场景,如天上、地下和水中,室内或室外,城市或无人区等,设计样本针对性更强的数据集。

2) 硬、软件的升级。提高硬件模块性能,优化软件中的代码效率,减少深度网络因网络结构复杂、计算复杂度高和数据处理量大等特点对跟踪速度产生的负面影响。

3) 不同领域经验的借鉴。从目标检测、目标分割、数据增强、迁移学习等领域借鉴成熟的经验,将不同领域处理问题的思想或相关的网络模型改良后运用到目标跟踪领域。

4) 网络结构的创新。构造新的深度网络框架,更好地提取或融合不同特征,在保证速度与精度二者平衡的基础上,提高跟踪器对目标形变、目标遮挡、目标尺度变化、光照变化、高速运动、运动模糊、

超出观察视野、复杂背景干扰、图像分辨率低等目标跟踪领域常见问题的鲁棒性。

综上所述,本文首先梳理了目标跟踪领域的发展历程,简单介绍了传统方法和基于相关滤波的方法,详细分析了基于深度网络的目标跟踪方法,并对基于孪生网络这种特殊网络结构的跟踪方法进行了展开,然后介绍了部分典型数据集,最后展望了目标跟踪领域的未来发展方向,为后续研究提供了参考。

参考文献:

- [1] 罗元,王薄宇,陈旭. 基于深度学习的目标检测技术的研究综述[J]. 半导体光电, 2020, 41(1): 1-10.
Luo Yuan, Wang Boyu, Chen Xu. Research progresses of target detection technology based on deep learning[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(1): 1-10.
- [2] Aggarwal J K, Xia L. Human activity recognition from 3D data: A review[J]. Pattern Recognition Lett., 2014, 48(10): 70-80.
- [3] Brown M, Funke J, Erlien S, et al. Safe driving envelopes for path tracking in autonomous vehicles[J]. Control Engineering Practice, 2017, 61(4): 307-316.
- [4] Severson J. Human-digital media interaction tracking: US, US20100076274 A1[P]. 2017-03-19.
- [5] Onate J M B, Chipantasi D J M, Erazo N d R V. Tracking objects using artificial neural networks and wireless connection for robotics [J]. J. of Telecommun., Electronics and Computer Engin., 2017, 9(1/3): 161-164.
- [6] Walker S, Sewell C, Park J, et al. Systems and methods for localizing, tracking and/or controlling medical instruments: US, US009629595B2[P]. 2017-4-25.
- [7] Comaniciu D, Ramesh V, Meer P. Real-time tracking of non-rigid objects using mean shift[C]//Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR, 2000: 142-149.
- [8] Comaniciu D, Meer P. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 603-619.
- [9] Nummiaro K, Koller-Meier E, Van Gool L. An adaptive color-based particle filter[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(1): 99-110.
- [10] 李天成,范红旗,孙树栋. 粒子滤波理论、方法及其在多目标跟踪中的应用[J]. 自动化学报, 2015, 41(12): 1981-2002.
Li Tiancheng, Fan Hongqi, Sun Shudong. Particle filtering: theory, approach and application for multitarget tracking[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(12): 1981-2002.
- [11] Comaniciu D, Ramesh V, Meer P. Kernel-based object tracking[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(5): 564-575.
- [12] Nguyen H T, Worring M, Boomgaard R V D. Occlusion robust adaptive template tracking [C]// Proc. of Eighth IEEE Inter. Conf. on Computer Vision, 2002: 678-683.
- [13] Peng N S, Yang J, Liu Z. Mean shift blob tracking with kernel histogram filtering and hypothesis testing[J]. Pattern Recognition Lett., 2005, 26(5): 605-614.
- [14] Bolme D S, Beveridge J R, Draper B A, et al. Visual object tracking using adaptive correlation filters[C]//Proc. of 2010 IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010: 2544-2550.
- [15] Ross D A, Lim J, Lin R S, et al. Incremental learning for robust visual tracking [J]. Inter. J. of Computer Vision, 2008, 77(1/3): 125-141.
- [16] Babenko B, Yang M H, Belongie S. Visual tracking with online multiple instance learning [C]// Proc. of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, 2009: 983-990.
- [17] Henriques J F, Caseiro R, Martins P, et al. Exploiting the circulant structure of tracking-by-detection with kernels [C]//Proc. of the 12th European Conf. on Computer Vision-Volume Part IV, 2012: 1-14.
- [18] Henriques J F, Caseiro R. High-speed tracking with kernelized correlation filters [J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(3): 583-596.
- [19] Danelljan M, Khan F S, Felsberg M, et al. Adaptive color attributes for real-time visual tracking [C]//Proc. of 2014 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2014: 1090-1097.
- [20] Danelljan M, Gustav Hager, Khan F S, et al. Accurate scale estimation for robust visual tracking [C]//Proc. of British Machine Vision Conf., 2014: 1-11.
- [21] Danlljan M, Hager G, Khan F S, et al. Discriminative scale space tracking [J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(8): 1561-1575.
- [22] Li Y, Zhu J. A scale adaptive kernel correlation filter tracker with feature integration [C]//Proc. of European Conf. on Computer Vision. Springer, Cham, 2014: 254-265.
- [23] Danelljan M, Hager G, Khan F S, et al. Learning spatially regularized correlation filters for visual tracking [C]// Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2015: 4310-4318.
- [24] Kiani H G, Sim T, Lucey S. Correlation filters with limited boundaries [C]// Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2015: 4630-4638.
- [25] Galoogahi H K, Fagg A, Lucey S. Learning background-aware correlation filters for visual tracking [C]// Proc. of 2017 IEEE Inter. Conf. on Computer Vision (ICCV), 2017: 1144-1152.
- [26] Simonyan K, Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition [J]. arXiv e-prints, 2014, 1409: 1-14.
- [27] Ma C, Huang J B, Yang X, et al. Hierarchical convolutional features for visual tracking [C]//Proc. of IEEE Inter. Conf. on Computer Vision, 2015: 3074-3082.

- [28] Ma C, Huang J B, Yang X, et al. Robust visual tracking via hierarchical convolutional features [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017: 2709-2723.
- [29] Qi Y K, Zhang S P, Qin L, et al. Hedged deep tracking [C]// *Proc. of 2016 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016: 4311.
- [30] Danelljan M, Hager G, Khan F S, et al. Convolutional features for correlation filter based visual tracking[C]//*Proc. of 2015 IEEE Inter. Conf. on Computer Vision Workshop (ICCVW)*, 2015: 621-629.
- [31] Gladh S, Danelljan M, Khan F S, et al. Deep motion features for visual tracking[C]//*Proc. of 23rd Inter. Conf. on Pattern Recognition*, 2016: 1243-1248.
- [32] Danelljan M, Robinson A, Khan F S, et al. Beyond correlation filters: Learning continuous convolution operators for visual tracking [C]//*Proc. of European Conf. on Computer Vision*, 2016: 472-488.
- [33] Danelljan M, Bhat G, Khan F S, et al. ECO: Efficient convolution operators for tracking[C]// *Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2017: 6638-6646.
- [34] Nam H, Han B. Learning multi-domain convolutional neural networks for visual tracking[C]// *Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway*, 2016: 4293-4302.
- [35] Fan H, Ling H. SANet: Structure-aware network for visual tracking[C]//*Proc. of 2017 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 2017: 2217-2224.
- [36] Nam H, Baek M, Han B. Modeling and propagating CNNs in a tree structure for visual tracking [J]. *arXiv e-prints*, 2016, 1608: 07242.
- [37] Danelljan M, Bhat G, Gladh S, et al. Deep motion and appearance cues for visual tracking[J]. *Pattern Recognition Lett.*, 2019, 124(6): 74-81.
- [38] Bhat G, Johnander J, Danelljan J, et al. Unveiling the power of deep tracking[J]. *arXiv e-prints*, 2018, 1804: 06833.
- [39] Tao R, Gavves E, Smeulders A W M. Siamese instance search for tracking [C]//*Proc. of 2016 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016: 1420-1429.
- [40] Bertinetto L, Valmadre J. Fully-convolutional siamese networks for object tracking[C]//*Proc. of European Conf. on Computer Vision*, 2016: 850-865.
- [41] Li B, Yan J, Wu W, et al. High performance visual tracking with siamese region proposal network[C]//*Proc. of 2018 IEEE/CVF Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018: 8971-8980.
- [42] Ren S, He K, Girshick R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks[J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, 39(6): 1137-1149.
- [43] Wang Q, Zhang L, Bertinetto L, et al. Fast online object tracking and segmentation: A unifying approach[C]//*Proc. of 2019 IEEE/CVF Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019: 1328-1338.
- [44] He A F, Luo C, Tian X M, et al. A twofold siamese network for real-time object tracking[C]// *Proc. of 2018 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018: 4834-4843.
- [45] Li X, Ma C, Wu B, et al. Target-aware deep tracking[C]// *Proc. of 2019 IEEE/CVF Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019: 1369-1378.
- [46] Zhang Z, Peng H. Deeper and wider siamese networks for real-time visual tracking [C]//*Proc. of 2019 IEEE/CVF Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019: 4586-4595.
- [47] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks[C]// *Proc. of Conf. on Neural Information Processing Systems*, 2012: 1106-1114.
- [48] Szegedy C, Liu W, Jia Y, et al. Going deeper with convolutions[C]//*Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2015: 1-9.
- [49] He K, Zhang X, Ren S, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//*Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016: 770-778.
- [50] Li B, Wu W, Wang Q, et al. SiamRPN++: Evolution of siamese visual tracking with very deep networks[C]//*Proc. of IEEE/CVF Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019: 4277-4286.
- [51] Fan H, Ling H. Siamese cascaded region proposal networks for real-time visual tracking[C]//*Proc. of IEEE/CVF Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019: 7944-7953.
- [52] Danelljan M, Bhat G. ATOM: Accurate tracking by overlap maximization[C]//*Proc. of IEEE/CVF Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019: 4655-4664.
- [53] Jiang B, Luo R, Mao J, et al. Acquisition of localization confidence for accurate object detection[J]. *arXiv e-prints*, 2018, 1807: 11590.
- [54] Muller M, Bibi A, Giancola S, et al. TrackingNet: A large-scale dataset and benchmark for object tracking in the wild [J]. *arXiv e-prints*, 2018, 1803: 10794.
- [55] Huang L, Zhao X, Huang K. GOT-10k: A large high-diversity benchmark for generic object tracking in the wild [C]// *Proc. of IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2019: 1-1.

作者简介:

罗元(1972—),女,1993年毕业于浙江大学光学仪器专业,2003年获重庆大学仪器科学与技术专业博士学位,教授,研究领域为数字图像处理及智能信号处理。

低噪声 CMOS 图像传感器技术研究综述

刘嵘侃^{1,2}, 邢德智^{2*}, 唐昭焕^{1,3}, 徐 焱^{1,2}

(1. 中国电子科技集团重庆声光电有限公司, 重庆 400060; 2. 联合微电子中心有限责任公司, 重庆 401332;
3. 模拟集成电路重点实验室, 重庆 400060)

摘要: 文章总结了低噪声 CMOS 图像传感器代表性关键技术的最新研究进展。从 CMOS 图像传感器架构及各模块设计的角度,介绍了有源像素结构和图像传感器架构,分析了广泛采用的像素内源跟随 CMOS 图像传感器读出电路及其噪声等效模型,重点介绍了低噪声 CMOS 图像传感器关键技术,包括共享参考像素差分共源放大器技术、相关多采样技术、像素内斩波技术,以及相关技术的电路级实现方式。

关键词: CMOS 图像传感器; 低噪声; 相关多采样; 模拟集成电路

中图分类号: TN432 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0768-06

An Overview of Low Noise CMOS Image Sensor Technique

LIU Rongkan^{1,2}, XING Dezhi², TANG Zhaohuan^{1,3}, XU Yang^{1,2}

(1. Chongqing Acoustic-Optic-Electronic Co. Ltd., Chongqing 400060, CHN;

2. United Microelectronics Center Corp., Chongqing 401332, CHN;

3. Science and Technology on Analog Integrated Circuit Laboratory, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: The latest developments of representative key technologies of low noise CMOS image sensors are summarized. The active pixel structure and the readout circuit architecture of image sensor are introduced from such aspects as the architectures and module design of CMOS image sensors. The readout circuit with in-pixel source follower and its noise equivalent model are analyzed. The key technologies of low noise CMOS image sensor are introduced in detail, including reference-shared in-pixel differential amplifier technique, correlated multiple sampling technique and in-pixel chopping technique, and the circuit implementations of these techniques are introduced as well.

Key words: CMOS image sensor; low noise; correlated multiple sampling; analog IC

0 引言

相较于电荷耦合器件(CCD),基于专用 CMOS 工艺的 CMOS 图像传感器(CMOS Image Sensor, CIS)具有易于片上集成、低功耗、小体积和低成本等特点。近年来,随着微光 CMOS 图像传感器技术的发展,其噪声性能已成为影响弱光条件下成像质量的重要因素^[1-18]。噪声是图像传感器的关键指标之一,决定着图像的成像质量。随着 CMOS 工艺尺

寸的不断缩小和工艺发展,器件物理尺寸随之减小,CIS 性能不断提高,尤其在速度、分辨率、填充因子、灵敏度、暗电流和功耗等方面都有显著提升和改善。Pinned 光电二极管技术(PPD)可以有效减小暗电流,去除像素的 KTC 噪声,获得高转换增益。而用于信号采样和噪声消除的高增益列读出电路则可以进一步降低读出随机噪声,因此先进 CMOS 图像传感器的噪声水平可以与 CCD 图像传感器相媲美,甚至优于后者,特别是在高帧频应用领域。针对下一代低噪声 CMOS 图像传感器,为了更有效地降低像素源极跟随放大器的噪声,特别是 $1/f$ 噪声和随机

收稿日期:2020-08-06.

* 通信作者:邢德智 **E-mail:** dezhi.xing@cumec.cn

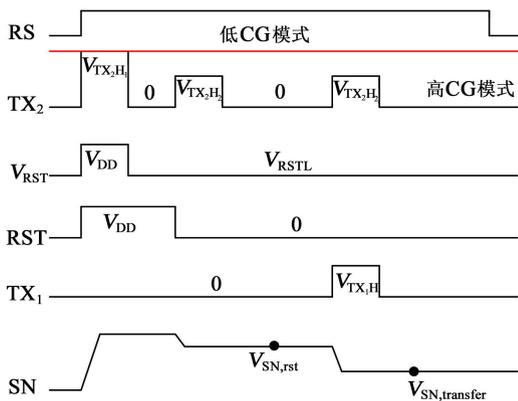
噪声,并保持信号的动态范围,需要采用先进的降噪技术^[1-32]。

本文总结了低噪声CMOS图像传感器代表性关键技术的最新研究进展,以为设计者了解最新的低噪声CMOS图像传感器研究提供有益的参考。

1 低噪声CMOS图像传感器像素单元及架构研究进展

1.1 有源像素结构

采用有源像素可以降低噪声、加快读取速度、增强成像质量。4T像素结构在3T像素结构的基础上采用了一个Pinned光电二极管(PPD),增加了一个传输栅和一个浮置扩散节点。采用PPD结构不仅可以有效避免光电二极管中的电荷转移不完全性,而且能大大减小暗电流,同时传输栅的设计使得相关双采样技术得以实现。最近提出的超低噪声像素结构,通过对工艺进行改进,重塑沿信号路径的电位分布以达到将检测节点(SN)和传输门(TG)重叠电容隔离的目的,并通过从SN侧收缩其沟道宽度来减少与复位晶体管的重叠,从而减小SN电容,提高了像素转换增益(CG),使其具备了光子计数能力^[19-20]。文献[21]提出了一种具有双转换增益特性的5T像素结构,其电路和对应的时序如图1所示。这种方案与CMOS工艺兼容,既具有光子计数能力又不会损失动态范围。在饱和电平为6500e⁻时,转换增益可在250和115μV/e⁻之间进行调节。该像素结构的良好性能归因于新增的传输门,通过将SN与复位和TG交叠电容隔离以实现低SN电容,同时具备CG可调能力。通过像素内的薄栅氧PMOS源跟随器(SF)和最佳尺寸优化,实现低噪声



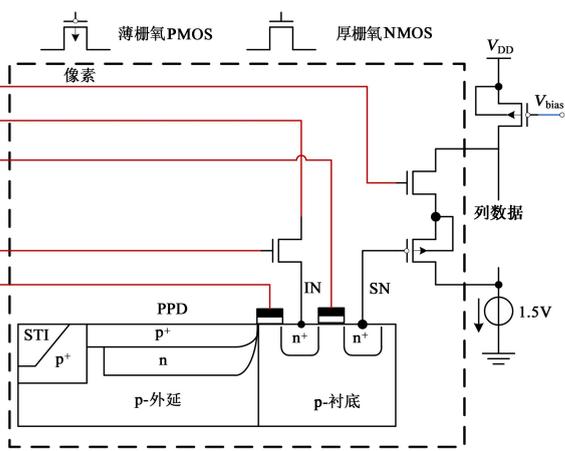
(b) 对应时序

图1 具有双转换增益特性的5T像素结构

读出。与传统的4T方案相比,该像素结构具有中间节点(IN),该节点与SN通过栅极进行隔离,可以大大减小SN电容。

1.2 低噪声CMOS图像传感器架构

低噪声CMOS图像传感器的整体架构如图2所示,主要由像素阵列和读出电路构成^[22]。对于二维平面芯片结构,像素阵列位于成像器的中央,每个像素包括一个PPD以及至少一个放大晶体管和三个用于复位、传输和行选择的MOS晶体管。列并行读出电路技术在获得高帧速的同时降低了ADC的设计难度。行控制电路由移位寄存器和电平转换器组成,以便产生像素阵列逐行并行读取需要的行选、复位和传输控制信号。整体架构的原理为:光经过像素阵列转换为电信号,通过相关双采样(CDS)技术实现信号的降噪处理,然后进入可编程增益放大器(PGA)进行信号放大,再通过



(a) 5T像素电路

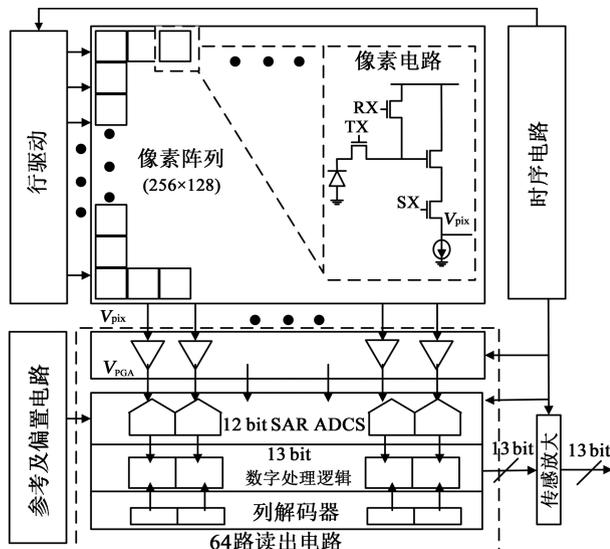


图2 低噪声CMOS图像传感器架构

列级模数转换电路(ADC)实现信号的数字化,将数据存储在静态随机存储器 SRAM 中,最后水平移位进行数字输出。

目前多数 CMOS 图像传感器读出链路基于像素内源跟随结构^[23],如图 3 所示。该方案具有结构简单、动态范围大、复位简单、抗电荷注入的优点。后续主要针对这种结构的读出链路进行噪声源及等效模型分析。

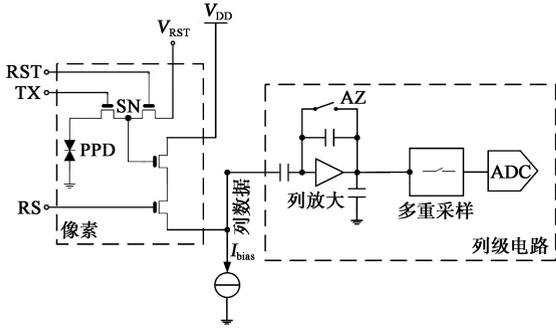


图 3 基于源跟随结构的 CMOS 图像传感器读出链路

2 CMOS 图像传感器噪声模型

2.1 CMOS 图像传感器噪声类型

在 CMOS 图像传感器中,噪声主要分为随机噪声(RN)和固定模式噪声(FPN)。散粒噪声、热噪声、暗电流散射噪声、复位噪声、 $1/f$ 噪声等属于随机噪声。暗信号噪声、失调噪声、非均匀光子强度噪声和非均匀跨导噪声属于固定模式噪声^[24]。信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)定义为在一定光照条件下输入信号电平与噪声电平的比值,其表达式为

$$SNR = 20\log\left(\frac{V_{\text{signal}}}{V_{\text{noise}}}\right) \quad (1)$$

其中, V_{signal} 为信号电平, V_{noise} 为给定输入信号所对应的噪声水平。在暗光照条件下,读出噪声是限制信噪比的重要因素。

散粒噪声是由一系列具有相同概率的独立物理过程引发的统计现象,它是由载流子的分散性造成的,在低频与中频情况下,散粒噪声表现为白噪声特性。CMOS 图像传感器中的散粒噪声大致分为两种:光子散粒噪声和暗电流散粒噪声。复位噪声是 CMOS 图像传感器像素单元的重要噪声,来源于开关管的复位操作。热噪声是由导体中电子的热振动导致的,与温度有关,有源像素的热噪声主要来自于源跟随器、列选通开关。 $1/f$ 噪声主要源自 MOS 晶体管沟道表面的晶格缺陷,界面处的悬挂键造成

载流子的随机俘获和释放,产生低频闪烁噪声。固定模式噪声是 CMOS 图像传感器的主要噪声之一,产生原因包括:工艺制造引起的器件失配使像素阵列光响应出现空间不均匀现象、列级增益变化以及失调空间变化,通过相关采样技术可以对其进行有效抑制。

2.2 CMOS 图像传感器读出电路噪声模型

基于源极跟随结构的 CMOS 图像传感器读出电路噪声可以等效为图 4 所示的传输模型。其中 ϕ_e 是光子通量, N_{DC} 是在光电二极管积分时间内与暗电流积分对应的电子数, $\eta(\lambda)$ 是量子效率, G_C 是转换增益(取决于感测节点电容 C_{SN}), $A_1(f)$ 为第一级增益, $SH(f)$ 为采样保持电路的传递函数, $A_2(f)$ 为输出级增益。图 4 所示的完整传递函数可以表达为^[25]

$$V_{\text{out}} = (\eta(\lambda) \cdot \phi_e + N_{DC}) \cdot G_C(C_{SN}) \cdot A_1(f) \cdot SH(f) \cdot A_2(f) \quad (2)$$

式中, V_{out} 是输出信号, σ_{photon} 是以电子为单位的光子噪声, σ_{DC} 是以电子为单位的暗电流引起的噪声, σ_{reset} 是以电压为单位的复位噪声, σ_{A_1+SH} 是以电压为单位的的第一级和采样保持级噪声, σ_{A_2} 是输出级噪声。

减小噪声响应的主要措施包括:(1)通过设计优化减小像素内放大器级或源极跟随级;(2)通过减小 SN 电容增加转换增益;(3)降低暗电流。暗电流噪声服从泊松分布,并与工艺有关;(4)提高读出电路增益,减小等效输入噪声。

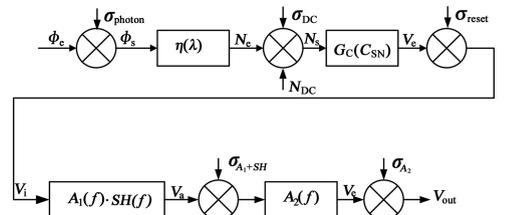


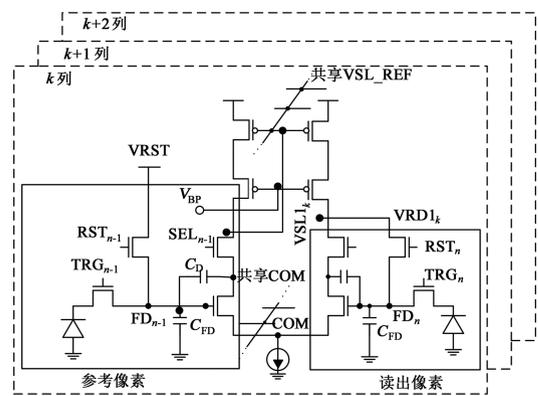
图 4 CMOS 图像传感器读出链路噪声等效模型

3 低噪声 CMOS 图像传感器读出电路关键技术研究进展

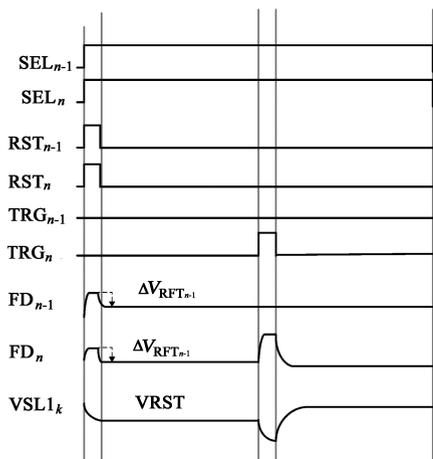
3.1 共享参考像素差分共源放大器技术

低噪声和高动态范围是弱光和强光情况下成像的基本特征,一种能够有效改善读出噪声的方法是采用读出链路前端高增益放大器来抑制后级产生的噪声,为了实现较好的降噪效果,需在像素内增加额外的器件,但这会导致像素单元尺寸的增加。采用

像素内差分共源放大器(DA)可解决这种性能和设计间的矛盾,既实现了像素高增益又不会增加像素尺寸,该结构还能够切换到低增益模式^[26]。由于DA的噪声源器件加倍使得噪声消减效应受限,针对这一问题,文献[27]提出了另一种共享参考像素差分共源放大器技术,该技术采用一个读出像素和一个非读出参考像素组成一个DA结构,其等效电路和对应时序如图5所示。由于上千个参考像素并联连接,其W/L尺寸变得非常大,差分将参考像素侧的噪声减小到可以忽略的水平,因此避免了使用DA造成的噪声恶化。



(a) 等效电路图



(b) 时序图

图5 共享参考像素等效电路图及时序图

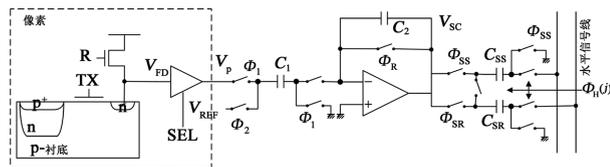
3.2 相关多采样技术

CIS通常使用可编程增益放大器和多次采样技术来抑制像素和读出链路的噪声。有关文献已提出的多采样方法有相关多采样技术(CMS)^[28]、数字相关多采样技术(DCMS)^[29],以及快速多采样技术(FCMS)^[30]等。CMS将相关双采样与求平均相结合,M阶CMS相当于在重置电平时进行M次采样平均,在电荷转移后也进行M次采样平均,然后对

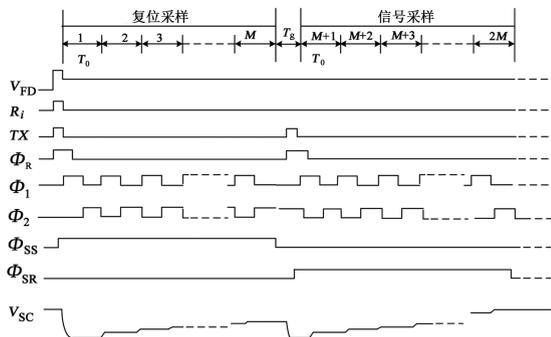
两个平均值进行比较。理想的CMS输出电压可以表示为

$$V_{CMS} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M V_{transfer,i} - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M V_{reset,i} \quad (3)$$

CIS相关多采样读出链路可以通过模拟或数字的方式实现多次采样。图6(a)所示为采用一个开关电容积分器和两个采样保持电路的模拟CMS CIS读出链路原理图,像素阵列采用带PPD的4T有源像素,CMS工作时序如图6(b)所示, T_0 是采样时间, T_g 是复位和信号采样间隔。第一阶段,CMS工作前, Φ_R 控制的开关导通将电容 C_2 初始化,上一次存储在 C_2 上的像素信号被清零。当 Φ_1 控制的开关导通时,对复位电平 V_p 进行第一次采样;第二阶段, Φ_2 控制的开关导通,存储在 C_1 上的电荷传输到 C_2 上。之后按照同样的步骤,重复M次,完成采样电荷的存储和转移;第三阶段,按照同样的步骤,对信号电平进行M次操作,结果保存在 C_{SS} 上;第四阶段,存储在S/H电容上的两个输出通过水平扫描仪扫描,其差值在输出端使用差分电荷放大器进行像素噪声消除。积分CMS的增益为M,该增益是像素输出的复位和信号电平的平均值之差的函数。



(a) 电路原理图



(b) 时序图

图6 CMS电路图及时序图

CMS也可以在数字域进行^[23]。图7(a)所示为基于4T像素、列电平放大和多斜坡ADC的读出链路,多斜坡ADC通过多次模数转换来执行CMS,相对应的时序如图7(b)所示。

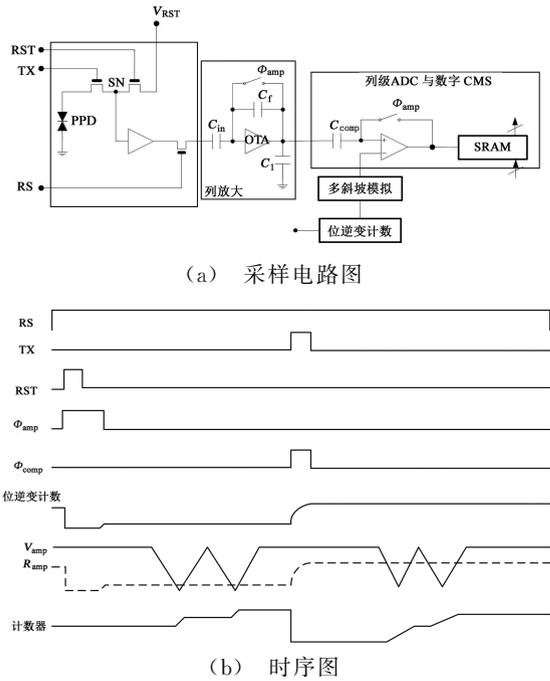


图 7 数字相关多采样电路及时序图

3.3 像素内斩波技术

动态范围受到输出摆幅和噪声的限制,有源像素传感器(APS)的主要噪声源是开关的热噪声和源极跟随器的低频噪声或 $1/f$ 噪声。采用相关双采样技术可以有效降低像素复位开关的热噪声,而 $1/f$ 噪声是由传导电流或阈值电压的离散波动引起的,进而造成像素的闪烁输出现象,可采用斩波技术进行抑制^[31],将低频噪声调制到相关性较小的频带频率。由于该斩波技术需要额外的开关晶体管进行控制,会影响像素的填充因子,因此文献[32]提出了一种新的 3T 像素的斩波技术,基本结构如图 8 所示。

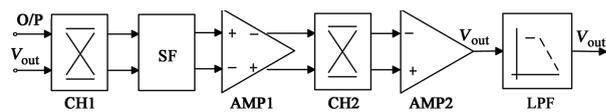


图 8 像素内斩波实现方式

在图 8 中,光电二极管(PD)输出信号在进入 SF 模块之前使用第一级斩波器(CH1),被调制到斩波频率(f_{ch})。SF 的输出连接到放大器 1(AMP1),放大器 1 的输出由四部分组成,包括:放大的调制 PD 信号、放大的 SF 低频噪声、放大器噪声和输出失调电压,AMP1 的输出通过第二斩波器(CH2)再次进行斩波。由于 AMP1 和 CH2 处于列级电路中,故不影响像素的填充率,CH2 将 PD 信号解调

到初始基带频率,而将 SF 和 AMP1 的低频噪声,以及运放的失调电压调制到 f_{ch} ,信号通过 CH2 后被放大器 2(AMP2)进一步放大,AMP2 的输出反馈到 CH1 的其他输入端以完成闭环单位增益反馈结构。CH2 后的低通滤波器(LPF)可抑制上调制偏移和 $1/f$ 噪声,并且隔离由于斩波动作而产生的频率 f_{ch} 处的输出尖峰。额外增加的小尺寸斩波开关导致的填充率下降可以通过选择小尺寸源跟随器来进行部分补偿,而有源像素传感器源极跟随晶体管的低频或 $1/f$ 噪声可以通过斩波来减小。

4 结束语

本文分析了低噪声 CMOS 图像传感器读出链路的噪声特性及其等效模型,总结了近年来低噪声 CMOS 图像传感器读出链路的代表性技术和解决方案。通过对这些关键技术进行介绍,可帮助设计者理解噪声对 CMOS 图像传感器成像质量的影响,优化电路的噪声响应以提高传感器性能,进而对低噪声 CMOS 图像传感器的设计提供有益帮助。

参考文献:

- [1] Kumagai O, Niwa A, Hanzawa K, et al. A 1/4-inch 3.9 Mpixel low-power event-driven back-illuminated stacked CMOS image sensor[C]// Proc. of 2018 IEEE Inter. Solid-State Circuits Conf, 2018; 86-87.
- [2] Ji S, Pu J, Lim B C, et al. A 220 pJ/pixel/frame CMOS image sensor with partial settling readout architecture[C]// Proc. of 2016 IEEE Symp. on VLSI Circuits (VLSI-Circuits), 2016; 226-227.
- [3] Seiji T, Yi-Min H, Jhy-Jyi S, et al. A 45 nm stacked CMOS image sensor process technology for submicron pixel [J]. Sensors, 2017, 17(12): 2816.
- [4] Kim Y, Choi W C, Park D H, et al. A 1/2.8-inch 24 Mpixel CMOS image sensor with 0.9 μm unit pixels separated by full-depth deep-trench isolation[C]// Proc. of IEEE Inter. Solid-State Circuits Conf., 2018; 84-85.
- [5] Miyauchi K, Okura S, Mori K, et al. High optical performance 2.8 μm BSI LOFIC pixel with 120 ke^- FWC and 160 $\mu\text{V}/\text{e}^-$ conversion gain[C]//Proc. of Int. Image Sensor Workshop, 2019; 246-249.
- [6] Musalgaonkar G, Priyadarshini N, Sarkar M. An HDR pixel with over 60 dB dynamic range enhancement using in-pixel parametric amplification [J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2017, 65(2): 1-9.
- [7] Yao Q, Dierickx B, Dupont B, et al. CMOS image sensor reaching 0.34 e^- RMS read noise by inversion-accumulation cycling design concepts and operation principle[C]// Proc. of

- Int. Image Sensor Workshop, 2015: 369-372.
- [8] Priyadarshini N, Anand C, Sarkar M. A WDR CMOS image sensor employing in-pixel capacitive variation using a reconfigurable source follower for low light applications[C]// Proc. of IEEE Asian Solid-State Circuits Conf., 2018: 21-24.
- [9] Boukhayma A, Peizerat A, Enz C. Temporal readout noise analysis and reduction techniques for low-light CMOS image sensors[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2015, 63(1): 72-78.
- [10] Yeh S F, Chou K Y, Tu H Y, et al. A $0.66 e^-$ RMS temporal-readout-noise 3-D-stacked CMOS image sensor with conditional correlated multiple sampling technique[J]. IEEE J. of Solid-State Circuits, 2018, 53(2): 527-537.
- [11] Takahashi H, Noda T, Matsuda T, et al. A 1/2.7 inch low-noise CMOS image sensor for full HD camcorders[C]// Proc. of Solid-State Circuits Conf., 2007: 510-618.
- [12] Capoccia R, Boukhayma A, Enz C. Experimental verification of the impact of analog CMS on CIS readout noise[J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2020, 67(3): 774-784.
- [13] Kainuma T, Gono S, Ichikawa T, et al. A 1/1.7-inch 20 Mpixel back-illuminated stacked CMOS image sensor for new imaging applications[C]// Proc. of 2015 IEEE Inter. Solid-State Circuits Conf., 2015: 39.
- [14] Klumperink E A M, Gierkink S L J. Reducing MOSFET $1/f$ noise and power consumption by switched biasing[J]. IEEE J. of Solid-State Circuits, 2000, 35(7): 994-1001.
- [15] Spivak A, Belenky A, Yadid-Pecht O. Very sensitive low-noise active-reset CMOS image sensor with in-pixel ADC[J]. IEEE Trans. on Circuits & Systems II Express Briefs, 2016, 63(10): 939-943.
- [16] Seo M W, Wang T, Jun S W, et al. A $0.44 e^-$ RMS read-noise 32 f/s 0.5 Mpixel high-sensitivity RG-less-pixel CMOS image sensor using bootstrapping reset[C]// Proc. of 2017 IEEE Int. Solid-State Circuits Conf., 2017: 80-81.
- [17] Sato M, Yorikado Y, Matsumura Y, et al. $5.8 A 0.50 e^-$ RMS noise $1.45 \mu\text{m}$ -pitch CMOS image sensor with reference-shared in-pixel differential amplifier at 8.3 Mpixel 35 f/s[C]// Proc. of 2020 IEEE Inter. Solid-State Circuits Conf., 2020: 108-110.
- [18] Boukhayma A, Caizzzone A, Capoccia R, et al. Design and optimization of low power and low light sensor; (Invited) [C]// Proc. of 2020 IEEE Custom Integrated Circuits Conf., 2020: 1-8.
- [19] Boukhayma A, Peizerat A, Enz C. A $0.4 e^-$ RMS temporal readout noise $7.5 \mu\text{m}$ pitch and a 66% fill factor pixel for low light CMOS image sensors[C]// Proc. of Inter. Image Sensors Workshop, 2015: 1-4.
- [20] Ma J, Starkey D, Rao A, et al. Characterization of quanta image sensor pump-gate jots with deep sub-electron read noise[J]. IEEE J. of the Electron Devices Society, 2015, 3(6): 472-480.
- [21] Boukhayma A, Caizzzone A, Enz C. A CMOS image sensor pixel combining deep sub-electron noise with wide dynamic range[J]. IEEE Electron Device Lett., 2020, 41(6): 880-883.
- [22] Kim M K, Hong S K, Kwon O K. A fast multiple sampling method for low-noise CMOS image sensors with column-parallel 12-bit SAR ADCs[J]. Sensors, 2015, 16(1): 27.
- [23] Boukhayma A. Ultra Low Noise CMOS Image Sensor[M]. Switzerland: Springer, 2018: 13-34.
- [24] Sumi H. Low-noise imaging system with CMOS sensor for high-quality imaging[C]// Proc. of Inter. Electron Devices Meeting, 2006: 1-4.
- [25] Martin-Gonthier P, Magnan P. CMOS image sensor noise analysis through noise power spectral density including undersampling effect due to readout sequence[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2014, 61(8): 2834-2842.
- [26] Choi J, Park S, Cho J, et al. A $1.36 \mu\text{W}$ adaptive CMOS image sensor with reconfigurable modes of operation from available energy/illumination for distributed wireless sensor network[C]// Proc. of 2012 IEEE Inter. Solid-State Circuits Conf., 2012: 112-113.
- [27] Sato M, Yorikado Y, Matsumura Y, et al. $5.8 A 0.50 e^-$ RMS noise $1.45 \mu\text{m}$ -pitch CMOS image sensor with reference-shared in-pixel differential amplifier at 8.3 Mpixel 35 f/s[C]// Proc. of 2020 IEEE Inter. Solid-State Circuits Conf., 2020: 108-110.
- [28] Suh S, Itoh S, Aoyama S, et al. Column-parallel correlated multiple sampling circuits for CMOS image sensors and their noise reduction effects[J]. Sensors, 2010, 10(10): 9139-9154.
- [29] Chen Y, Xu Y, Mierop A J, et al. Column-parallel digital correlated multiple sampling for low-noise CMOS image sensors[J]. IEEE Sensors J., 2012, 12(4): 793-799.
- [30] Kim M K, Hong S K, Kwon O K. A fast multiple sampling method for low-noise CMOS image sensors with column-parallel 12 bit SAR ADCs[J]. Sensors, 2015, 16(1): 27.
- [31] Park B, Park I, Choi W, et al. A 64×64 APD-based ToF image sensor with background light suppression up to 200 kLx using in-pixel auto-zeroing and chopping[C]// 2019 Symp. on VLSI Circuits, 2019: 256-257.
- [32] Jainwal K, Anand C, Sarkar M. $1/f$ noise reduction using in-pixel chopping in CMOS image sensors[J]. IEEE Solid-State Circuits Lett., 2018, 1(6): 146-149.

作者简介:

刘嵘侃(1968—),男,四川渠县人,硕士,高级工程师,主要研究方向为模拟IC器件结构与工艺;

邢德智(1980—),男,山西太原人,博士,工程师,主要研究方向为高性能模数转换器设计。

航空发动机叶尖间隙测量技术研究进展

许欧阳, 童杏林*

(武汉理工大学 光纤传感技术国家工程实验室, 武汉 430070)

摘要: 系统介绍了国内外航空发动机叶尖间隙测量技术的研究进展,分析了这些技术的原理、特点及具体应用,并指出了发展方向。在此基础上,提出了适用于航空发动机高转速叶片在线监测的新方法,并介绍了一种可实现航空发动机叶片故障监测的膜片式高温光纤 F-P 声发射传感测量系统。

关键词: 航空发动机; 叶尖间隙; 高温光纤; 研究进展

中图分类号: TN911.74 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0774-05

Research Progress of Aero-engine Blade Tip Clearance Measurement Technology

XU Ouyang, TONG Xinglin

(National Engineering Laboratory for Optical Fiber Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, CHN)

Abstract: The research progresses of the techniques for measuring the tip clearance of aero-engine are introduced, and their principles, characteristics and specific applications are analyzed, and the development trends are pointed out. Based on this research, a new method for on-line monitoring of high-speed blades of aeroengines is proposed, and a diaphragm-type high-temperature optical fiber F-P acoustic emission sensing measurement system is introduced to achieve aero-engine blade fault monitoring.

Key words: aero-engine; blade tip clearance; high temperature fiber; research progress

0 引言

航空发动机的机械结构十分复杂,其性能的优劣直接影响飞机能否安全稳定运行。叶片是航空发动机的关键组件,当其在超高温、高压、高转速的恶劣环境中长期工作时,会受到自身离心力、空气流或燃气流所产生的气流力的作用,这些作用力会持续不断地影响叶片的运行状态。由于航空发动机工作环境的特殊性,叶片还可能受到其他作用力的影响^[1]。高转速叶片容易发生振动,导致叶尖间隙变大,此时叶片会出现不同程度的疲劳状态,可能产生裂纹、折断等严重故障,造成航空发动机机组损坏。

根据现有相关文献报道,发动机叶片叶尖间隙每增加叶片长度的 1%,叶片效率会降低 1.5%;然而效率每降低 1%,航空发动机的耗油率会增加 2%^[2]。因此,在航空发动机生产以及使用过程中,必须实时监测叶片叶尖间隙,以提前获取叶片运行状态,为航空发动机的安全运行提供强有力的保障。

研究人员提出了多种叶尖间隙测量方法,本文将常见测量方法分为非光学测量法与光学测量法。目前非光学测量法主要包括:探针测量法、电容测量法、涡电流测量法、微波测量法、超声波测量法;光学测量法主要包括:反射强度测量法、干涉强度测量法、激光测量法^[3]。其中,不同的测量方法使用的技术原理不同,各有优缺点,需要根据不同的应用场景选取合适的监测方法。本文将介绍几种重要的叶尖间隙测量方法,并对光学检测技术相关原理进行深入分析。

收稿日期:2020-06-15.

基金项目:国家“863”项目(2015AA043505);湖北省重大技术创新项目(2017ACA167).

*通信作者:童杏林

E-mail: tongxinglin@whut.edu.cn

1 非光学测量法

1.1 探针测量法

探针法利用传感探针直流放电原理来实现发动机叶尖间隙测量,检测系统主要由放电探针、驱动器、控制器和信号处理单元组成。早在1983年德国Davidson等^[4]提出了该测量技术,在此研究基础上,Sheard等提出了可用于发动机叶尖间隙测量系统^[5],将放电探针安装于发动机机匣表面,同时通过控制器将探针靠近高转速叶片,直到探针放电。根据探针移动的距离可以检测叶尖间隙。该检测系统在6 mm的测量范围内精度可达到25 μm ,可在1500 $^{\circ}\text{C}$ 的恶劣环境中使用。英国ROTADATA公司Rotatip检测系统在最大工作转速5000 r/min的情况下可实现0.01 mm的分辨率,重复性误差控制在 ± 0.05 mm。

该方法的主要优点是测量精度较高,耐温性能较好,检测系统性能可靠。但传感探针和发动机机匣表面污染会导致测量精度降低,并且该方法只能检测最小的叶尖间隙,目前还处于实验室研究阶段,通常用于其他测量系统校准的基准。

1.2 涡电流测量法

涡电流传感器基于电磁感应原理,对传感器施加一个时变磁场,当叶片经过传感器时,叶片会产生一个涡流磁场,该磁场会削弱原磁场^[6]。叶片在高速旋转过程中,传感器检测的磁场信号强度会持续变化,通过检测拾取信号的变化量得到叶尖间隙信息,检测原理如图1所示。该类传感器主要分为两种类型,即主动式与被动式传感探头,被动式传感器由一个线圈与一个永磁铁构成,主动式传感器由一个或多个线圈构成。

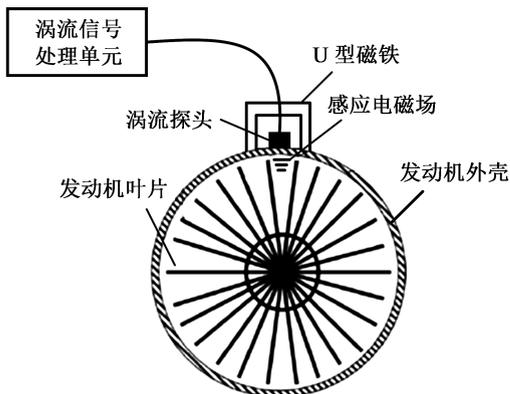


图1 叶片电磁检测测量原理示意图

该类传感探头相对于其他传感探头的最大优势

是能够通过机匣获取叶片检测信号,在污染较为严重的环境中仍可以正常测量,但是实际应用中机匣必须为非磁性材料并且不能太厚。美国HOOD公司^[7]研制了两种涡电流传感探头,可满足不同环境温度要求,其中普通传感探头可耐260 $^{\circ}\text{C}$,另外一种传感探头装有空冷装置,能耐温1000 $^{\circ}\text{C}$ 以上,可用于实际工作环境。爱德森电子公司利用涡流检测原理研制了一套航空发动机叶片监测系统,通过相关处理分析得到叶片转数、损伤等相关信息。

涡电流式传感器的主要优点为:结构简单、体积较小、灵敏度较高、频率响应范围较大等。但是该类型传感器易受到环境温度、叶片振动等影响,在实际应用中需要改进。

1.3 电容测量法

电容式测量技术相对成熟,在涡轮机叶尖间隙监测中应用较多。其基本原理是:将传感器的极芯视为电容一极,叶片端面视为电容另一极,芯极与叶片之间的距离会影响电容值,通过检测电容的变化获取叶片尖端间隙。图2为传感器结构示意图^[1]。

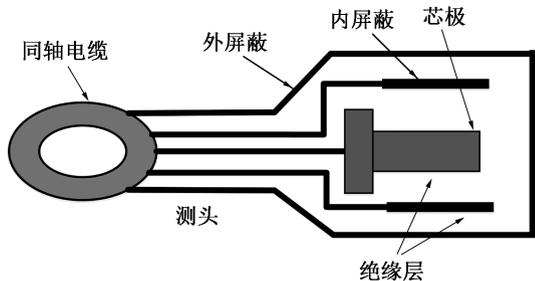


图2 电容传感器结构示意图

电容式传感器具有较好的耐温性能,法国FOGLE和THERMOCOAX公司研制的电容传感器最高工作环境温度可达1400 $^{\circ}\text{C}$,国内天津大学研究团队研制的高温电容传感器可耐800 $^{\circ}\text{C}$ 高温,并且在烟气轮机等设备上得到了验证。Fabian等^[8]开发了一种电容式传感器,用于小型燃气轮机间隙控制。该方法将机匣内壁当作电容一极,全部叶片当作电容另一极,检测所有叶片平均间隙,系统检测精度小于1 μm 。Alexander等^[9]研制了一种可用于高温、电离等恶劣环境的叶尖间隙测量电容传感器,该传感器的测量范围在0.3~1.8 mm,可达到15 μm 的测量精度。

电容式传感器具有测量灵敏度高、体积小、工程安装方便等优点,但是在实际工程应用中,恶劣的环境会影响传感探头性能,两极之间的介质也会改变

检测的电容值,使测量精度降低。

1.4 微波测量法

微波测量法的基本原理是:在发动机机匣表面按一定距离安装若干个微波传感器,保证传感器之间形成特定角度。微波传感器对准叶片端面发射连续微波信号,叶片叶尖反射回来的信号被后端信号处理中心接收,通过比较发射信号与接收信号来分析叶尖间隙等相关信息。

早在 1996 年,Grzybowski 等^[10]提出了一种微波波尖端间隙检测系统,该微波技术基于共振频率测量得到叶片振动位移等信息。相较于其他测量技术,微波传感器拥有固有的自校准功能,尽管温度变化和旋转叶片可能造成磨损,该传感器仍可进行精确操作。

美国 Glenn 研究所^[11]研发了一种高温微波叶尖间隙探针,该探针直径约为 14 mm,长度约为 26 mm,可满足 900 °C 高温环境下工作的需求。目前该类型传感器叶尖振动位移测量精度为 25 μm,传感器性能还在不断提高,目标测量精度达到 25 μm。

北京长城计量研究所研发了一种基于微带贴片原理的微波传感器,该传感器可在污染严重的环境中工作,测量精度较高,稳定性较好。在模拟的 24 GHz 工作环境中,在 0.1~6 mm 测量范围内灵敏度达 0.5(°)/mm^[12]。

微波测量技术的优点是耐高温(最高工作温度可达 1 371 °C)、检测精度较高、发动机燃料等污染对传感器性能影响较小,适合航空航天等特殊应用场合。但是微波传感器造价十分昂贵,具体应用到叶片监测需要进一步研究。

2 光学测量法

2.1 反射强度测量法

随着相关检测技术的发展,研究人员开始将光纤传感器用于叶尖间隙测量。反射强度检测型传感探头通过发射光纤将激光打在叶片端面,检测从叶片端面反射回来的光信号,反射回来的光信号强度能反映叶尖间隙等信息^[13]。常见的传感器探头由七根传感光纤组成,其结构如图 3 所示,中心位置光纤为光信号发射光纤,周围 6 根光纤为旋转叶片反射信号接收光纤。

反射式光纤传感器在整个测量系统中起着至关重要的作用,传感器采集信号质量决定该系统的测

量精度。在实际工作环境中,传感器需按照一定角度安装在发动机机匣内壁,传感器的数量不定,不同位置的传感器采集叶片在高速旋转的过程中反射回来的脉冲信号。解调系统记录每次采集的脉冲信号,通过比较不同的时间脉冲信号分析出叶片叶尖间隙、振动位移等参数^[14]。图 4 给出了叶尖间隙测量系统示意图。

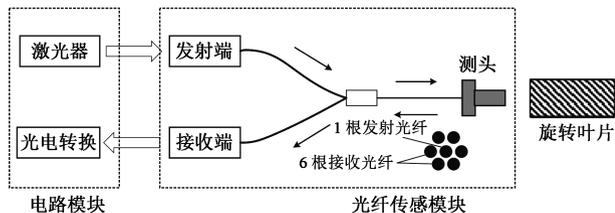


图 3 反射式光纤传感器示意图

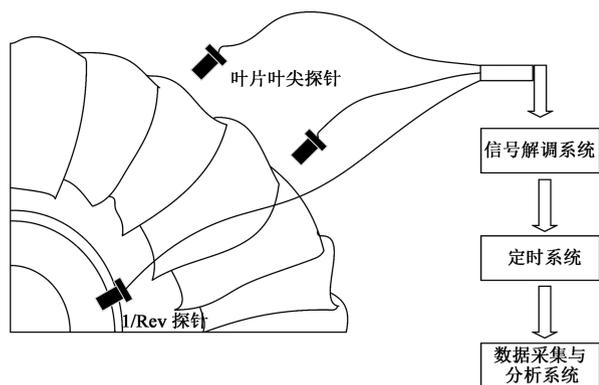


图 4 叶尖间隙测量系统示意图

Garcia 等^[15]提出了利用两根传感探头测量叶尖反射的强度信号,将两根探测输出电压之比作为叶尖间隙分析信号,此方法可以降低叶片尖端反射率不同对检测精度的影响。中国电科集团^[16]介绍了一种光纤振动传感探头制作的新工艺,能实现所有旋转叶片振动幅值的动态监测。天津大学研究团队^[17]提出了一种适用于非对称尖端定时信号的校准方法,硬件电路采用自动增益控制电路实现信号稳定,可通过该技术提高叶尖检测的测量精度。当叶片的转速为 0~12 000 r/min 时,系统检测范围为 0~3 mm,检测精度为 25 μm。

该方法具有测量灵敏度高、传感探头体积小、抗电磁干扰能力强、可靠性高等优点,能在恶劣的环境中工作。但是传感器的对光过程较为困难,探头容易受到环境污染,导致测量精度降低。

2.2 干涉信号测量法

干涉信号测量法基于干涉测距技术,使用的检测系统是共路径干涉仪,其原理如图 5 所示。相较于传统的迈克尔逊干涉仪,该结构不需要单独的参

考镜,由探头光纤尖端的光学窗口外表面充当参考镜,样品光束与参考光束通过相同的光路。该结构的干涉仪更加稳定,易于光路对准,提供了自动的色散补偿,也会降低机械结构的振动影响。

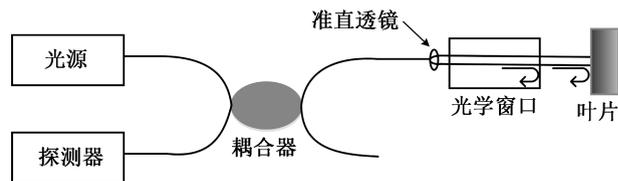


图5 共路径干涉仪原理示意图

干涉信号检测型传感探头结构如图6所示,该类型传感器将蓝宝石窗口的前表面用作公共路径干涉仪的参考镜,光纤振动位移传感器拾取旋转叶片表面反射的光信号,与蓝宝石窗口反射的光信号发生干涉。当旋转叶片振动位移发生改变时,干涉信号会产生变化,利用傅里叶逆变换将干涉图谱条纹的频率转化为光学窗口外表面与叶片反射面之间的距离,实现叶尖间隙参量检测。

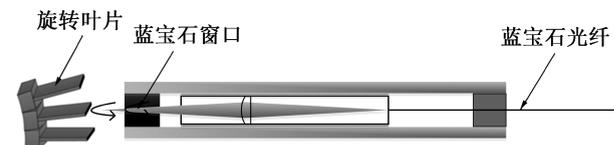


图6 干涉式光纤传感器示意图

2017年,西南科技公司^[18]提出了一种基于干涉的测距技术——光频域反射叶尖间隙检测技术。检测系统包括高温传感探头、蓝宝石光纤和共径干涉仪,传感器的空间分辨率达到 $10\ \mu\text{m}$,测量精度达 $4\ \mu\text{m}$ 。该方法尚处于实验室研究阶段,将其应用于实际环境中的测量效果未知。

2.3 激光探针测量法

激光探针测量法的基本原理是将激光束投射到叶片尖端,反射回来的光信号由光电检测单元接收,当叶尖间隙发生变化时,光电检测单元接收到的光点信号位置发生变化,通过计算变化量确定叶尖间隙^[19]。早期的测量系统不能对单个叶片的叶尖间隙进行测量,美国P&W公司针对此问题提出了一种新型激光探针叶尖间隙测量系统,可用于单个转子叶片和整个转子叶片叶尖间隙测量。

文献^[20]中提到,Barromger等将激光探针叶尖间隙测量系统应用于JT9D和F100/F410系列发动机单个叶片和平均间隙的检测,转子模拟的速度达到 $6\ 000\ \text{r/min}$,该系统的测量范围为 $0\sim$

$3.05\ \text{mm}$,检测误差小于 $0.025\ \text{mm}$,分辨率小于 $0.05\ \text{mm}$,可工作于 $1\ 300\ \text{K}$ 的高温环境中,并且发动机振动对测量信号影响较小,可靠性较高。

该测量方法的主要特点为:待检测转子叶片材料不会影响系统的测量精度,传感器的响应速度快、成本较低、可靠性高,可在恶劣高温高压环境中使用。但是环境污渍会污染探头,导致测量精度降低,同时叶片端面的反射率差也会影响检测信号的强度,在实际应用中需要将传感探头进行特殊结构封装,防止传感探头被破坏,以提高检测精度。目前,国内外真正将此系统应用于航空发动机叶尖间隙测量的较少。

2.4 膜片式光纤 F-P 声发射传感测量系统

目前武汉理工大学董杏林团队研制了一种高温光纤 F-P 声发射传感系统,已应用于结构材料的健康检测。针对航空发动机叶片监测的需求,提出了一种膜片式高温 F-P 声发射传感器,该结构 F-P 传感器体积小、耐腐蚀,可安装于发动机机匣内壁,以用于拾取叶片的声波信号,结构如图7所示。



图7 传感器结构示意图

膜片式高温光纤 F-P 传感器的传感部件是蓝宝石膜片,蓝宝石膜片的平整内表面与光纤端面间构成 F-P 腔。传感探头拾取外界的声波信号,当检测信号发生变化时,会引起传感器输出光信号的强度发生改变,不同检测信号对应叶片不同的工作状态。通过高温光纤 F-P 声发射传感检测系统对高转速叶片发射源信息进行分析与处理,得到旋转叶片工作状态,判断叶片是否出现裂纹故障。

3 结束语

我国航空航天事业发展迅速,实时在线监测航空发动机叶片的运行状态是保证飞机安全运行的关键。本文详细介绍了航空发动机叶尖间隙测量的技术手段,分析了各种测量技术的原理、可靠性和优缺点。相较于其他类型的传感器,光纤传感器有着无可比拟的优势,因此可作为航空发动机叶片监测技术的发展方向。目前,国内外相关研究机构对叶尖间隙测量系统进行了大量的实验验证和研究,针对

航空机载高温高压应用环境的需求,如何提高传感器的可靠性和使用寿命,是需要研究的重点。最后,提出了一种膜片式 F-P 声发射传感系统,可用于叶片裂纹检测,为航空发动机叶片运行状态监测研究提供了新思路。

参考文献:

- [1] 欧阳涛. 基于叶尖定时的旋转叶片振动检测及参数辨识技术[D]. 天津: 天津大学, 2011: 1-18.
OuYang Tao. Vibration detection and parameter identification of rotating blades based on tip timing[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011: 1-18.
- [2] 侯宽新. 涡轮叶尖间隙泄漏流动控制研究进展[J]. 飞航导弹, 2014(1): 85-90.
Hou Kuanxin. Research progress of turbine tip clearance leakage flow control[J]. Flying Missile, 2014(1): 85-90.
- [3] 毕超, 孙建华, 徐昌语, 等. 航空发动机叶尖间隙测量技术的研究与应用[C]// 第七届中国航空学会青年科技论坛文集, 2016: 122-130.
Bi Chao, Sun Jianhua, Xu Changyu, et al. Study and application of tip clearance measurement technologies of aero engine[C]// Proc. of the 7th Aviation Society of China Youth Science and Technology Forum, 2016: 122-130.
- [4] Davidson D P, Derose R D, Wennerstrom A J. The measurement of turbomachinery stator-to-drum running clearances[C]// Proc. of ASME 1983 Inter. Gas Turbine Conference and Exhibit, 1983.
- [5] Sheard A G, Turner S R. Electromechanical measurement of turbomachinery blade tip-to-casting running clearance[C]// Proc. of 37th Inter. Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, 1992.
- [6] 林俊明, 李寒林, 戴永红. 航空发动机叶片动态监测技术[J]. 无损检测, 2019, 41(11): 26-29.
Lin Junming, Li Hanlin, Dai Yonghong. Dynamic monitoring technology of aero-engine blades[J]. Nondestructive Testing, 2019, 41(11): 26-29.
- [7] Kam C, Donald L. Turbo-machinery tip-timing comes of age[J]. Maintenance & Asset Management, 2009, 24(1): 34-40.
- [8] Fabian T, Prinz F. Capacitive blade tip clearance measurements for a micro gas turbine[C]// Proc. of IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conf., 2009.
- [9] Alexander S. Techniques for blade tip clearance measurement with capacitive probes[J]. Measurement Science and Technol., 2000, 11: 865-869.
- [10] Grzybowski R, Knoell H, Foyt G, et al. Microwave blade tip clearance measurement system[C]// Proc. of Inter. Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition, 1996.
- [11] Woike M R, Roeder J W, Hughes C E, et al. Testing of a microwave blade tip clearance sensor at the NASA Glenn research center [C]// Proc. of 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2009.
- [12] 谢兴娟, 吴亚辉, 朱振宇. 航空发动机叶尖间隙测试微波传感器设计与计算[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(5): 63-65.
Xie Xingjuan, Wu Yahui, Zhu Zhenyu. Design and calculation of microwave sensor for tip clearance measurement on aircraft engine[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(5): 63-65.
- [13] 王萍. 叶尖定时方法在国外航空发动机叶片振动测量中的应用综述[J]. 航空科学技术, 2013, (6): 5-9.
Wang Ping. Application review of blade tip timing method for foreign aero-engine blade vibration measurement [J]. Aeronautical Science and Technol., 2013, (6): 5-9.
- [14] 张玉贵. 烟轮机叶片振动的非接触式在线监测关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2008: 1-40.
Zhang Yugui. Research on the key technology of contactless on-line monitoring of blade vibration in a gas turbine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008: 1-40.
- [15] Garcia I, Beloki J, Zubia J, et al. An optical fiber bundle sensor for tip clearance and tip timing measurements in a turbine rig[J]. Sensors, 2013, 13(6): 7385-7398.
- [16] 张承, 周雷, 胡伟. 航空发动机用光纤叶片振动传感探头的研制[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011, 6(2): 217-220.
Zhang Cheng, Zhou Lei, Hu Wei. Development of the optical fiber blade vibration sensing probe for aero-engine[J]. J. of China Academy of Electronics and Information Technol., 2011, 6(2): 217-220.
- [17] Duan F, Zhang J, Jiang J, et al. Method to improve the blade tip-timing accuracy of fiber bundle sensor under varying tip clearance[J]. Optical Engin., 2016, 55(1): 014106.
- [18] Jia Binghui, He Lei. An optical fiber measurement system for blade tip clearance of engine[J]. Inter. J. of Aerospace Engin., 2017(5): 1-9.
- [19] 邱立新, 王振华. 航空发动机叶尖间隙测量研究[J]. 航空发动机, 2001(4): 26-29.
Qiu Lixin, Wang Zhenhua. Study on tip clearance measurement of aeroengine[J]. Aeroengine, 2001(4): 26-29.
- [20] 张娜, 黄春峰. 航空发动机叶尖间隙测量技术[J]. 航空制造技术, 2010(13): 41-45.
Zhang Na, Huang Chunfeng. Measuring technology of blade tip clearance of aeroengine [J]. Aeronautical Manufacturing Technol., 2010(13): 41-45.

作者简介:

童杏林(1964—),男,湖北武汉人,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术、新型光电子器件的研究与开发;

许欧阳(1996—),男,湖北武汉人,硕士,主要从事光纤传感等领域研究。

高帧频高灵敏度线列PIN-CMOS图像传感器研究

陈世军, 王欣*, 丁毅, 施永明, 解宁

(中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

摘要: 设计了一款高帧频高灵敏度双通道16元线列PIN-CMOS图像传感器。相对于传统的pn结光电二极管, PIN光电二极管具有结电容小和量子效率高的优点, 可以降低CTIA像素电路的噪声, 提高信噪比; 同时采用一种新型的相关双采样电路结构, 可以在边积分边读出的模式下实现相关双采样, 抑制像素复位带来的KTC噪声。基于0.35 μm PIN-CMOS工艺进行了线列CMOS图像传感器流片, 并对器件的光电性能进行了测试。测试结果表明: 在像元尺寸为90 $\mu\text{m} \times 90 \mu\text{m}$, 700 nm波长下, 器件灵敏度达3 000 V/(lx · s), 量子效率为96%; 在40 kHz高帧频、0.05 lx光照条件下器件信噪比为7, 适于弱信号下的高速探测。

关键词: CMOS图像传感器; CTIA像素电路; PIN光电二极管; 相关双采样电路
中图分类号: TN216 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0779-05

Study on High Frame and High Sensitivity for Linear PIN-CMOS Image Sensors

CHEN Shijun, WANG Xin, DING Yi, SHI Yongming, XIE Ning

(Key Lab. of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics of The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN)

Abstract: The CMOS image sensor integrated with high frame rate and high sensitivity pin photodiode array was designed. Compared with p-n photodiode, p-i-n photodiode presents the advantages of small junction capacitance and high quantum efficiency. In order to promote the signal-to-noise ratio, the sensor implements a new correlated double sampling (CDS) circuit for eliminating KTC noise while working in the integration during reading mode. In this paper, linear CMOS Image sensor based on CTIA pixel circuit was implemented in 0.35 μm PIN-CMOS process, and the photoelectric response of the device was tested and evaluated. The results show that sensitivity is 3 000 V/(lx · s), and quantum efficiency is 96% at 700 nm wavelength. At a frame rate of 40 kHz, the signal-to-noise is 7 with the illumination down to 0.05 lx, which is suitable for high-speed detection under weak light signal.

Key words: CMOS image sensors; CTIA pixel circuit; PIN photodiode; correlated double sampling

0 引言

CMOS图像传感器是将硅基光敏元与片上CMOS读出电路集成在一起, 实现光电信号转换与输出的光电探测器^[1]。随着CMOS工艺的不断发展, CMOS图像传感器性能不断提高, 逐步取代了

CCD图像传感器, 正朝着高帧频、高灵敏度和低噪声等方向发展, 应用于高帧频和低照度的CMOS图像传感器在微光领域占据了重要地位^[2]。

信噪比是衡量CMOS图像传感器性能的一项重要指标, 大面积像素高速低噪声设计一直是读出电路设计的难点。目前, 比较常用的像元电路有电容反馈跨阻放大型(Capacitive Trans-impedance Amplifier, CTIA)电路、3T和4T有源像素结构。

收稿日期: 2020-09-28.

*通信作者: 王欣 E-mail: 13601710731@163.com

3T 像素结构灵敏度低、噪声大；一般的 4T 像素结构，像素大但拖尾严重。综合考虑高帧频和高灵敏度的要求，像元电路(CTIA)电路。CTIA 具有偏置稳定、注入效率高、线性度好等优点，是一种线列焦平面读出电路常用的输入级结构^[3]，采用小积分电容即可达到高增益。在高帧频工作条件下，文献[4]通过采用边读出边积分的工作模式将积分时间最大化，设计了一种新型的相关双采样电路(Correlated Double Sampling, CDS)，以抑制 KTC 噪声。CTIA 像素结构的读出电路噪声与输入端光敏二极管的结电容密切相关，为了在降低光敏二极管结电容的同时优化光谱特性，本文采用一种 PIN 光敏二极管结构的 PIN-CMOS 工艺^[5]。

文中设计了一款双通道 16 元线列的 CMOS 图像传感器试验芯片。首先介绍了 PIN 光敏二极管的结构和 CTIA 像素电路原理，然后给出了 CTIA 读出电路噪声及相关双采样电路设计，最后对试验芯片测试结果进行了分析。

1 PIN-CMOS 工艺

图 1 为 PIN 光电二极管和 CMOS 电路结构图，PIN 光电二极管在掺杂的 p 型衬底之上增加一层厚度约为 20 μm 的轻掺杂 p 型外延层，电阻率为 400~1 000 Ω·cm。同时，为了实现 CMOS 电路对衬底低电阻率(10~20 Ω·cm)的要求，在 MOS 管区域的高阻 p 型外延层上制备深阱 n 层，这样形成 PIN 光敏元与 CMOS 电路的单片集成^[6]。

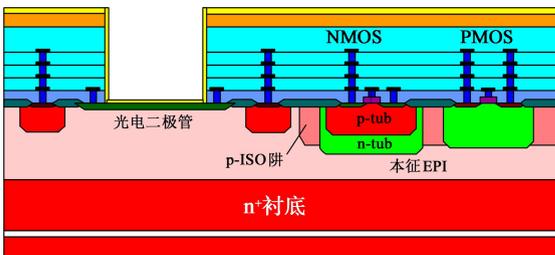


图 1 PIN 光电二极管和 CMOS 电路结构示意图

本工艺中 PIN 光电二极管由重掺杂的 p(p⁺)型区域(P 层)、轻掺杂的 p(p⁻)型外延层(I 层)以及重掺杂的 n(n⁺)型区域(N 层)组成。本征层(i 层)的存在，增加了耗尽区的宽度，提高了光电二极管的量子效率，这是 PIN 光电二极管灵敏度高于 pn 结光电二极管的根本原因。为了消除厚介质层引起的干涉峰，刻蚀掉光敏面上多层介质膜，代之以单层抗反射介质，达到在光谱平坦化(如图 2 所示)的同时

进一步提高光敏二极管量子效率的目的。

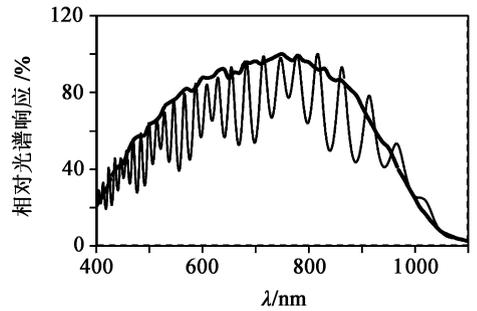


图 2 PIN 光敏二极管光谱特性曲线

光敏二极管的结电容 C_{pd} 由单位面积电容 C_J 和单位周长电容 C_{Jsw} 组成，为了简化分析，用式(1)表示：

$$C_{pd} = W \cdot J \cdot C_J + 2(W + L) \cdot C_{Jsw} \quad (1)$$

式中， W 和 L 分别为光电二极管横截面的宽度和长度。

表 1 为两种结构二极管在 0 偏压下的电容值对比表。由于 PIN 光敏二极管采用了高阻材料，其结电容比 pn 结光电二极管的小。

表 1 两种光敏二极管结电容对比

参数(@0 偏压)	PIN 型	pn 型
$C_J / (\text{pF}/\text{mm}^2)$	0.93	92
$C_{Jsw} / (\text{pF}/\text{mm})$	0.35	0.53

为了简化分析，选取光电二极管的横截面为正方形，即 $W = L$ 。根据式(1)和表 1 中的值，可以得出像素尺寸(L)和结电容(C_{pd})的关系曲线，如图 3 所示。

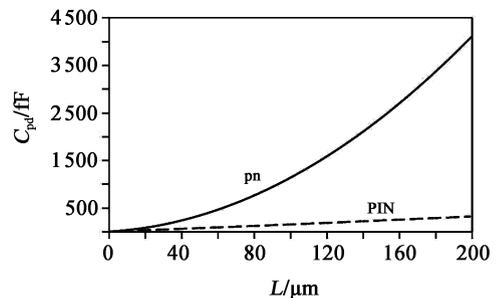


图 3 结电容与像素大小的关系

在相同面积、相同偏压下，pn 结电容明显大于 PIN 结电容，在大像素($L > 145 \mu\text{m}$)中，两者相差一个数量级；PIN 小像素($L < 200 \mu\text{m}$)光电二极管的结电容主要由周长电容决定，面积电容仅占总电容的 10%。pn 结电容主要由面积电容决定。

设二极管截面积为 $90 \mu\text{m} \times 90 \mu\text{m}$ ，计算得到，在 0.6 V 反偏条件下，PIN 结电容约为 95 fF，pn 结

电容约为 662 fF。

2 高增益像素电路设计

图 4 是基于单端四管共源共栅 (Cascode) 运算放大器的 CTIA 像元电路。光敏二极管等效电路包括三部分,其中 C_{pd} 为结电容, R_{pd} 为结阻抗, I 为光电流。采用三个电容的 T 型网络结构组成 5 fF 的积分电容 C_{int} ,可以降低小积分电容工艺误差带来的固定图像噪声 (Fixed-Pattern Noise, FPN)^[7]。为了抑制复位开关管的沟道电荷注入效应,在复位开关管旁增加串联补偿管可以减小误差。利用电容负反馈组成积分器,光敏二极管输出的光电流 I 经积分器积分后以电压 V_{out} 输出,由复位脉冲 $reset$ 控制 M_2 复位管,反向复位脉冲 $resetF$ 控制 M_1 补偿管。

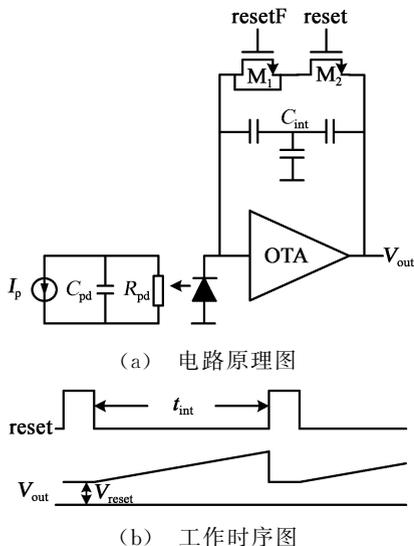


图 4 CTIA 像素电路原理图和时序图

像素工作原理:首先 $reset$ 为高电平,CTIA 像元电路复位,此时积分电容 C_{int} 两端电压相等,均为 V_{reset} 复位电压,接着 $reset$ 变为低电平,像元电路复位结束进入光电流积分,由于积分电容 C_{int} 左极板的电压受到运算放大器的控制不变, C_{int} 右极板上产生感应电荷并逐渐累积,电压 V_{out} 线性升高,直到积分过程结束。CTIA 放大器输出电压 V_{out} 由式 (2) 表示:

$$V_{out} = V_{reset} + \int_0^{t_{int}} I_p dt \left/ \left(C_{int} + \frac{C_{in} - C_{int}}{A} \right) \right. \quad (2)$$

其中, C_{int} 为积分电容, C_{in} 为探测器结电容和输入端寄生电容总和, V_{reset} 为光电二极管的偏置电压,也是四管 Cascode 中输入管的静态输入电压,约为

0.6 V,在积分过程中保持不变, t_{int} 为积分时间, A 为运放开环增益,若 $A > 70$ dB,则

$$V_{out} = V_{reset} + \frac{I}{C_{int}} \int_0^{t_{int}} I_p dt = V_{reset} + \frac{I_p t_{int}}{C_{int}} \quad (3)$$

由式 (3) 得出 CTIA 像元电路的注入效率高,其转换增益由积分电容 C_{int} 决定,积分电容小,则转换增益高。为了提高弱光下的信噪比,积分电容一般选择为几飞法,本电路的积分电容约 5 fF。

3 低噪声读出电路设计

3.1 读出电路噪声

信噪比是探测器的输出信号与噪声之比,降低噪声是实现高性能探测的重要途径。高帧频下,信号输出弱,对读出电路的噪声提出了更高的要求。读出电路噪声包括光敏二极管暗电流噪声、CTIA 复位 KTC 噪声、CTIA 放大器热噪声、采样电路噪声和输出级噪声,高帧频下探测器的噪声主要来源于复位管 KTC 噪声和 CTIA 放大器热噪声。

KTC 噪声是由复位管引入的噪声,复位管导通时等效为一个电阻,当复位管断开,电阻的热噪声将保存在电容上。图 5 为 CTIA 放大器小信号噪声模型^[8]。

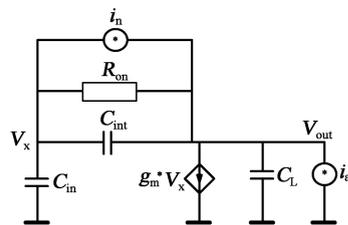


图 5 小信号噪声模型

总的 KTC 噪声由式 (4) 表示:

$$n_{KTC} = \frac{1}{q} \sqrt{kT \left(C_{int} + \frac{C_{in} C_L}{C_{in} + C_{int} + C_L} + \frac{2\alpha C_{in}^2}{C_{in} + C_{int} + C_L} \right)} \quad (4)$$

CTIA 放大器热噪声由式 (5) 表示:

$$n_{amp} = \frac{1}{q} \sqrt{2kT \cdot C_{int} (C_{int} + C_{in}) \cdot \frac{1}{C_L + \frac{C_{int} C_{in}}{C_{int} + C_{in}}}} \quad (5)$$

为了实现高性能探测器,三个电容的选择需综合考虑。当负载电容 C_L 为 1 pF,积分电容为 5 fF,对于 $90 \mu\text{m} \times 90 \mu\text{m}$ 的光电二极管,分别采用 PIN 结构和 pn 结构得到的像素电路噪声如表 2 所示。

表 2 中由复位引起的 KTC 噪声通过相关双采

样电路(CDS)可以抑制 90%左右,由于总噪声与放大器热噪声无相关性,经过 CDS 后续差分电路会增加 1.4 倍左右。探测器由光敏二极管和读出电路组成,如果不考虑探测器结电容,则读出电路噪声最低可降至 $10 e^-$ 以下。

表 2 两种光敏二极管像素电路噪声计算对比表

噪声源	PIN 结构	pn 结构
KTC 噪声/ e^-	190	364
CTIA 放大器热噪声/ e^-	14	33

3.2 相关双采样电路设计

高频 CMOS 图像传感器的特点是时间分辨率高、帧时短。由于探测器的信号电压和积分时间成正比,积分时间越长,信噪比越高,边读出边积分的工作模式将积分时间最大化,提高了信噪比。由于探测器工作帧时为 $25 \mu s$,为提高信噪比,读出电路必须工作于边读出边积分的工作模式。

图 6 为传统的相关双采样电路,如果工作于边积分边读出的工作模式,读出电路无法实现真正的相关双采样,不能有效抑制 KTC 噪声。要实现真正相关双采样功能,读出电路需要将积分和读出分开,在帧时为 $25 \mu s$ 的条件下,信号读出速率为 1 MHz,用于信号积分的时间只有 $5 \mu s$ 左右,尽管噪声得到有效抑制,但是信噪比反而下降。

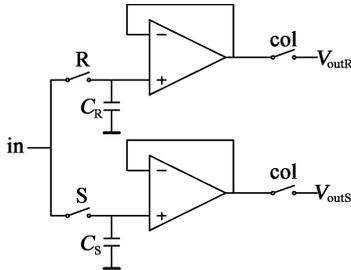
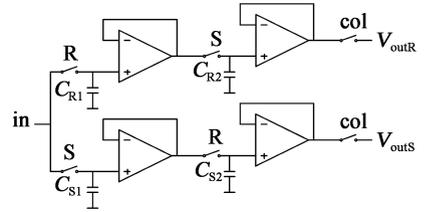


图 6 传统的相关双采样电路

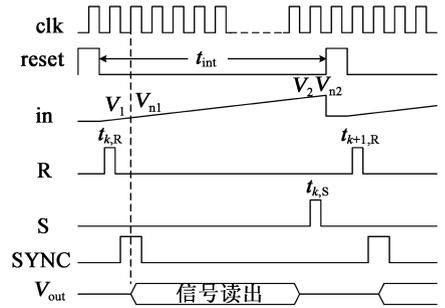
为了在边读出边积分模式下有效抑制 KTC 噪声,本文设计了一种新型的相关双采样电路,如图 7 所示。

在一帧时间内,KTC 噪声具有相关性,在 $t_{k,R}$ 时刻,R 为高电平, C_{R1} 上采样第 k 帧的电压(电压 V_1 和 KTC 噪声 V_{n1});经过一段积分时间 t_{int} 后,在 $t_{k,S}$ 时刻,S 为高电平, C_{S1} 上的电压包括电压 V_2 和 KTC 噪声电压 V_{n2} ,同时 C_{R2} 等量采样 C_{R1} 上的电压 V_1 和噪声电压 V_{n1} ;在 $t_{k+1,R}$ 时刻,R 为高电平, C_{R1} 上采样第 $k+1$ 帧的电压,同时 C_{S2} 等量采样 C_{S1} 上的电压 V_2 和 KTC 噪声电压 V_{n2} ,接着移位寄

存器起始脉冲有效, n 个线列信号顺序读出,此时 C_{R2} 和 C_{S2} 上的电压分别为复位电压($V_1 + V_{n1}$)和光信号电压($V_2 + V_{n2}$),由于 V_{n1} 和 V_{n2} 是一帧时间内的 KTC 噪声,具有较强的相关性,差分之后有效抑制率可达 90%以上。表 3 为两种不同结构的边读出边积分采样电路的噪声对比。



(a) 电路结构图



(b) 工作时序图

图 7 新型 CDS 电路结构和工作时序图

表 3 两种 CDS 电路结构的噪声对比

CDS 电路结构	噪声电子数/ e^-
新型	28
传统	269

4 探测器测试结果与分析

本文的双通道 16 元线列 CMOS 图像传感器采用 $0.35 \mu m$ PIN-CMOS 工艺流片,光电二极管采用 PIN 结构,像元尺寸为 $90 \mu m \times 90 \mu m$,填充因子为 92.7%。图 8 为芯片封装图。芯片封装于 DIP28 管壳内,对芯片进行了相关性能测试,测试结果如表 4 所示。

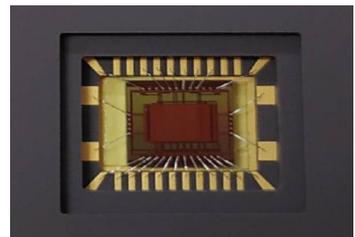


图 8 CMOS 图像传感器芯片图

表4 探测器性能测试结果

参数	测量值
像素大小/ μm^2	90×90
全阱电荷/ ke^-	44
η_{peak}	96% (@700 nm)
帧速/kHz	40
电压/V	3.3
灵敏度/ $[\text{V}/(\text{lx} \cdot \text{s})]$	3 000
随机噪声	30 e^-

探测器的光谱响应测试结果如图9所示,从图中可以看出,探测器的峰值量子效率 η_{peak} 为96%,500~900 nm波长范围内的平均量子效率为79%。探测器在可见光波段的量子效率明显高于传统工艺制作的探测器(量子效率通常只有60%)。

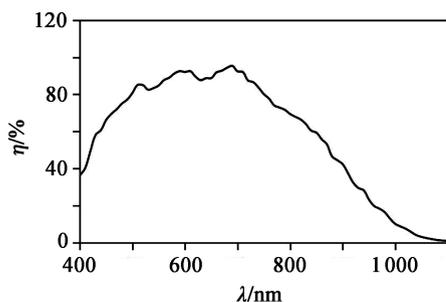


图9 光谱响应曲线

5 结论

基于CTIA像素电路,采用PIN-CMOS工艺和新型相关双采样电路,完成了双通道 2×16 线列CMOS图像传感器流片。测试结果表明:1)由于采用了PIN光电二极管和新型相关双采样电路,探测器信噪比优于pn型光电二极管结构,实现了高帧频高灵敏度的性能;2)新型相关双采样电路工作于边读出边积分模式,能够有效抑制KTC噪声,提高信噪比;3)PIN型光电二极管具有结电容小、灵敏度高的优点,同时暗电流比pn型光电二极管高2个数量级,适合高帧频下相对小的光敏元($L < 100 \mu\text{m}$),此时由暗电流引起的噪声和信号均可以忽略。该电路的研制为高性能CMOS图像传感器的研制提供了一条新的技术途径。

参考文献:

- [1] 倪景华, 黄其煜. CMOS图像传感器及其发展趋势[J]. 光机电信息, 2008, 25(5): 33-38.
Ni Jinghua, Huang Qiyu. CMOS image sensor and its development trend[J]. OME Information, 2008, 25(5): 33-38.
- [2] 杨敏. 低照度CMOS图像传感器技术研究[J]. 山东工业技术, 2017(13): 279.
Yang Min. Research on low illumination CMOS image sensor technology[J]. Shandong Industrial Technol., 2017(13): 279.
- [3] 李金洪, 邹梅. 低照度CMOS图像传感器设计与实现[J]. 红外激光工程, 2018, 47(7): 1-7.
Li Jinhong, Zou Mei. Design and realization of low-light-level CMOS image sensor[J]. Infrared and Laser Engin., 2018, 47(7): 1-7.
- [4] 黄张成, 黄松奎, 张伟, 等. 边积分边读出低噪声红外焦平面读出电路研究[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(4): 297-300, 304.
Huang Zhangcheng, Huang Songlei, Zhang Wei, et al. Low noise readout circuit for infrared focal plane array in integration while read[J]. J. Infrared Millim. Waves, 2011, 30(4): 297-300, 304.
- [5] 杨成财, 鞠国豪, 陈永平. 基于HV-CMOS工艺集成PIN光敏元的CMOS传感器设计[J]. 半导体光电, 2019, 40(3): 333-337, 363.
Yang Chengcai, Ju Guohao, Chen Yongping. Design of CMOS sensor integrated with PIN photodiodes by HV-CMOS process [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(3): 333-337, 363.
- [6] 杨成财, 鞠国豪, 陈永平. 集成PIN光敏元的CMOS探测器光电响应特性研究[J]. 中国光学, 2019, 12(5): 1076-1089.
Yang Chengcai, Ju Guohao, Chen Yongping. Study on the photo response of a CMOS sensor integrated with PIN photodiodes[J]. Chinese Optics, 2019, 12(5): 1076-1089.
- [7] Fowler B A, Balicki J, How D, et al. Low-FPN high-gain capacitive transimpedance amplifier for low-noise CMOS image sensors[J]. Proc. SPIE, 2001, 4306: 68-77.
- [8] Blerkom D A Van. Analysis and simulation of CTIA-based pixel reset noise[J]. Proc. SPIE, 2011, 8012: 80120G-1.

作者简介:

陈世军(1967—),女,硕士,正高级工程师,主要从事CMOS图像传感器电路设计和测试分析技术研究。

三维成像用 128×2 线性模式 APD 焦平面探测器设计

邓光平*, 马华平, 鹿婷婷, 黄建, 王颖

(重庆光电技术研究所, 重庆 400060)

摘要: 设计了一种用于激光三维成像的 128×2 线性模式 APD 焦平面探测器, 器件包括硅基 APD 焦平面阵列和读出电路。硅基 APD 焦平面阵列采用拉通型 $n^+ - p - \pi - p^+$ 结构, 像元中心距为 $150 \mu\text{m}$, 工作在线性倍增模式。读出电路采用单片集成技术, 将前置放大电路、TDC 计时电路和 ADC 等功能模块集成在单一硅片上。整个线性模式 APD 焦平面探测器可实现 128×2 阵列规模的激光信号并行检测, 并采用 LVDS 串口输出激光脉冲信号的飞行时间信息和峰值强度信息。测试结果显示, 该线性模式 APD 三维成像探测器可同时获取时间信息和强度信息, 成像功能正常。

关键词: 雪崩光电二极管; 读出电路; 焦平面阵列; 三维成像; 激光雷达

中图分类号: TN312.7 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0784-04

A Design of 128×2 Linear Mode APD Detector for 3D Imaging

DENG Guangping, MA Huaping, LU Tingting, HUANG Jian, WANG Ying

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: A kind of 128×2 linear mode APD focal plane detector used for 3D imaging is designed, including Si-based APD focal plane array (FPA) and read-out circuit. The APD FPA with the structure of punch through $n^+ - p - \pi - p^+$ works at the linear multiply mode, and the pixel pitch is $150 \mu\text{m}$. The readout integrated circuit (ROIC) integrates the pre-amplifier, TDC, ADC and other function circuits on a single chip. The linear mode APD detector can simultaneously detect the laser pulse of 128×2 imaging array, then output the flight time and the amplitude of the laser pulse by using the LVDS driver. The test results show that the linear 3D imaging detector can obtain necessary information properly, verifying its effectiveness in imaging.

Key words: avalanche photodiode; ROIC; focal plane array; 3D imaging; LIDAR

0 引言

激光成像雷达作为一种主动成像装置, 具有测量精度高、探测距离远、抗干扰能力强以及系统易小型化等优点, 在地形测绘、无人车辆自动驾驶、智能机器人等领域得到了广泛应用。激光成像雷达需要解决目标三维空间信息的采集、处理与分析等问题, 涉及激光发射、激光探测、成像数据处理等关键技术^[1]。目前, 严重制约国内激光三维成像发展的关键因素是雪崩光电二极管 (Avalanche Photodiode,

APD) 阵列探测技术的不成熟。

APD 是一种半导体光探测器, 其利用高反向偏压下的电离碰撞效应, 可获得系统内部电流增益。APD 探测器的工作模式分为线性模式和盖革模式。当反向偏压低于雪崩击穿电压时, APD 探测器对光生载流子进行线性倍增, 反向偏压越大, 倍增倍数越大, 上述工作状态被称为线性模式^[2]; 当反向偏压高于雪崩击穿电压时, APD 探测器对光生载流子的倍增倍数急剧增大, 以至少数几个光生载流子便可倍增输出饱和电流, 上述工作状态被称为盖革模式^[3]。

盖革模式 APD 探测器具有单光子探测能力, 在远距离、弱信号探测领域应用价值较大, 但是其高

收稿日期: 2020-08-19.

* 通信作者: 邓光平 E-mail: bardeen_deng@163.com

的背景噪声和暗计数噪声会使得探测系统出现较高的虚警率^[4-5]。此外,根据光子的测不准关系,通过光子计数得到的光子数与实际到达探测器表面的光子数是不同的,因此盖革模式只能探测信号有无,不能反映信号的强度信息^[6]。线性模式APD探测器的信号倍增能力低于盖革模式APD探测器,但是其线性倍增关系使得系统既能够判断信号有无,又能够获取信号的强度信息^[7]。因此,时间信息与强度信息的同时获取能力使得线性模式APD探测器更加适用于不同环境下对自动目标的识别与跟踪,成为三维激光成像雷达的首选^[8-9]。

1 线性模式APD三维成像探测系统

线性模式APD三维成像探测系统主要由905 nm激光器、发射光学系统,扫描摆镜、接收光学系统、信号读出处理电路、控制及数据处理系统等构成,如图1所示。其三维扫描成像原理如下:集成的线列905 nm激光器发出的激光经过扩束系统后,照射到扫描摆镜上,扫描摆镜按一定规律旋转,再经扫描摆镜照射在目标物体上形成激光光斑,同时激光器发出的激光同步信号触发读出处理电路开始计时,线列激光光斑照射物体后经漫反射返回接收光学系统,照射到128×2 APD探测像元,产生光激发,经过信号放大、时刻鉴别、峰值保持等处理后产生时间信息和强度信息,获取的数据最后通过LVDS接口送给FPGA进行后期图像数据处理。

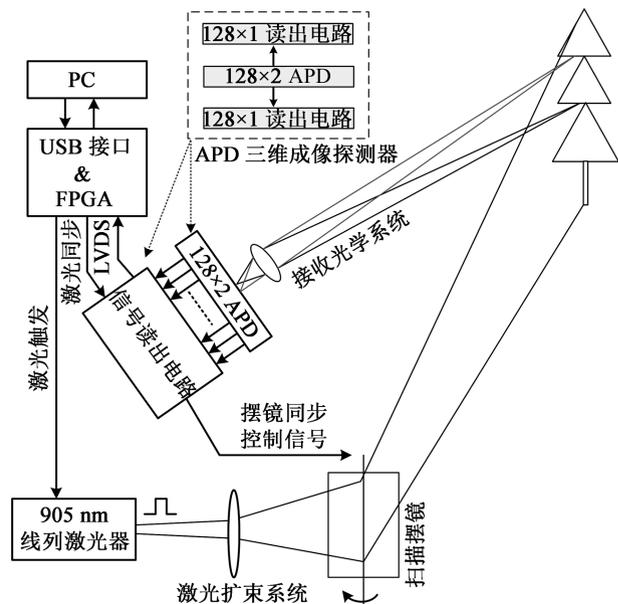
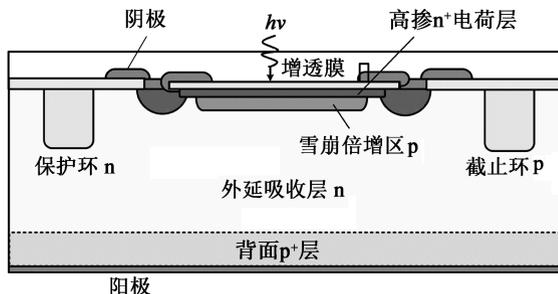


图1 线性模式APD三维成像探测系统示意图

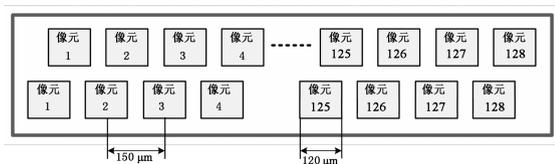
硅基APD焦平面阵列输出的电流信号采用双边同时读出方式,即单边读出电路的规模为128×1,这样读出电路只在列方向有尺寸限制,每个像元级读出电路能够同时完成时间和强度信息采集。APD焦平面阵列芯片与读出电路芯片均粘接在基板上,并采用引线互连,整体构成了三维成像用128×2线性模式APD焦平面探测器。

2 硅基APD焦平面阵列设计

硅基APD焦平面的探测单元采用拉通型n⁺-p-π-p⁺结构,其器件结构如图2(a)所示,主要由光敏区(高掺杂n⁺层)、雪崩倍增区(p)、吸收层(π)、阳极接触层(p⁺)、击穿保护环(n)、截止环(p)、增透膜等组成,相较于普通的pn型APD,该结构具有击穿电压相对较小的优点。



(a) 探测单元结构



(b) 单元排布示意图

图2 APD焦平面阵列芯片的探测单元结构和单元排布示意图

探测阵列采用p型高阻外延片制备。光敏区为高掺杂的n⁺层,采用离子注入的方式形成,主要为APD提供高内建电场。雪崩区为p层,通过高能离子注入的方式形成,主要为APD提供雪崩倍增效应。本征吸收层π区为低掺杂的高阻外延层,APD工作时完全耗尽,主要起吸收光子作用。阳极接触层为高浓度p⁺衬底层,主要起减小阳极接触电阻的作用。保护环为具有特殊杂质分布的n型层,采用多次注入结合退火调控杂质分布的方式形成,其主要起防止器件边缘击穿的作用。截止环采用多次注入p型杂质结合退火调控杂质分布的方式形成,起到抑制像元串扰的作用。增透膜采用SiO₂/Si₃N₄

复合介质,主要起减小入射光反射,提高器件量子效率的作用。

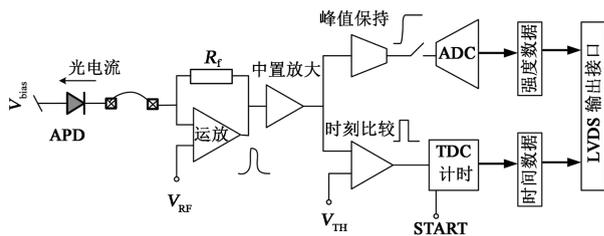
硅基 APD 焦平面阵列采用正照工作模式,单元排布采取交错排布方式,具体排布如图 2(b)所示。像元交错排布使 128×2 焦平面在实际使用中能够近似等效为 256 线,可有效提高线列 APD 焦平面传感器的空间分辨率。其中,APD 单元光敏面尺寸为 $120 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$,像元中心距为 $150 \mu\text{m}$ 。

3 单芯片读出电路设计

线性模式 APD 焦平面探测器的读出电路采用的是全并行处理架构,由 128 列宽带低噪声跨阻放大、峰值保持与时刻鉴别电路、128 列并行 ADC 电路、128 列并行时间数字转换电路(TDC)组成,如图 3(a)所示。外围电路采用多通道复用技术,电路模块为阵列共享,主要由基准电路、高速 LVDS 输出接口、数字时序控制电路、片上集成稳压器和锁相环电路等模块构成。

电压产生电路、基准电压、偏置	1	2	3	模拟前端电路 (前置放大、峰值保持、时刻鉴别)			126	127	128	数字时序控制电路	片上集成稳压器 锁相环
	1	2	3	列级并行 ADC 电路			126	127	128		
	1	2	3	列级并行 TDC 计时电路			126	127	128		
LVDS 输出接口											

(a) 单芯片读出电路的芯片架构



(b) 单通道电路的结构原理图

图 3 单芯片读出电路的芯片架构和单通道电路的结构原理图

每个通道的电路结构如图 3(b)所示。反馈电阻 R_f 与运放构成了前端跨阻放大器,将脉冲电流信号转换为脉冲电压信号;中置放大器对前端跨阻放大器的模拟输出信号进行再放大,一方面满足实际应用中高增益的要求,另一方面增加信号驱动能力;时刻鉴别电路对放大后的脉冲信号进行检测,判定信号的起止时刻,然后将鉴别信号送入计时电路;当起始信号 START 到来时,TDC 计时电路开始计

时,接收到时刻鉴别电路输出的停止信号后,计时结束;峰值保持电路用于获取脉冲峰值,保存的峰值信号被送入 ADC 电路转换为数字信号。经过 TDC 和 ADC 电路转换后的时间信息和强度信息采用 LVDS 的数据模式输出到芯片外。

在高行帧频使用条件下,数据转换与输出将采用卷帘方式,例如:在第 1 帧进行探测时,进行第 1 帧的 TDC 和 A/D 转换,输出数据无效;在第 2 帧进行探测时,TDC 和 A/D 转换,输出第 1 帧的时间和灰度数据;在第 3 帧进行探测时,TDC 和 A/D 转换,输出第 2 帧的时间和灰度数据。在低行帧频使用条件下,读出电路可在同一帧时间内完成探测、TDC 转换、ADC 转换以及数据输出。

4 样品测试及分析

线性模式 APD 焦平面探测器的探测阵列采用 $0.5 \mu\text{m}$ 硅基光电探测器工艺进行设计和制作,而单芯片读出电路采用的是 $0.11 \mu\text{m}$ CMOS 集成电路工艺。一个线性模式 APD 焦平面探测器包含一个硅基 APD 焦平面阵列和两个读出电路,如图 4 所示;读出电路放置在 APD 焦平面阵列的两侧,两者采用金丝进行互连,整个三维成像探测器采用 PCB 管壳进行封装。

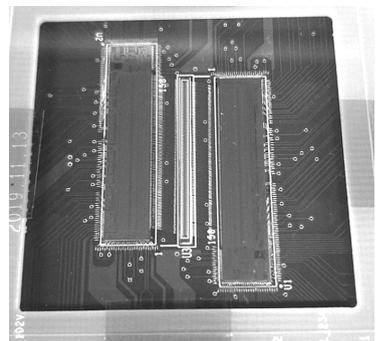


图 4 128×2 线性模式 APD 焦平面探测器实物照片

为了准确地对硅基 APD 探测单元及信号处理电路进行性能评价,需要采用激光发射与对准测试系统。该系统能将光纤入射的激光聚焦到不大于 $30 \mu\text{m}$ 的直径内,且能通过图像识别系统直观显示聚焦后的激光光斑的位置,使得发射的激光脉冲能够精准地落到每个 APD 探测单元的光敏面,此外,步进控制程序使得激光在测试完一个 APD 探测单元后自动位移到下一个 APD 探测单元。测试用激光的波长为 905 nm ,发射频率与芯片的行帧频保持一致,为 200 kHz 。由于数据传输速率高、传输数据

量大,采用了抗干扰能力强的差分传输模式,并采用工业级 Cameralink 接口进行数据采集,系统数据传输能力最高可达 5 G/s。

读出电路输出的强度信息为 12 位,时间信息为 16 位,200 kHz 行帧频条件下的最大时间量程为 $2.8\ \mu\text{s}$,通过内部寄存器配置,在低行帧频条件下的最大时间量程可达到 $16\ \mu\text{s}$ 。硅基 APD 焦平面探测阵列的偏压为 $-100\ \text{V}$,此时灵敏度为 $50\ \text{A/W}@905\ \text{nm}$ 。测试结果显示,线性模式 APD 三维成像探测器的非均匀性为 7%,串扰为 0.15%,强度噪声为 15.8 DN,时间分辨率为 0.25 ns。图 5 为单点激光照射到 APD 阵列光敏面的成像图,图中左边部分为强度信息输出(横向为 128×2 列 APD 探测单元输出,纵向为连续采集 512 帧),白色亮条为被激光照射到的探测单元的输出信号,其他未被照射到的单元的输出数值为本底噪声,图像灰度信息显示为暗黑色。图中右边部分为时间信息输出(横向为 128×2 列 APD 探测单元输出,纵向为连续采集 512 帧),灰色线条为被照射到的单元的输出数值为 65535,图像距离信息显示为白色,表示没有在最大时间量程内探测到回波。



图 5 单点激光照射到 APD 阵列光敏面的成像图

5 结论

设计了一种 128×2 线性模式 APD 焦平面探测器,器件包含硅基 APD 焦平面阵列和读出电路。APD 焦平面阵列采用两行同时读出模式,可实现 128×2 阵列规模的激光信号并行检测。APD 探测单元工作在线性模式,具有良好的线性倍增能力。读出电路的阵列规模为 128×1 ,采用单片集成模式,

极大地降低了系统的设计复杂度和外形尺寸。测试结果显示,线性模式 APD 焦平面探测器的最大行帧频可达 200 kHz,最小时间分辨率可达 0.25 ns,可同时获取激光回波的飞行时间信息和峰值强度信息。该线性模式 APD 焦平面探测器的非均匀性为 7%,串扰为 0.15%,可确保良好的三维成像效果。

参考文献:

- [1] 于 森. 激光扫描成像系统研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2014: 1-15.
Yu Miao. Research on scanning imaging lidar system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014: 1-15.
- [2] Borniol E D, Rothman J, Guellec F, et al. Active three-dimensional and thermal imaging with a $30\text{-}\mu\text{m}$ pitch 320×256 HgCdTe avalanche photodiode focal plane array[J]. Opt. Engin., 2012, 51(6): 1-7.
- [3] Zappa F, Tisa S, Tosi A, et al. Principles and features of single-photon avalanche diode arrays[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2007, 140(1): 103-112.
- [4] Katz A, Shoham A, Vainstein C, et al. Passive CMOS single photon avalanche diode imager for a Gun Muzzle flash detection system[J]. IEEE Sensors J., 2019(14): 1-1.
- [5] Kolb K E, Figer D F, Lee J, et al. Radiation tolerance of a Geiger-mode avalanche photodiode imaging array[J]. J. of Astronomical Telescopes Instruments & Systems, 2016, 2(3): 036001.
- [6] Brian A. Geiger-mode avalanche photodiode arrays integrated to all-digital CMOS circuits[J]. Sensors, 2016, 16(4): 495.
- [7] Beck J D, Scritchfield R, Mitra P, et al. Linear mode photon counting with the noiseless gain HgCdTe e-avalanche photodiode[J]. Opt. Engin., 2014, 53(8): 1-10.
- [8] Mcmanamon P F, Banks P, Beck J, et al. Comparison of flash lidar detector options[J]. Opt. Engin., 2017, 56(3): 1-23.
- [9] 李 骏,王健安,赖 凡. 毫米波片上雷达技术研究进展[J]. 微电子学, 2019, 49(4): 545-550.
Li Jun, Wang Jianan, Lai Fan. Research status of millimeter wave on-board radar technology[J]. Microelectronics, 2019, 49(4): 545-550.

作者简介:

邓光平(1985—),男,2011年毕业于电子科技大学微电子技术专业,获硕士学位,高级工程师,主要从事光探测与成像读出电路设计。

谐振式光纤陀螺的信噪比研究

韩松延*, 胡宗福

(同济大学 电子与信息工程学院 信息与通信工程系, 上海 201804)

摘要: 谐振式光纤陀螺(Resonator Fiber Optic Gyroscope, RFOG)的核心敏感部件是光纤环形谐振腔(Fiber Ring Resonator, FRR), FRR在不同的束缚方式下表现为反射式与透射式两种结构, 文章建立了两种结构的分析模型, 推导出最佳工作状态下 FRR 的输出特性表达式。对于影响 RFOG 的主要噪声: 背向散射噪声, 通过建立两种相位调制 RFOG 结构, 推导了两种不同结构 FRR 构成的 RFOG 在相位调制下的信号与背向散射噪声输出特性。分析了两种结构下谐振曲线最大斜率处的信号与背向散射噪声的信噪比表达式, 最终证明两种结构的信噪比表达式相同, 且与 FRR 的腔长负相关。

关键词: 谐振式光纤陀螺; 光纤环形谐振腔; 反射式; 透射式; 背向散射噪声; 信噪比
中图分类号: TN253; TP212 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0788-06

Research on Signal to Noise Ratio of Resonant Fiber Optic Gyro

HAN Songyan, HU Zongfu

(Department of Information and Communication Engineering, School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, CHN)

Abstract: The core sensitive component of resonator fiber optic gyroscope (RFOG) is the fiber ring resonator (FRR), and it shows reflective or transmissive structure under different restraint modes. In this paper, the analysis models for the two structures are established, and the expression of FRR output characteristics under the best working conditions is derived. For the backscattered noise, which is the main noise affecting RFOG, the output characteristics of signal and backscattered noise of the RFOG being composed of two different structures of FRR under phase modulation are derived by establishing two phase modulation RFOG structures. Analyzed is the expression of the signal-to-noise ratio(SNR) between the signal at the maximum slope of the resonance curve and the backscattered noise under the two structures, and it turns out that both SNR expressions for the two structures are the same, and it is negatively related to the cavity length of FRR.

Key words: resonant fiber optic gyroscope; fiber ring resonator; reflective; transmissive; backscattered noise; signal to noise ratio

0 引言

谐振式光纤陀螺(RFOG)是基于光学 Sagnac 效应的高精度惯性传感器件^[1-2], 其核心敏感器件为光纤环形谐振腔(FRR)。相较于干涉式光纤陀螺

(IFOG), RFOG 可以在更小尺寸下实现与 IFOG 相同的灵敏度^[3], 由温度与应力分布不均导致的非互易性误差也会大大降低。RFOG 的发展符合光纤陀螺往更高精度、更小体积发展的趋势^[4], 是目前光纤陀螺研究的热门方向, 获得了世界各国研究机构与高校的关注^[5]。

FRR 作为 RFOG 的核心器件, 其性能直接决

收稿日期: 2020-10-20.

* 通信作者: 韩松延 E-mail: 1832907@tongji.edu.cn

定了陀螺系统的最终精度^[6]。FRR在不同的束缚方式下表现为反射式与透射式两种结构。文献[7]研究了基于探测器散粒噪声的两种结构的信噪比,证明了光子带隙光纤谐振腔在反射式结构下的信噪比更高。而对于RFOG而言,背向散射噪声是陀螺系统中主要的噪声之一^[8],背向散射光的干扰分为两类,一类为背向散射光的强度项,另一类则为背向散射光与信号光之间的干涉项。前者通过不同的调制频率克服^[9],后者则通常采用载波抑制的方法进行抑制。对背向散射噪声的研究与抑制一直是RFOG研究的热点。文献[10]利用谐振腔内单点反射的简化处理,推导出谐振腔背向散射输出谱线的表达式。文献[11]提出高频调制频率抑制背向散射噪声,陀螺系统的零偏稳定性达到了 $0.02(^{\circ})/h$ 。基于以上情况,本文首先建立了反射式与透射式FRR结构,推导出FRR的输出特性表达式。而后,以此为前置条件,着重分析这两种不同结构的FRR所构成的RFOG在相位调制下的输出特性,探究两种结构的信号光功率关于背向散射噪声的信噪比。

1 谐振腔特性

光纤环形谐振腔(FRR)在不同的束缚方式下表现为反射式与透射式两种结构,两者的区别在于光纤耦合器耦合的区域不同,反射式FRR只含有一个光纤耦合器,由一根波导与环形谐振腔构成,而透射式FRR则包含两个光纤耦合器,由两根波导与环形谐振腔构成。

1.1 反射式 FRR

图1给出了反射式FRR结构示意图,光从耦合器DC的端口1输入,一部分光直通耦合输出到端口2,另一部分光交叉耦合进入端口4并通过FRR传输至端口3,该部分光的一部分交叉耦合输出至端口2,另一部分光重新进入端口4,形成闭合光路。端口2输出的光相干叠加形成输出光场。

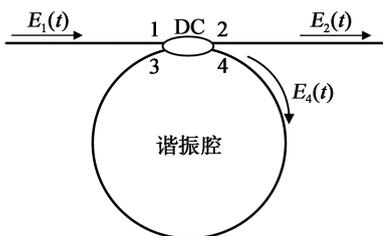


图1 反射式 FRR 结构示意图

设端口1的输入光场表示为

$$E_1(t) = E_0 \cdot e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)} \quad (1)$$

其中, E_0 、 ω_0 和 φ_0 分别为初始光场的幅度、角频率和初始相位。利用多次干涉叠加法,端口2和端口4的输出表达式分别为

$$E_2(t) = E_0 e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)} \sqrt{\alpha_c(1-K_c)} + E_0 e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)} \alpha_c K_c e^{-j\omega_0 \tau + j\pi} \cdot \{1 + \sqrt{\alpha_c \Delta(1-K_c)} e^{-j\omega_0 \tau} + (\sqrt{\alpha_c \Delta(1-K_c)})^2 e^{-j2\omega_0 \tau} + \dots\} = E_0 e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)} \sqrt{\alpha_c(1-K_c)} + \frac{E_0 e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)} \cdot \sqrt{\Delta} \alpha_c K_c e^{-j\omega_0 \tau + j\pi}}{1 - \sqrt{\alpha_c \Delta(1-K_c)} e^{-j\omega_0 \tau}} = E_0 e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)} \left[\sqrt{\alpha_c(1-K_c)} - \frac{\sqrt{\Delta} \alpha_c K_c e^{-j\omega_0 \tau}}{1 - \sqrt{\alpha_c \Delta(1-K_c)} e^{-j\omega_0 \tau}} \right] \quad (2)$$

$$E_4(t) = E_0 \sqrt{\alpha_c K_c} e^{j(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2})} \{1 + \sqrt{\alpha_c \Delta(1-K_c)} e^{-j\omega_0 \tau} + (\sqrt{\alpha_c \Delta(1-K_c)})^2 e^{-j2\omega_0 \tau} + \dots\} = \frac{jE_0 \sqrt{\alpha_c K_c} e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)}}{1 - \sqrt{\alpha_c \Delta(1-K_c)} e^{-j\omega_0 \tau}} \quad (3)$$

其中, K_c 为耦合器的耦合系数, α_c 为1减去耦合器的插入损耗值, Δ 为1减去腔内损耗值, τ 表示光在环形腔内传输一周所需的渡越时间, $\tau = Ln_1/c$, L 表示环形谐振腔的总长度, n_1 为光波导的折射率, c 为真空中的光速。

1.2 透射式 FRR

图2给出了透射式FRR结构示意图,光从DC1的端口1输入,通过DC1的端口4耦合进入FRR,光一直在FRR内绕行传输,每一次绕行都会从DC2的端口1耦合输出。这些光相干叠加形成输出光场。设两耦合器参数一致且所有参数与1.1节的一致。

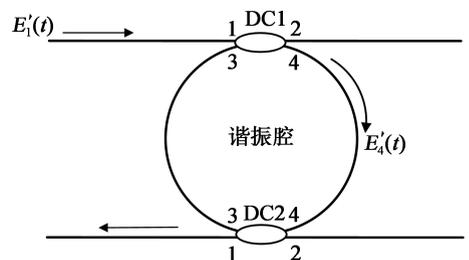


图2 透射式 FRR 结构示意图

令 $E'_1(t) = E_1(t) = E_0 \cdot e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)}$,则

$$E'_4(t) = E_0 \sqrt{\alpha_c K_c} e^{j(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2})} \{1 + \sqrt{\Delta} \alpha_c(1-K_c) \cdot e^{-j\omega_0 \tau} + (\sqrt{\Delta} \alpha_c(1-K_c))^2 e^{-j2\omega_0 \tau} + \dots\} = \frac{jE_0 \sqrt{\alpha_c K_c} e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)}}{1 - \sqrt{\Delta} \alpha_c(1-K_c) e^{-j\omega_0 \tau}} \quad (4)$$

对上述两种结构,忽略入射光场的初始相位

φ_0 , 并假设 $K_c = 1 - \alpha_c \Delta$, 则当 $\omega_0 \tau = 2\pi N, N = 1, 2, 3, \dots$ 时, 有

$$\begin{cases} E_2(t) = 0 \\ E_4(t) = jE_0 \sqrt{\frac{\alpha_c}{K_c}} e^{j\omega_0 t} \\ E'_4(t) = \frac{jE_0 \sqrt{\alpha_c K_c} e^{j\omega_0 t}}{1 - \sqrt{\Delta} \alpha_c (1 - K_c)} \end{cases} \quad (5)$$

也即理论上讲, 不考虑各种噪声与误差的影响, 当 FRR 在最佳工作状态下, 且光源的中心频率与 FRR 的谐振频率相等时, 光会完全被局限在 FRR 内而不会输出到腔外。 $E_4(t)$ 与 $E'_4(t)$ 则是随时间变化的复函数。

2 两种结构 RFOG 的信噪比

2.1 反射式 FRR 构成的 RFOG

首先推导反射式束缚结构 FRR 所构成的相位调制 RFOG 的信噪比。图 3 给出了一种典型的数字三角波相位调制 RFOG 的示意图, 激光器射出的光束被 Y 波导分为两束光分别进入相位调制器 PM1 和 PM2, 两者由不同频率的数字三角波驱动, 频率分别为 p 和 q , 两者均为随时间在幅值 1 和 -1 之间周期变化的函数。通过 PM1 和 PM2 后, 三角波上升和下降半周期所对应的光源频率偏移分别为 $f_1, -f_1$ 和 $f_2, -f_2$ 。忽略两个相位调制器的残余载波强度。之后两路光波通过耦合器 C3 分别沿顺时针和逆时针方向进入 FRR, 最终离开 FRR 后分别通过光纤环形器 C1 与 C2 输出到光电探测器 D1 与 D2, 其中 D1 输出的信号经过同步解调后作为陀螺信号输出, 而 D2 输出的信号经过同步解调后作为跟踪谐振点的依据, 通过反馈回路 FBC 将反馈信号加在 PZT 压电陶瓷上, 进而通过调节 FRR 的腔长实现谐振频率点的锁定。

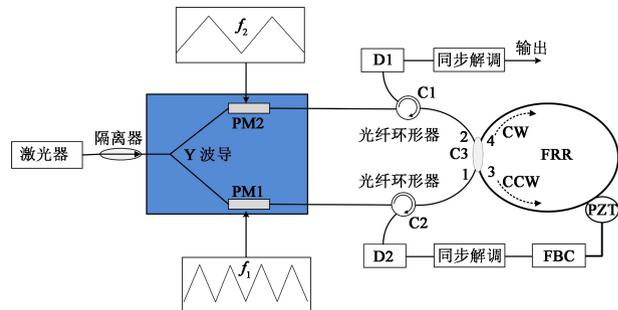


图 3 反射式 FRR 构成调相 RFOG 示意图

为探究关于背向散射噪声的信噪比, 分析到达

D1 的信号量, 包括经 PM1 调制的 CW 方向的信号项 $E_{cw}(f_0 + pf_1)$ 与载波项 $\sqrt{s}E_{cw}(f_0)$, 以及经 PM2 调制的 CCW 方向的信号光的背向散射项 $\sqrt{\alpha}E_{ccw}(f_0 + qf_2)$ 与载波的背向散射项 $\sqrt{\alpha s}E_{ccw}(f_0)$ 。则 D1 处信号光强的表达式为

$$I_{D1} = |E_{cw}(f_0 + pf_1) + \sqrt{s}E_{cw}(f_0) + \sqrt{\alpha}[E_{ccw}(f_0 + qf_2) + \sqrt{s}E_{ccw}(f_0)]|^2 \quad (6)$$

其中, s 为载波抑制比, 其值远小于 1, α 为 FRR 的背向散射系数, 它与光纤长度和光波导的数值孔径成正比^[12]。其中,

$$E_{cw}(f_0 + pf_1) = E_2(f_0 + pf_1) = E_0 e^{j2\pi(f_0 + pf_1)t} \cdot \left[\sqrt{\alpha_c(1 - K_c)} - \frac{\sqrt{\alpha_c^2 K_c^2 \Delta} e^{-j2\pi(f_0 + pf_1)\tau}}{1 - \sqrt{\alpha_c \Delta}(1 - K_c) e^{-j2\pi(f_0 + pf_1)\tau}} \right] \quad (7)$$

$$\sqrt{s}E_{cw}(f_0) = \sqrt{s}E_2(f_0) = 0 \quad (8)$$

$$\sqrt{\alpha}E_{ccw}(f_0 + qf_2) = \sqrt{\alpha}E_4(f_0 + qf_2) \sqrt{K_c} E^R e^{j\varphi_1(t)} = \frac{E_0 \sqrt{\alpha_c \alpha} K_c E^R}{1 - \sqrt{\alpha_c \Delta}(1 - K_c) e^{-j2\pi(f_0 + qf_2)\tau}} \cdot e^{j2\pi(f_0 + qf_2)t + j\varphi_1(t) + \frac{\pi}{2}} \quad (9)$$

$$\sqrt{\alpha s}E_{ccw}(f_0) = \sqrt{\alpha s}E_4(f_0) \sqrt{K_c} E^R e^{j\varphi_2(t)} = \frac{E_0 \sqrt{\alpha_c \alpha s} K_c E^R}{1 - \sqrt{\alpha_c \Delta}(1 - K_c) e^{-j2\pi f_0 \tau}} e^{j2\pi f_0 t + j\varphi_2(t) + \frac{\pi}{2}} \quad (10)$$

CCW 的背向散射光不受 CW 方向光的影响, 可视作瑞利散射, E^R 为其幅值, 服从瑞利分布, $\varphi(t)$ 为其相位, 服从均匀分布。

从 D1 输出的信号进入同步解调阶段, CW 方向的信号光项、CCW 方向的背向散射项以及两者乘积的所有拍频项都会被滤波器滤除, 故陀螺的最终输出功率表达式为

$$P_{out} = |E_2(f_0 + pf_1)|^2 + K_c \alpha |E_4(f_0 + qf_2)|^2 |E^R e^{j\varphi_1(t)}|^2 + K_c \alpha s |E_4(f_0)|^2 |E^R e^{j\varphi_2(t)}|^2 \quad (11)$$

式中, 第一项为陀螺输出的 CW 方向信号项, 第二项为 CCW 方向信号光的背向散射项, 第三项则为 CCW 方向载波的背向散射噪声。

陀螺输出的 CW 方向信号项平均功率为

$$P_s = |E_2(f_0 + pf_1)|^2 = E_0^2 \left| \left[\sqrt{\alpha_c(1 - K_c)} - \frac{\sqrt{\alpha_c^2 K_c^2 \Delta} e^{-j2\pi(f_0 + pf_1)\tau}}{1 - \sqrt{\alpha_c \Delta}(1 - K_c) e^{-j2\pi(f_0 + pf_1)\tau}} \right] \right|^2 =$$

$$\alpha_c(1-K_c)E_0^2 \left| \frac{1 - e^{-j2\pi(f_0+pf_1)\tau}}{1 - (1-K_c)e^{-j2\pi(f_0+pf_1)\tau}} \right|^2 = \frac{4\alpha_c(1-K_c)E_0^2 \sin^2[\pi(f_0+pf_1)\tau]}{K_c^2 + 4(1-K_c)\sin^2[\pi(f_0+pf_1)\tau]} = \frac{\alpha_c E_0^2}{2} \quad (12)$$

式中, $\sin^2[\pi(f_0+pf_1)\tau]$ 项需要做以下处理: 因为 CW 方向信号输出的工作点在谐振曲线的最大斜率处, 也即工作点的频率为 $f_0 \pm \Delta\nu_R/2$, 也即要求 $f_1 = \Delta\nu_R/2$, 其中 $\Delta\nu_R = \Delta\nu_F/F_c$, 称为谐振腔本征谱线宽度, 又称半高全宽, $\Delta\nu_F = 1/\tau$ 为自由光谱宽度, F_c 为 FRR 的有效精细度, 本文可计算出 $F_c = \pi\sqrt{1-K_c}/K_c$ [13]。所以 $\pi(f_0+pf_1)\tau = N\pi \pm K_c/2\sqrt{1-K_c}$, 则有 $\sin^2[\pi(f_0+pf_1)\tau] \approx K_c^2/4(1-K_c)$ 。由于 CCW 方向的工作点也可近似视为在谐振曲线的最大斜率处, 则可对 $\sin^2[\pi(f_0+pf_1)\tau]$ 做类似处理, 下文不再额外阐述。

对 CCW 方向信号光的背向散射项, 计算其功率:

$$P_{n1} = K_c \alpha |E_4(f_0+qf_2)|^2 |E^R e^{j\varphi_1(t)}|^2 = K_c \alpha |E_0 E^R|^2 \left| \frac{\sqrt{\alpha_c} K_c e^{j2\pi(f_0+qf_2)t}}{1 - \sqrt{\alpha_c} \Delta_c (1-K_c) e^{-j2\pi(f_0+qf_2)\tau}} \right|^2 = \frac{\alpha \alpha_c K_c^2 |E_0 E^R|^2}{K_c^2 + 4(1-K_c)\sin^2[\pi(f_0+qf_2)\tau]} = \frac{\alpha \alpha_c |E_0 E^R|^2}{2} \quad (13)$$

对 CCW 方向载波的背向散射项, 计算其功率:

$$P_{n2} = K_c \alpha s |E_4(f_0)|^2 |E^R e^{j\varphi_2(t)}|^2 = K_c \alpha s |E_0 E^R|^2 \frac{\alpha_c}{K_c} = \alpha \alpha_c s |E_0 E^R|^2 \quad (14)$$

由以上公式可知, 对载波的抑制只能有效降低 CCW 方向载波的背向散射项, 而对 CCW 方向信号光的背向散射项并无抑制效果。由于载波抑制比远小于 1, 故忽略 P_{n2} 项, 则反射式束缚结构 FRR 所构成的相位调制 RFOG 的输出信号量与背向散射噪声量的信噪比为

$$SNR_1 = \frac{P_s}{P_{n1}} = \frac{\alpha_c E_0^2/2}{\alpha \alpha_c |E_0 E^R|^2/2} = \frac{1}{\alpha (E^R)^2} \quad (15)$$

2.2 透射式 FRR 构成的 RFOG

推导透射式束缚结构 FRR 所构成的相位调制 RFOG 的信噪比公式。在不做额外说明的情况下, 下文所有参量含义与上文一致。图 4 给出了透射式束缚结构 FRR 所构成的相位调制 RFOG 的示意

图。

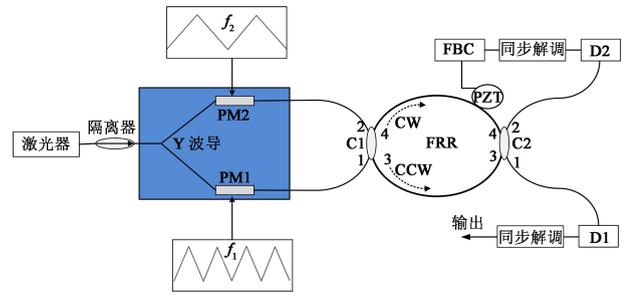


图 4 透射式 FRR 构成调相 RFOG 示意图

其工作流程与 2.1 节类似, 不做额外叙述。D1 处光强表达式可表示为

$$I'_{D1} = |E'_{cw}(f_0+pf_1) + \sqrt{s}E'_{cw}(f_0) + \sqrt{\alpha} \cdot [E'_{ccw}(f_0+qf_2) + \sqrt{s}E'_{ccw}(f_0)]|^2 \quad (16)$$

上式中各项的表达式分别为

$$E'_{cw}(f_0+pf_1) = j\sqrt{K_c}E'_4(f_0+pf_1) = \frac{\sqrt{\alpha_c}K_cE_0e^{j2\pi(f_0+pf_1)t}}{1 - \sqrt{\Delta_c}\alpha_c(1-K_c)e^{-j2\pi(f_0+pf_1)\tau}} \quad (17)$$

$$\sqrt{s}E'_{cw}(f_0) = j\sqrt{K_c}sE'_4(f_0) = \frac{\sqrt{s\alpha_c}K_cE_0e^{j2\pi f_0 t}}{1 - \sqrt{\Delta_c}\alpha_c(1-K_c)e^{-j2\pi f_0 \tau}} \quad (18)$$

$$\sqrt{\alpha}E'_{ccw}(f_0+qf_2) = \sqrt{\alpha K_c}jE'_4(f_0+qf_2)E^R e^{j\varphi_1 t} = \frac{E_0\sqrt{\alpha_c}\alpha_c K_c E^R}{1 - \sqrt{\Delta_c}\alpha_c(1-K_c)e^{-j2\pi(f_0+qf_2)\tau}} e^{j2\pi(f_0+qf_2)t+j\varphi_1(t)} \quad (19)$$

$$\sqrt{\alpha s}E'_{ccw}(f_0) = \sqrt{\alpha s K_c}jE'_4(f_0)E^R e^{j\varphi_2(t)} = \frac{E_0\sqrt{\alpha_c}\alpha_c K_c E^R}{1 - \sqrt{\Delta_c}\alpha_c(1-K_c)e^{-j2\pi f_0 \tau}} e^{j2\pi f_0 t+j\varphi_2(t)} \quad (20)$$

则透射式束缚结构 FRR 所构成的相位调制 RFOG 的最终输出功率表达式为

$$P'_{out} = K_c |E'_4(f_0+pf_1)|^2 + K_c s |E'_4(f_0)|^2 + K_c \alpha |E'_4(f_0+qf_2)|^2 |E^R e^{j\varphi_1(t)}|^2 + K_c \alpha s |E'_4(f_0)|^2 |E^R e^{j\varphi_2(t)}|^2 \quad (21)$$

式中第一项为陀螺输出 CW 方向的信号项, 第二项为 CW 方向的载波项, 第三项为 CCW 方向信号光的背向散射项, 第四项则为 CCW 方向载波的背向散射噪声。

对透射式结构下的 RFOG 输出的信号光, 计算其平均功率:

$$P'_s = K_c | E'_4(f_0 + pf_1) |^2 = \frac{\alpha_c K_c^2 E_0^2}{|1 - \sqrt{\Delta} \alpha_c (1 - K_c) e^{-j2\pi(f_0 + pf_1)\tau}|^2} = \frac{\alpha_c K_c^2 E_0^2}{1 + \Delta \alpha_c^2 (1 - K_c)^2 - 2\sqrt{\Delta} \alpha_c (1 - K_c) \cos[2\pi(f_0 + pf_1)\tau]} = \frac{\alpha_c K_c^2 E_0^2}{[1 - \sqrt{\Delta} \alpha_c (1 - K_c)]^2 + \sqrt{\Delta} \alpha_c K_c^2} \quad (22)$$

透射式结构下的 RFOG 输出 CW 方向载波项的功率为

$$P_z = K_c s | E_4(f_0) |^2 = \frac{s \alpha_c K_c^2 E_0^2}{[1 - \sqrt{\Delta} \alpha_c (1 - K_c)]^2} \quad (23)$$

透射式结构下的 RFOG 的 CCW 方向信号光的背向散射项的功率为

$$P'_{n1} = K_c \alpha | E_4(f_0 + qf_2) |^2 | E^R e^{j\varphi_1(t)} |^2 = \frac{\alpha \alpha_c K_c^2 | E_0 E^R |^2}{[1 - \sqrt{\Delta} \alpha_c (1 - K_c)]^2 + \sqrt{\Delta} \alpha_c K_c^2} \quad (24)$$

透射式结构下的 RFOG 的 CCW 方向载波的背向散射项的功率为

$$P'_{n2} = K_c \alpha s | E_4(f_0) |^2 | E^R e^{j\varphi_2(t)} |^2 = \frac{\alpha s \alpha_c K_c^2 | E_0 E^R |^2}{[1 - \sqrt{\Delta} \alpha_c (1 - K_c)]^2} \quad (25)$$

则透射式束缚结构 FRR 所构成的相位调制 RFOG 的输出信号量与背向散射噪声量的信噪比(SNR)仍为

$$SNR_1 = SNR_2 = \frac{P'_s}{P'_{n1}} = \frac{1}{\alpha (E^R)^2} \quad (26)$$

由以上推导可知,反射式束缚结构 FRR 所构成的相位调制 RFOG 与透射式结构关于背向散射噪声的信噪比是相同的。它与瑞利分布幅值的平方与背向散射系数的乘积成反比。

3 计算与仿真

由于背向散射噪声的幅值分布 E^R 的计算比较复杂,为简化计算,本文做最差假设,假设探测器在其频带接收到噪声幅值 E^R 均为 1,则上述的信噪比公式可写为

$$SNR'_1 = SNR'_2 = \frac{1}{\alpha} \quad (27)$$

也即信噪比公式简化为背向散射系数 α 的倒数,经验值为 0.0023,则两者的信噪比可以计算为 26.38 dB。

以经验值为条件,对第 2 节推导的反射式与透射式 FRR 构成的 RFOG 的各项输出表达式,若假设激光器的输入光功率为 1 mW, α_c 为 0.95, Δ 为

0.99, K_c 为 0.06, 则有表 1。

表 1 反射式与透射式 RFOG 输出指标对比

FRR 束缚类型	反射式	透射式
P_s/W	4.75×10^{-4}	1.59×10^{-5}
P_n/W	1.09×10^{-6}	3.66×10^{-8}
SNR/dB	26.38	26.38

可以看出,虽然反射式 FRR 构成的 RFOG 输出信号光功率和背向散射噪声功率均大于透射式 FRR 构成的 RFOG,但是两者信噪比相同,也即对于陀螺输出而言,两者的检测性能指标是相同的。

事实上,对于背向散射系数 α ,由文献[10],其可以表示为

$$\alpha = (1 - 10^{-\frac{\alpha_L \cdot L}{10}}) \times S \quad (28)$$

式中, α_L 为单位长度光波导的传输损耗, S 为捕捉系数,描述了被光波导捕捉到并在光波导中形成反向传输的散射光束。 S 和光波导的数值孔径有关,表示为 $S = (d_{NA}/n_1)^2 \cdot 1/p$,一般单模光纤结构中 p 为 4.55,则对信噪比公式整理可得

$$SNR' = \frac{p}{\left(\frac{d_{NA}}{n_1}\right)^2 (1 - 10^{-\frac{\alpha_L \cdot L}{10}})} \quad (29)$$

对上式中 n_1 取值为 1.46, d_{NA} 取典型值为 0.125, α_L 取值为 5×10^{-4} dB/m,则可得出信噪比随 FRR 的腔长 L 变化的规律,如图 5 所示。

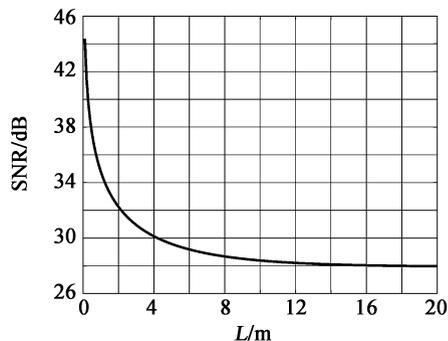


图 5 SNR 曲线仿真示意图

由图 5 可知,相位调制 RFOG 输出信号光功率与背向散射噪声功率的信噪比是随着腔长的增大而减小的,且在腔长大于 4 m 后信噪比下降速度就变得比较缓慢。虽然信噪比与腔长之间呈现简单的负

相关,但由文献[13]可知,腔长的变化还会影响到RFOG的灵敏度。因此,选择合适的腔长十分重要。

4 结论

背向散射噪声是RFOG中主要的光噪声之一,本文通过对反射式和透射式束缚结构FRR所构成的相位调制RFOG建立模型,对两种结构RFOG在谐振曲线的斜率最大处也即工作点,进行了信号光功率与背向散射噪声功率的信噪比分析,结果证明二者的信噪比表达式是相同的,与瑞利分布幅值的平方与背向散射系数的乘积成反比。并通过仿真发现,信噪比与FRR的腔长为负相关,选择合适的FRR腔长十分必要。这为高精度RFOG的研制提供了新的理论参考。

参考文献:

- [1] Hotate K, Harumoto M. Resonator fiber optic gyro using digital serrodyne modulation[J]. *J. of Lightwave Technol.*, 1997, 15(3): 466-473.
- [2] 鲍慧强, 毛慧, 马慧莲, 等. 谐振式微型光学陀螺锁频精度分析[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2010, 44(1): 94-98, 135. Bao Huiqiang, Mao Hui, Ma Huilian, et al. Precision analysis of frequency lock-in technique in resonator micro optic gyroscope[J]. *J. of Zhejiang University (Engin. Science)*, 2010, 44(1): 94-98, 135.
- [3] Shupe D M. Fiber resonator gyroscope: sensitivity and thermal nonreciprocity[J]. *Appl. Opt.*, 1981, 20(2): 286-289.
- [4] Sanders S J, Strandjord L K, Mead D. Fiber optic gyro technology trends—a Honeywell perspective[C]// *Proc. of 2002 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, IEEE*, 2002.
- [5] Ma Huilian, Zhang Jianjie, Wang Linlan, et al. Development and evaluation of optical passive resonant gyroscopes[J]. *J. of Lightwave Technol.*, 2017, 35(16): 3546-3554.
- [6] 焦新泉. 谐振式光学陀螺的关键技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016. Jiao Xinquan. Research on the key technology of resonant

optical gyroscope[D]. Beijing: Beijing Institute of Technol., 2016.

- [7] 冯丽爽, 焦洪臣, 姜辉, 等. 谐振式光子带隙光纤陀螺谐振腔方案设计[J]. *上海航天*, 2016, 33(5): 84-88. Feng Lishuang, Jiao Hongchen, Jiang Hui, et al. Design of resonant cavity for resonant photonic band gap fiber optic gyro[J]. *Shanghai Aerospace*, 2016, 33(5): 84-88.
- [8] Iwatsuki K, Hotate K, Higashiguchi M. Effect of Rayleigh backscattering in an optical passive ring-resonator gyro[J]. *Appl. Opt.*, 1984, 23(21): 3916-3924.
- [9] 张旭琳, 马慧莲, 丁纯, 等. 谐振式光纤陀螺调相检测分析[J]. *中国激光*, 2005, 32(11): 1529-1533. Zhang Xulin, Ma Huilian, Ding Chun, et al. Analysis on phase modulation spectroscopy of resonator fiber optic gyro[J]. *Chinese J. of Lasers*, 2005, 32(11): 1529-1533.
- [10] 马慧莲, 鲍慧强, 金仲和. 二氧化硅波导环形谐振腔的背向散射特性[J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 105-109. Ma Huilian, Bao Huiqiang, Jin Zhonghe. Backscattering characteristics of silicon dioxide optical waveguide ring cavity[J]. *Chinese J. of Lasers*, 2010, 37(1): 105-109.
- [11] Sanders G A, Strandjord L K, Williams W, et al. Improvements to signal processing and component miniaturization of compact resonator fiber optic gyroscopes[C]// *Proc. of 2018 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*, 2018.
- [12] 张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010. Zhang Guicai. Principle and Technology of Fiber Optic Gyroscope[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [13] 蒋治国, 胡宗福. 谐振型光纤陀螺的灵敏度分析[J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 706001-1. Jiang Zhiguo, Hu Zhongfu. Sensitivity analysis of resonant fiber optic gyroscope[J]. *Chinese J. of Lasers*, 2017, 44(7): 706001-1.

作者简介:

韩松延(1996—),男,河南泌阳人,硕士研究生,主要研究方向为光纤陀螺信号处理;

胡宗福(1959—),男,安徽巢湖人,博士生,教授,主要研究方向为光纤通信、光纤传感与信号处理。

基于 Alq₃ 光耦合层的新型顶发射 蓝光有机电致发光器件

王 振^{1*}, 陈家雯¹, 卢永生¹, 肖 飞², 梁真山¹, 彭 悦¹, 张 楠¹

(1. 重庆邮电大学 光电工程学院 微电子工程重点实验室, 重庆 400065; 2. 重庆市南岸区教师进修学院, 重庆 400060)

摘 要: 研制了一种结构为 Ag/Glass/ITO/TAPC/mCP/mCP:Firpic/TPBi/LiF/Al/Ag/Alq₃ 的顶发射有机电致发光器件,通过在 ITO 玻璃衬底背面生长一层 Ag 反射膜,使器件发出的蓝光被反射膜反射到顶电极出射。利用顶电极表面的 Alq₃ 光耦合层有效地提升了金属复合阴极的透射率,降低了器件的微腔效应。实验结果表明,当光耦合层厚度为 30 nm 时,获得了最大电流效率和最大亮度分别为 8.91 cd/A 和 5 758 cd/m² 的蓝光顶发射有机电致发光器件(TEOLED);同时,在 10 V 电压下,其色坐标为(0.157,0.320),当亮度从 1 cd/m² 变化到 5 000 cd/m² 时,其色坐标仅漂移(0.002,0.010),表现出良好的色稳定性。

关键词: 顶发射有机电致发光器件; 蓝光; 微腔效应; 光耦合层; 色稳定性

中图分类号: TN383.1 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0794-04

Blue Top-emission Organic Light-emitting Device Based on Alq₃ Light-coupling Layer

WANG Zhen¹, CHEN Jiawen¹, LU Yongsheng¹, XIAO Fei²,

LIANG Zhenshan¹, PENG Yue¹, ZHANG Nan¹

(1. Key Laboratory of Microelectronic Engineering, School of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN; 2. Chongqing Nan'an Teacher's Training Academy, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: In this article, a top-emitting organic light-emitting device with the structure of Ag/Glass/ITO/TAPC/mCP/mCP:Firpic/TPBi/LiF/Al/Ag/Alq₃ was developed. By growing a layer of Ag reflector on the back of the ITO glass substrate, the blue light emitted by the device was reflected by the reflective film to the top electrode to emit. The Alq₃ light coupling layer on the top electrode effectively improves the transmittance rate of the metal cathode and reduces the microcavity effect of the device. The experimental results show that when the thickness of the optical coupling layer is 30 nm, blue TEOLEDs with a maximum current efficiency of 8.91 cd/A and a maximum brightness of 5 758 cd/m² were obtained. Meanwhile, under a voltage of 10 V, the CIE coordinates are (0.157,0.320), which only drift (0.002,0.010) when the brightness changes in the range of 1~5 000 cd/m², showing good color stability.

Key words: top-emitting organic light-emitting device; blue light; microcavity effect; light-coupling layer; color stability

收稿日期:2020-07-21.

基金项目:国家自然科学基金项目(61804020);重庆市基础研究
研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0462,
cstc2018jcyjAX0547);重庆市教委科学技术研究项目
(KJQN201900630).

*通信作者:王 振 E-mail: wangzhen@cqupt.edu.cn

0 引言

有机发光二极管 (Organic Light Emitting Diode, OLED) 具有自发光、亮度高、视角广、响应快、能耗低、可制备柔性显示装置等优点,得到了广泛的发展与应用^[1-8]。按照出光方向不同, OLED 可以被分为底发射有机发光二极管 (BEOLED) 和顶发射有机发光二极管 (TEOLED)^[9]。BEOLED 通常以制备在玻璃衬底上的透明钢锡氧化物 (ITO) 作为阳极, 不透明金属作为阴极, 光从 ITO 阳极一侧出射。目前 OLED 的驱动方式大多采用有源驱动, BEOLED 发出的光经过基板时会被基板上的金属线路阻挡, 从而影响器件实际的发光面积。TEOLED 的光线是从器件半透明阴极方向出射, 面板的线路设计不会影响器件的出光面积。相同亮度下 TEOLED 的工作电压比 BEOLED 更低, 可以获得更长的使用寿命^[10]。因此, 顶发射器件是小屏手机等设备的首选。

制备 TEOLED 的难点是在有机层上直接制备高透射率、高电导率的半透明顶电极。早期, 有报道使用 ITO 来制备顶电极^[11], 然而溅射 ITO 会对有机层造成损伤, 导致顶发射器件的外量子效率往往只有常规器件的一半左右, 这使得 ITO 作为半透明顶电极的应用受到限制。目前, 人们多采用半透明金属作为顶电极, 它具有生长容易、工艺简单、破坏性小等优点, 但在可见光范围内透射率较低。为提高半透明金属电极的透射率, 通常在电极外侧蒸镀高折射率的光耦合层以提高光耦合输出效率^[12]。Lim 等^[13]在 Ba(3 nm)/Ag(15 nm) 半透明阴极上方生长了 100 nm 的 ITO 光耦合层, 使电极透射率达到 63%, 器件效率为 2.7 lm/W。Chen 等^[14]采用以 BCP 作为光耦合输出层, 以降低 Sm/Ag 半透明阴极的透射率、抑制器件的多光束干涉并利用广角干涉获得了电流效率为 4.36 cd/A 的顶发射蓝光器件。

因 TEOLED 的电极均采用高反射率的金属材料, 器件内不可避免地存在微腔效应^[15]。微腔效应的存在使得对应蓝光共振波长的器件微腔腔长过厚或过薄, 导致蓝光 TEOLED 的启亮电压过高或者容易被击穿。同时, TEOLED 还存在色坐标漂移、光谱窄化等问题^[16]。为了解决上述问题, 本文采用 Alq₃ 作为光耦合输出材料, 有效地降低了金属阴极的反射率, 抑制了器件的微腔效应, 获得了亮度和发

光效率高、色谱稳定的蓝光 TEOLED。

1 实验

本文制备的器件结构如下: Ag(100 nm)/Glass (1 100 μm)/ITO(185 nm)/TAPC(40 nm)/mCP(10 nm)/mCP: Firpic(10%, 20 nm)/TPBi(40 nm)/LiF(0.5 nm)/Al(1 nm)/Ag(25 nm)/Alq₃(*x* nm)。

器件制备采用 ITO 玻璃衬底, 其玻璃厚度为 1 100 μm, ITO 厚度为 185 nm。首先将衬底依次用丙酮、无水乙醇、去离子水超声清洗以去除表面污渍与灰尘。然后将清洗好的 ITO 衬底烘干后放入等离子清洗机中处理, 以提高 ITO 功函数并获得较高的清洁度。处理完成后立即放入真空蒸镀系统, 采用真空蒸镀的方式, 在 4.0×10^{-5} Pa 真空度下制备器件。

器件结构如图 1 所示。其中, ITO 玻璃衬底背面的 Ag 为反射膜, 器件发出的蓝光被 Ag 反射膜反射到半透明阴极出射, TAPC 为空穴传输层, mCP 为激子阻挡层与蓝光发光层主体材料, Firpic 为蓝光发光层客体材料, 发光层中客体掺杂的质量分数为 10%, TPBi 为电子传输层, LiF/Al/Ag 为半透明阴极, Alq₃ 为光耦合输出层。发光材料蒸镀速率控制在 0.01 nm/s, 其余有机材料蒸镀速率控制在 0.09~0.1 nm/s, LiF 蒸镀速率控制在 0.01 nm/s, 其余无机材料蒸镀速率控制在 0.2 nm/s。本文所有有机材料均购于广东阿格蕾雅光电材料有限公司, 所有器件均未封装; 膜层厚度由石英晶振实时监控, 器件光电性能由 Keithley2450 电压-电流源和 PR670 光度计组成的光电测试系统测量, 所有测试均在大气室温环境下进行。

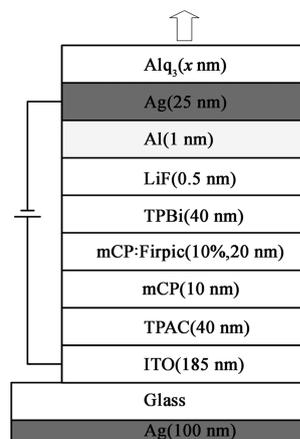


图 1 器件结构图

2 结果与分析

顶发射器件通常由全反射阳极和半透明阴极组成,此结构中不可避免地存在微腔效应。当器件腔长与发射光的波长量级相同时,共振波长处的发射强度则会有所增强,微腔效应对应的共振波长满足式(1)^[17-18]:

$$\sum n_m d_m + \frac{\lambda_q}{4\pi} \left| \sum_i \Phi_i(\lambda) \right| = q \frac{\lambda_q}{2} \quad (1)$$

式中, λ_q 为共振波长, n_m 与 d_m 分别为反射镜与半透明阴极之间膜层的折射率与厚度, $\Phi(\lambda)$ 为反射镜与半透明阴极的相位差, q 为模数,其中 $\Phi(\lambda)$ 满足式(2):

$$\Phi(\lambda) = \cot\left(\frac{2n_m b_m}{n_m^2 - a_m^2 - b_m^2}\right) \quad (2)$$

式中, a_m 与 b_m 分别是金属折射率的实部与虚部。

本文采用一种新型顶发射结构,在常规透明蓝光器件玻璃衬底背面蒸镀一层 100 nm 厚的高反射率 Ag 反射膜。100 nm 的 Ag 反射膜在 Firpic 特征发光峰 472 nm 处的反射率约为 97.3%^[19],器件发出的蓝光可有效地被反射膜反射到顶电极出射。由以上公式计算得出本文设计结构的有机层厚度约为 118 nm,与常规底发射蓝光器件有机层厚度大致相同,故可以有效解决蓝光器件腔长过厚或者过薄的问题。

Al/Ag 双金属电极透射率较低导致器件效率不高。为了解决此问题,本文在顶电极的出光面蒸镀一层光耦合层 Alq₃,Alq₃ 折射率约为 1.7,可以通过波导模式耦合提高器件的出光效率。利用传输矩阵理论^[20]计算并仿真了 Al(1 nm)/Ag(25 nm)/Alq₃(x nm), $x=0,25,30,35,40$ nm。膜系的透射率与反射率曲线如图 2 所示。可见,在 Firpic 特征发光峰 472 nm 处,未加 Alq₃ 膜系的透射率 T 与反射率 R 分别为 29.03% 和 67.61%,随着 Alq₃ 厚度的增加,膜系透射率逐渐升高,反射率逐渐降低。在

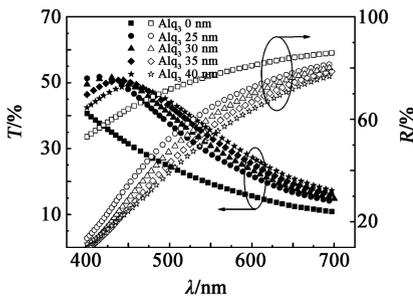


图 2 Al/Ag/Alq₃ 透射率/反射率曲线

$x=40$ nm 时获得膜系最高透射率为 49.39%,最低反射率为 30.55%,相对于未加光耦合层 Alq₃ 的膜系分别变化了约 1.7 和 2.2 倍。据此,本文设计了 5 种具有不同 Alq₃ 厚度的器件,分别为 0 nm(器件 A),25 nm(器件 B),30 nm(器件 C),35 nm(器件 D),40 nm(器件 E)。

图 3 为器件 A~E 在 10 V 电压下的正方向出射光归一化电致发光(EL)光谱和拥有相同有机层结构的底发射蓝光器件(Bottom)的归一化 EL 光谱。由图 3 可知,与底发射器件相比,器件 A~E 在 Firpic 特征发光峰 472 nm 处并没有发生漂移,半峰宽仅有微弱的变化,同时在 500 nm 处的 Firpic 固有发光肩峰略微增强。这可能是由于在反射镜与半透明阴极之间包含了较厚的 ITO 玻璃基板,导致器件腔长过长。所以,微腔效应带来的影响可以忽略。图 4 给出了器件的 CIE 随器件亮度的变化曲线。可以看出,随着亮度从 1 cd/m² 逐渐增强到 5 000 cd/m²,未沉积 Alq₃ 光耦合层器件 A 的 CIE 色坐标值漂移(0.215,0.053),漂移较为明显;而生长了 Alq₃ 光耦合层的器件 B~E 色坐标仅分别漂移了(0.005,0.016),(0.002,0.010),(0.007,0.004),(0.003,0.029),均表现出较好的色坐标稳定性。由此可以看出,此新型顶发射结构所发射的蓝光具有良好的色谱稳定性。

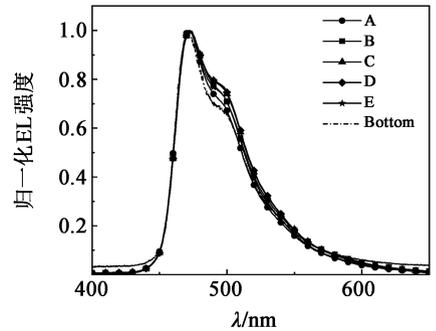


图 3 各器件在 10 V 电压下的 EL 光谱

为了进一步研究器件的色纯度特性,给出了器件 A~E 在 10 V 电压下的 CIE,如图 4 中插图所示。未生长光耦合层的器件 A 色坐标为(0.152,0.302),器件 B~E 色坐标分别为(0.154,0.303),(0.157,0.320),(0.157,0.323)和(0.154,0.312)。随着器件光耦合层 Alq₃ 厚度的增加,器件的色坐标越来越靠近具有相同有机层结构的底发射蓝光器件色坐标(0.165,0.329),这说明生长光耦合层可以有效改善器件的色纯度。当光耦合层 Alq₃ 厚度为

40 nm 时, 器件 E 的色坐标向绿光发生了漂移。这是由于随着 Alq₃ 厚度增加, Alq₃ 被器件发出的蓝光激发而产生的绿光强度增强, 导致色坐标向绿光漂移。综上所述, 获得了厚度为 30~35 nm 的 Alq₃ 光耦合层且具有良好的色稳定性的顶发射蓝光器件。

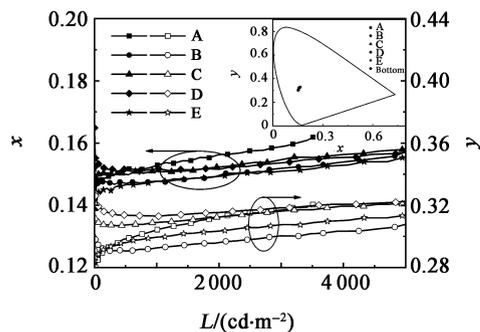
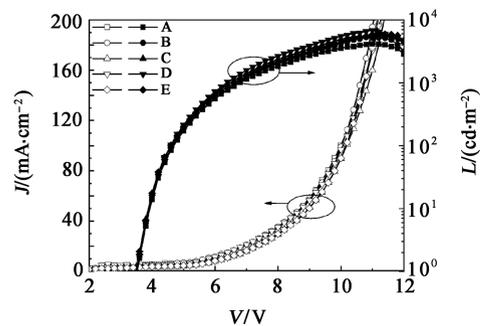


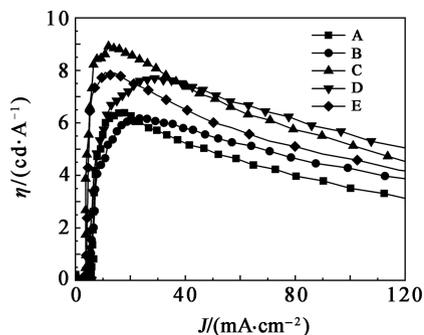
图 4 器件色坐标随亮度变化曲线(插图为器件的 CIE)

器件 A~E 的电流密度-电压-亮度曲线与电流密度-电流效率曲线分别如图 5(a) 和 (b) 所示。由于有机层结构相同且是同时制备的, 器件 A~E 具有相同的启亮电压, 电流密度也大致相同。因此, 光耦合层 Alq₃ 厚度的改变对器件的电学性能没有影响。器件电学性能如表 1 所示。

器件 A~E 的最大亮度分别为 4 154, 5 247, 5 758, 6 808 和 5 910 cd/m², 最大电流效率 η_{\max} 分别为 6.38, 6.17, 8.91, 7.69 和 7.92 cd/A。器件 C



(a) 电流密度-电压-亮度曲线



(b) 电流密度-电流效率曲线

图 5 器件 A~E 的两种曲线

表 1 不同 Alq₃ 厚度下器件的电学性能

器件	V_{on}/V	$L_{\text{max}}/(\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$	$\eta_{\text{max}}/(\text{cd} \cdot \text{A}^{-1})$
A	3.5	4 154	6.38
B	3.5	5 247	6.17
C	3.5	5 758	8.91
D	3.5	6 808	7.69
E	3.5	5 910	7.92

的最大电流效率是没有生长 Alq₃ 光耦合层器件效率的 1.39 倍, 最大亮度是器件 A 的 1.38 倍。以上结果表明, Alq₃ 作为光耦合层对器件蓝光波段的发光起到了耦合出光作用, 大大提高了器件的出光效率, 光耦合层的引入可有效改善器件的性能。

3 结论

本文在常规透明蓝光器件背面蒸镀一层 Ag 反射膜, 蓝光从顶电极出射, 在半透明阴极外侧引入 Alq₃ 光耦合层, 研究光耦合层厚度对器件色谱以及电学性能的影响。研究发现, 光耦合层的厚度对器件的电学性能没有影响。随着光耦合层厚度的增加, 电极透射率增加, 耦合效率增强, 降低了器件微腔效应, 器件的光谱与色坐标没有明显漂移。当器件的光耦合层 Alq₃ 厚度为 30 nm 时, 器件性能最佳, 其电流效率为 8.91 cd/A, CIE 色坐标为 (0.157, 0.320), 具有良好的色稳定性, 这为改善顶发射器件性能提供了新的思路。

参考文献:

- [1] Sim Y, Lee H, Jung H, et al. Hybrid white organic light emitting diodes using dual core blue fluorescent emitter[J]. J. of Nanoscience and Nanotechnol., 2019, 19(2): 1141-1144.
- [2] Cheng T, Lee J, Chen C, et al. Carrier transport and recombination mechanism in blue phosphorescent organic light-emitting diode with hosts consisting of cabazole- and triazole-moiety[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 3654.
- [3] Lee J, Li P, Kung H, et al. Highly efficient top-emission organic light-emitting diode on an oxidized aluminum anode [J]. J. of Appl. Phys., 2019, 125(14): 145501.
- [4] Thomschke M, Nitsche R, Furno M, et al. Optimized efficiency and angular emission characteristics of white top-emitting organic electroluminescent diodes[J]. Appl. Phys. Lett., 2009, 94(8): 83303.
- [5] Kim S K, Lampande R, Kwon J H. Electro-optically efficient and thermally stable multilayer semitransparent pristine Ag cathode structure for top-emission organic light-emitting diodes [J]. ACS Photon., 2019, 6(11): 2957-2965.

(下转第 849 页)

基于双锥形光子晶体光纤的折射率传感器

王婷婷*, 杨凌旭, 李 帅, 王 菲

(南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 南京 210044)

摘要: 设计了一种基于光子晶体光纤的双锥形马赫-曾德尔干涉仪, 并对其折射率传感特性进行了研究。在 FDTD Solutions 光学仿真平台中建立了干涉仪结构模型, 研究了该结构的透射光谱对环境折射率的响应。仿真结果表明, 透射光谱随环境折射率的增加发生红移, 灵敏度为 95.906 nm/RIU。利用熔接与拉锥工艺制备了干涉仪样品, 搭建了实验系统, 在不同浓度甘油溶液中对透射谱进行了检测, 实验结果表明, 折射率在 1.322 2~1.353 8 范围内, 透射谱偏移灵敏度为 121.95 nm/RIU。该传感器具有体积小、重量轻、易于制备、灵敏度高等优点, 适用于生化和物理传感领域。

关键词: 光子晶体光纤; 马赫-曾德尔干涉仪; 光纤传感器; 双锥形; 折射率

中图分类号: TN253 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0798-04

Research on Mach-Zehnder Interferometer Based on Biconical Photonic Crystal Fiber

WANG Tingting, YANG Lingxu, LI Shuai, WANG Fei

(School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, CHN)

Abstract: A biconical Mach-Zehnder interferometer based on photonic crystal fiber is designed, and its refractive index (RI) sensing characteristics are studied. The sensor performance was simulated by FDTD Solutions, and the results show that the transmission spectrum is red-shifted with the increasing RI and the sensitivity is 95.906 nm/RIU. An experimental platform was built to test the sensor under different concentrations of glycerin solution, and the response relationship between its transmission spectrum and external refractive index was studied. The experimental results show that with RI changing from 1.322 2 to 1.353 8, the sensitivity is 121.95 nm/RIU@1 550 nm. The RI sensor with the characteristics of high RI sensitivity, easy fabrication and low-cost is suitable for applications in the biochemical and physical sensing fields.

Key words: photonic crystal fiber; Mach-Zehnder interferometer; fiber optic sensor; biconical; refractive index

0 引言

基于马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder Interferometer, MZI) 的光纤传感器被广泛应用于

收稿日期: 2020-07-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61405094); 江苏高校优势学科Ⅲ期建设工程项目(“信息与通信工程”优势学科); 南京信息工程大学大学生实践创新训练计划项目(201910300080Y).

* 通信作者: 王婷婷

E-mail: wtt79812@163.com

物理、化学和生物领域, 其制造工艺简单、受外界干扰小、稳定性强, 在光纤传感技术中得到众多学者的青睐^[1]。近几十年来, 光子晶体光纤 (Photonic Crystal Fiber, PCF) 传感器的发展开辟了光纤传感器制造的新领域, 锥形 PCF 改变了其内部结构和传输特性, 在传感中表现出良好的特性。与锥形单模光纤 (Single Mode Fiber, SMF) 相比, 锥形 PCF 灵敏度更高, 在折射率、电场和温度的测量中具有更大的潜力。通过熔接、拉锥等方式, 可以激发出 PCF

的包层模式,形成干涉,实现折射率、温度、曲率等物理量的传感,具有制备简单和结构紧凑的优势^[2-15]。

2016年,Dash等^[4]提出一种基于PCF的MZI,在此结构上涂覆氧化石墨烯以监测分析溶液的折射率,此结构可用作高精度检测生化分析物的尖端传感器。2017年,Zhao等^[5]通过在两个SMF之间级联一段有半锥形塌陷区域的PCF,构建了一种基于PCF的MZI,通过增强MZI-PCF的倏逝场,使其与周围介质更充分地相互作用,增强折射率测量的灵敏度。2018年,王建丰等^[6]提出将PCF与碳基材料相结合,待一段PCF两端与SMF熔接在一起后在结构表面涂覆石墨烯,形成了基于PCF的MZI。

本文提出了一种基于PCF的双锥形马赫-曾德尔干涉仪,该传感器制作简单,仅需在一段较短的PCF两端熔接SMF,并分别对两处熔接点进行拉锥制得。仿真与实验研究了传感器透射光谱与外界折射率的响应关系,其折射率灵敏度为121.95 nm/RIU,该传感器制作简单,灵敏度高,在检测气体或溶液浓度等方面具有潜在的应用价值。

1 基于PCF的双锥形MZI传感原理

基于PCF的双锥形MZI结构如图1所示,该MZI由两段SMF、两段锥形区域以及一段PCF组成。两段SMF分别作为输入、输出光纤与PCF进行无损熔接后,分别对熔接点进行拉锥形成两段锥形区域,锥形区域充当耦合器的作用,第一个锥区将纤芯中的光信号耦合到光纤包层中,第二个锥区再将包层中的光信号耦合回光纤纤芯中,形成马赫-曾德尔干涉。

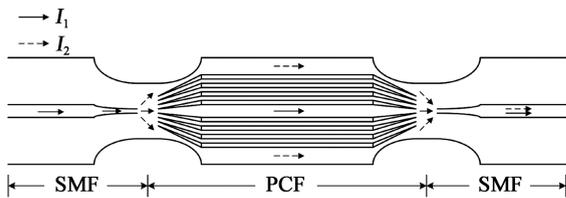


图1 基于PCF的双锥形MZI结构示意图

由双光束干涉原理,纤芯模式和包层模式之间的干涉强度可表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi \quad (1)$$

其中, I_1, I_2 分别是纤芯模式和包层模式的光强, ϕ 是两种模式之间的相位差。干涉条纹对比度取决于 I_1 和 I_2 的值。当 $I_1 = I_2$ 时,干涉条纹对比度最大。式中相位差为

$$\phi = \frac{2\pi(n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{clad}})L}{\lambda} = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}L}{\lambda} \quad (2)$$

其中, $n_{\text{eff}}^{\text{core}}, n_{\text{eff}}^{\text{clad}}$ 分别是纤芯模式和包层模式的有效折射率, Δn_{eff} 是芯模和包层模之间的有效折射率差, L 是干涉臂的长度, λ 是工作波长。当 $\phi = (2m + 1)\pi$ 时,干涉光强最小,即为干涉条纹波谷。 m 阶波谷波长可表示为

$$\lambda_m = \frac{2\Delta n_{\text{eff}}L}{2m + 1} \quad (3)$$

λ_m 随外部折射率变化。变化值 $\Delta\lambda_m$ 可示为

$$\Delta\lambda_m = \frac{2(\Delta n_{\text{eff}} + \Delta n)L}{2m + 1} - \frac{2\Delta n_{\text{eff}}L}{2m + 1} = \frac{2\Delta nL}{2m + 1} \quad (4)$$

其中, Δn 是PCF包层有效折射率随环境折射率的变化值,随着环境折射率的增加,干涉光谱发生红移,由式(4)还可以看出,熔融拉锥增长了干涉臂 L ,同时增强了倏逝场与被测液体的作用,从而有效地提高了传感器的灵敏度。但随着 L 的增加,干涉信号的自由光谱范围缩小且传输损耗也会逐渐增加,增加了解调的复杂度,且 L 过长,传感器的抗拉强度将会大大降低,因此 L 并不是越长越好的。

2 基于FDTD算法的建模与仿真

利用FDTD Solutions对基于PCF的双锥形MZI进行建模仿真,仿真区域选用2D模式,建立的物理结构模型如图2所示。

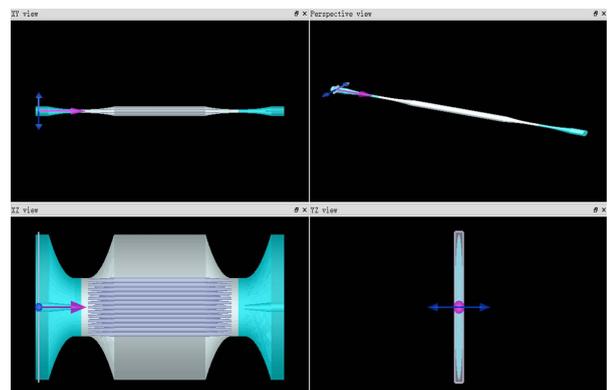


图2 基于PCF的双锥形MZI结构模型

输入光纤和输出光纤选择标准单模光纤SMF-28。选取的PCF为长飞SM-10型实芯PCF,含拉锥区域总长为2500 μm ,两拉锥区域光纤腰椎直径为50 μm ,锥长为1000 μm ,随着PCF逐渐变细,传感区域与外部环境之间的耦合度增加。边界条件使用完美匹配层(Perfectly Matched Layer, PML),光源选用高斯光源,环境折射率设置为1.3333,将网

格精度 mesh 设为 $0.08 \mu\text{m}$, 得到透射谱干涉条纹如图 3 所示。

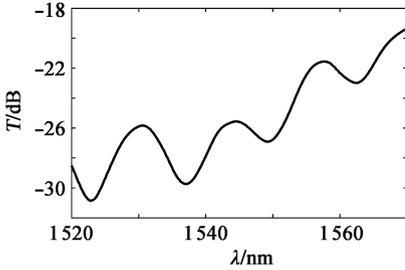


图 3 透射谱干涉条纹图

为了研究传感器的折射率传感性能, 仿真了将其置于 5%~45% 浓度甘油溶液的透射谱, 对比分析其传感特性。1550 nm 处甘油溶液浓度与折射率的经验公式^[9]为

$$n_{1550} = -0.0216\omega^3 + 0.0512\omega^2 + 0.111\omega + 1.3165 \quad (5)$$

其中, ω 为溶液浓度, n_{1550} 为 1550 nm 处溶液折射率。

在不同浓度甘油溶液下的干涉条纹如图 4 所示, 透射光谱发生红移, 1560 nm 处波长漂移与环境折射率的关系如图 5 所示, 仿真得到的折射率灵敏度为 95.906 nm/RIU。

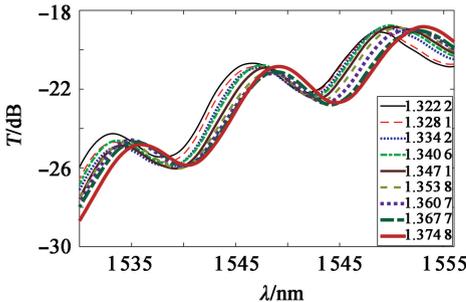


图 4 不同浓度甘油溶液下的透射光谱

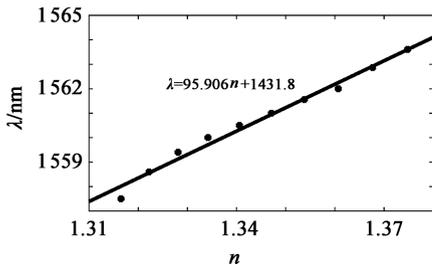


图 5 1560 nm 处波长漂移与环境折射率的关系

3 实验过程及传感特性分析

用于传感特性研究的传感器样品双锥间隔 3 cm, 锥区的金相显微照如图 6 所示, 实验测试系统如图 7 所示, 传感测试系统的主要部分是 MOI 公司

的 SM125 光纤光栅解调仪、光隔离器、传感器样品、配制好的甘油溶液等。将传感器的敏感区浸泡在甘油溶液中, 从 SM125 的 CN2 通道发出的激光经光隔离器入射到传感器样品中, 透射光由 SM125 的 CN1 通道接收, 最后透射出的干涉条纹数据传给电脑保存。

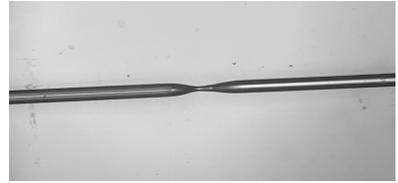


图 6 锥区金相显微图

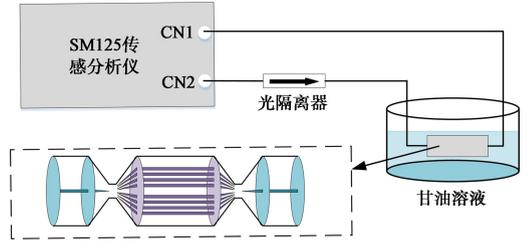


图 7 实验测试系统

通过光谱分析仪得到 MZI 在不同浓度甘油溶液中的传输光谱如图 8 所示。当甘油浓度增加时, 传输光谱发生红移, 由图可知最大漂移量为 5 nm, 为了进一步考察其细节, 取波长 1550 nm 附近的波谷作为观察点, 波长漂移与环境折射率的关系如图 9 所示, 随着溶液折射率的增大, 干涉波长向长波方向漂移, 且呈现良好的线性关系, 传感器在波长 1550 nm 处的灵敏度为 121.95 nm/RIU。

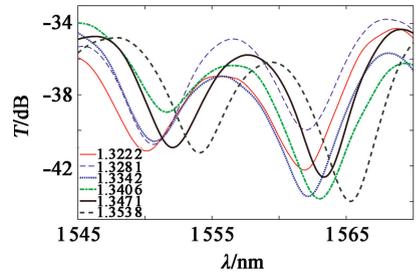


图 8 不同浓度甘油溶液中的传输光谱

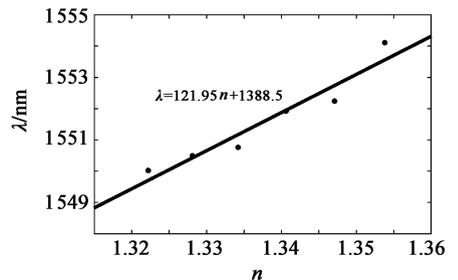


图 9 1550 nm 附近波长漂移与环境折射率的关系

4 结论

本文设计了一种基于光子晶体光纤的双锥形马赫-曾德尔干涉仪,并采用仿真与实验相结合研究了其传感特性。通过 FDTD Solutions 光学仿真软件对该传感器进行了传感性能仿真,搭建实验平台对传感器进行了不同浓度甘油溶液下的实验检测,研究了其透射光谱与外界折射率的响应关系。实验结果表明,将传感器浸入不同浓度甘油溶液时,随着溶液浓度的增加,其传输光谱的中心波长向长波方向漂移,在折射率变化范围为 1.322 2~1.353 8 时,该传感器在透射光谱波长 1 550 nm 处的灵敏度为 121.95 nm/RIU。

参考文献:

- [1] 付兴虎, 谢海洋, 朱洪彬, 等. 基于锥形光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉的曲率传感器实验研究[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 78-83.
Fu Xinghu, Xie Haiyang, Zhu Hongbin, et al. Experimental research of curvature sensor based on tapered photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 78-83.
- [2] Deng Ming, Liu Leiguang, Zhao Yong, et al. Highly sensitive temperature sensor based on an ultra-compact Mach-Zehnder interferometer with side-opened channels[J]. Opt. Lett., 2017, 42(18): 3549-3552.
- [3] 曹 晔, 刘 文, 赵 舜, 等. 基于光子晶体光纤和单模光纤错芯结构的光纤传感器[J]. 光电子·激光, 2015, 26(7): 1233-1237.
Cao Ye, Liu Wen, Zhao Shun, et al. A fiber sensor based on the core-offset structure of PCF to SMF [J]. J. of Optoelectronics · Laser, 2015, 26(7): 1233-1237.
- [4] Dash J N, Jha R. Temperature insensitive PCF interferometer coated with graphene oxide tip sensor[J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2016, 28(9): 1006-1009.
- [5] Zhao Yong, Xia Feng, Hu Haifeng, et al. A novel photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometer for enhancing refractive index measurement sensitivity[J]. Opt. Commun., 2017, 402: 368-374.
- [6] 王建丰, 孙 兵, 杨从浩, 等. 基于石墨烯涂覆光子晶体光纤的折射率传感器[J]. 光通信技术, 2018, 42(8): 33-36.
Wang Jianfeng, Sun Bing, Yang Conghao, et al. Refractive index sensor based on graphene-deposited photonic crystal fiber

- [7] Zhao Yong, Li Xuegang, Cai Lu, et al. Refractive index sensing based on photonic crystal fiber interferometer structure with up-tapered joints[J]. Sensors and Actuators B, 2015, 221: 406-410.
- [8] 蒋友华, 傅海威, 丁继军, 等. 基于倏逝波的锥形光纤马赫-曾德尔湿度传感器[J]. 应用光学, 2017, 38(1): 140-146.
Jiang Youhua, Fu Haiwei, Ding Jijun, et al. Tapered optical fiber Mach-Zehnder interferometer humidity sensor based on evanescent wave[J]. J. of Appl. Opt., 2017, 38(1): 140-146.
- [9] Saunders J E, Sanders C, Chen H, et al. Refractive indices of common solvents and solutions at 1 550 nm[J]. Appl. Opt., 2016, 55(4): 947-953.
- [10] Fu Xinghu, Liu Fan, Zhang Yu, et al. A refractive-index sensitivity-enhanced sensor by core-offset splicing the triple cladding quartz specialty fiber[J]. Optical Fiber Technol., 2018, 46: 63-67.
- [11] Tan Y C, Tou Z Q, Chow K K, et al. Graphene-deposited photonic crystal fibers for continuous refractive index sensing applications[J]. Opt. Express, 2015, 23(24): 31286-31294.
- [12] 陈家乐, 陶玉敏, 梅笑冰, 等. 双锥结构的 SMS 干涉型温度传感[J]. 光通信技术, 2018, 42(9): 55-58.
Chen Jiale, Tao Yumin, Mei Xiaobing, et al. SMS interferometric temperature sensor based on two down-tapers structure[J]. Optical Commun. Technol., 2018, 42(9): 55-58.
- [13] Wang Q, Wang B T, Kong L X, et al. Comparative analyses of bi-tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for refractive index sensing[J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 2017: 1-7.
- [14] 吴 蓉, 张璐瑶, 严清博, 等. 用于液体传感的高双折射新型光子晶体光纤结构[J]. 应用光学, 2020, 41(3): 637-644.
Wu Rong, Zhang Luyao, Yan Qingbo, et al. New photonic crystal fiber structure with high birefringence for liquid sensing[J]. J. of Appl. Opt., 2020, 41(3): 637-644.
- [15] 贾振安, 段维维, 刘颖刚, 等. 波长和强度同时响应的锥形多模光纤温度传感器[J]. 应用光学, 2017, 38(2): 331-335.
Jia Zhen'an, Duan Weiwei, Liu Yinggang, et al. Tapered multi-mode fiber temperature sensor based on simultaneous response of wavelength and intensity[J]. J. of Appl. Opt., 2017, 38(2): 331-335.

作者简介:

王婷婷(1979—),女,江苏南通人,博士,副教授,研究领域为光纤传感和光信号处理。

P3HT 为 空 穴 传 输 层 的 碳 基 钙 钛 矿 太 阳 电 池

万雪健^{1,2*}, 梁春军^{1,2}

(北京交通大学 1. 理学院; 2. 光电子研究所, 北京 100044)

摘要: 碳电极具有成本低、印刷方便、可有效隔离水氧等优点,因此有望利用碳电极材料实现低成本、高稳定性的钙钛矿太阳电池。无空穴传输层的传统碳基钙钛矿太阳电池面临着空穴提取率低、电子逆向传输,钙钛矿和碳电极界面的载流子复合等问题。文章引入聚(3-己基噻吩)(P3HT)作为器件的空穴传输层,使碳基钙钛矿太阳电池 ITO/SnO₂/MAPbI₃/P3HT/Carbon 的光伏性能得到了显著改善:器件的光电转化效率从 11.16% 提高到 13.37%。在氮气环境下,连续光照 1 000 h,太阳电池的光电转化效率可保持初始值的 87%,而传统器件在光照 500 h 后,其光电转化效率已下降至初始值的 60%。

关键词: 钙钛矿太阳电池; P3HT; 碳电极; 稳定; 空穴传输层

中图分类号: TM914.4 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0802-06

Study on Perovskite Solar Cells with P3HT Hole Transport Layer

WAN Xuejian^{1,2}, LIANG Chunjun^{1,2}

(1. School of Science; 2. Institute of Optoelectronics, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, CHN)

Abstract: Carbon electrode has the advantages of low-cost, convenient printing and the ability to isolate water and oxygen. Therefore, it is appealing to use carbon as the electrode material to achieve low-cost and highly stable perovskite solar cells (PSCs). However, conventional carbon-based perovskite solar cells (C-PSCs) without hole transport layers is still facing the problems of low hole extraction rate, electron reverse transfer, and undesired recombination at the perovskite/carbon interface. In this paper, poly (3-hexylthiophene) (P3HT) is applied as the hole transport layer of the device, thus the photovoltaic performance of solar cells with an architecture of ITO/SnO₂/MAPbI₃/P3HT/Carbon is significantly improved, achieving a power conversion efficiency (PCE) of 13.37%, which is 2.21% higher than that of the device without P3HT. Moreover, in nitrogen environment, the PCE of the device remains 87% of its initial value with continuous illumination for 1 000 h. In contrast, the PCE of the device without P3HT remains only 60% after illumination for 500 h.

Key words: perovskite solar cells; P3HT; carbon electrode; stability; hole transport layer

0 引言

自 2009 年首次被报道以来^[1],有机-无机混合钙钛矿太阳电池在世界范围内引起了人们极大的关

注。钙钛矿材料的光电性能良好,它具有适当且可调的带隙、高吸收系数^[2]、长载流子扩散长度^[3],以及双极电荷转移特性^[4]等。近十年来,钙钛矿太阳电池技术取得了令人瞩目的进展,光电转化效率从最初的 3.8% 快速提升至 25.2%^[5-10]。然而钙钛矿太阳电池的工作稳定性不佳,这是该领域当前亟待解决的问题之一。

传统的钙钛矿太阳电池一般采用真空蒸镀的方

收稿日期:2020-04-20.

基金项目:国家自然科学基金项目(61874008,61574014);北京市科委项目(Z181100004718004).

* 通信作者:万雪健 E-mail: 17121595@bjtu.edu.cn

法制作电极,金、银等贵金属是常见的电极材料^[11-12],真空蒸镀是一个高消耗过程,而金、银等电极的价格也相对昂贵。此外,这些金属会渗入钙钛矿层,导致钙钛矿太阳能电池的稳定性下降^[13-14]。这些缺点不利于钙钛矿太阳能电池的大规模商业开发^[15]。石墨碳的功函数和金接近,具有成本低、制作方便、能有效隔离水氧等优点,因此利用石墨碳电极材料有利于实现低成本、高稳定性的钙钛矿太阳能电池^[11]。

在发展初期,碳基钙钛矿太阳能电池不设空穴传输层,展现出结构简单、成本低廉^[16-17]的特点。然而空穴传输层是实现器件高效率的重要组成部分,良好的空穴传输材料有助于实现钙钛矿和电极之间的能级匹配,改善空穴提取,抑制钙钛矿与碳电极界面的电子-空穴复合,从而降低载流子损耗。钙钛矿太阳能电池的空穴传输层包括 PTAA^[18], spiro-MeOTAD^[19], NiO_x^[20-21], CuSCN^[22-23] 和 CuSCN 衍生物^[24-25]。PTAA 及 Spiro-MeOTAD 中的掺杂物易吸水,会影响钙钛矿太阳能电池的稳定性;NiO_x 的制备过程较为复杂;而 CuSCN 的制备需要真空工艺,不利于降低成本。空穴传输材料聚(3-己基噻吩)(P3HT)具有光电性能优异、成本低、易制备等优点,在以金电极^[26]为阳极的钙钛矿太阳能电池中,空穴传输层 P3HT 的使用显著改善了器件性能。最近 P3HT 和石墨烯的混合物也被用作空穴传输层^[27],获得了良好的器件性能。

本文研究了以 P3HT 为空穴传输层的碳基钙钛矿太阳能电池。器件结构为 ITO/SnO₂/MAPbI₃/P3HT/Carbon。P3HT 空穴传输层使钙钛矿与碳电极之间的能级更加匹配,有利于钙钛矿层中空穴的萃取。P3HT 层的引入有效抑制了其于钙钛矿界面的载流子复合,提高了碳基钙钛矿太阳能电池的效率和在工作稳定性。

1 实验部分

材料:氧化锡胶体分散液(水溶液质量分数为 15%)购自 Alfa Aesar。PbI₂(纯度:99.99%)和 CH₃NH₃(MAI,纯度:98%)购自 TCI。P3HT 和碳膏购自上海迈特威新材料科技有限公司。γ-丁内酯(GBL,纯度:99%)、二甲基亚砜(DMSO,纯度:99.8%)、氯苯(纯度:99.8%)均来自 Sigma-Aldrich 公司。SnO₂ 前驱体:将质量分数为 15%的 SnO₂ 纳

米颗粒胶体分散体用去离子水稀释至质量分数为 2.67%,形成 SnO₂ 前驱体。MAPbI₃ 前驱体:将 PbI₂(1.6 mmol/mL)和 CH₃NH₃(1.6 mmol/mL)溶解于 GBL:DMSO(体积比为 1:1)的混合溶剂中。P3HT 前驱体:将 10 mg P3HT 溶于 1 mL 氯苯中,得到 10 mg/mL 的 P3HT 溶液。

钙钛矿太阳能电池的制作:将镀有 ITO 的玻璃基片先后用洗涤剂和去离子水冲洗,再用无水酒精冲洗;吹干后,再在紫外臭氧环境下处理 15 min。接下来,以 3 000 r/m(40 s)的转速旋涂电子传输层氧化锡,随后在 150 °C 空气中退火 10 min。接下来,将 MAPbI₃ 膜以 1 000 r/m(15 s)和 3 500 r/m(35 s)的转速流程旋涂在氧化锡薄膜上,并在旋涂过程的最后 10 s 用 350 μL 氯苯冲洗,再在 100 °C 下退火 10 min。接下来,采用 3 000 r/m(30 s)的转速将 P3HT 溶液(70 μL)旋涂到钙钛矿膜上。最后,将石墨碳膏印刷在 P3HT 薄膜上,并在空气中退火(120 °C)15 min。

测量和表征:采用 Keithley 2635B 源表,在模拟太阳光(CROWNTECH SOLAR BEAM-02-3A)的照射下,记录电流-电压曲线。通过岛津 UV-3101PC 系统记录钙钛矿薄膜的紫外-可见吸收光谱。稳态光致发光用 Horiba Nanolog FL3-2iHR 荧光光谱仪表征,时间分辨光致发光采用 Horiba Delta Flex 超快寿命荧光光谱仪测量。样品的 XRD 测量是在 Bruker D8 先进衍射仪上完成的,使用了铜的 K_α 辐射(λ=0.154 05 nm)。用原子力显微镜 Asylum Research Cypher S 表征薄膜的粗糙度和表面形貌。钙钛矿薄膜的 SEM 图像表征由 ZEISS Gemini SEM300 系统完成,2 万倍的放大是在 15 kV 和 7.5 mm 距离的二次电子模式下进行的。

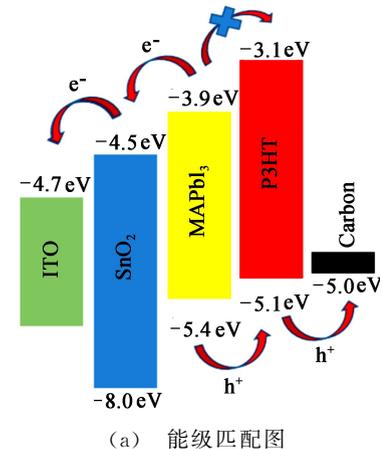
2 结果和讨论

2.1 MAPbI₃/P3HT 薄膜的形貌与光电特性

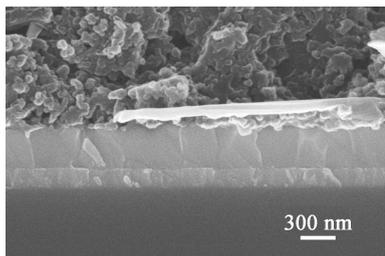
图 1 是结构为 ITO/SnO₂/MAPbI₃/P3HT/Carbon 的钙钛矿太阳能电池的能级匹配图和横截面扫描电镜图像。MAPbI₃ 导带与碳电极之间的能级差达到 0.4 eV,能级不匹配,导致空穴提取受到了阻挡,从而限制了器件的性能。P3HT 的最高已占据分子轨道(HOMO)为-3.1 eV,最低未占据分子轨道(LUMO)为-5.1 eV。因此,引入 P3HT 层可以使 MAPbI₃ 与碳电极之间能级更加匹配。

在光照条件下,在钙钛矿中产生光生载流子,通

过 P3HT 从钙钛矿中萃取空穴,并将其传输到碳电极中。由于 P3HT 的 LUMO 为 -5.1 eV ,介于 MAPbI_3 的 -5.4 eV 和碳的 -5.0 eV 之间,形成了较好的能级匹配,这有利于提高钙钛矿中空穴的提取和碳电极中空穴的注入。此外,由于 P3HT 价带的能级为 -3.1 eV ,高于 MAPbI_3 价带的 -3.9 eV ,形成了钙钛矿与碳之间的能级势垒。这种能级势垒可以阻止光生电子从钙钛矿流向碳电极,从而有效减少 MAPbI_3 与碳界面的电子空穴复合,有利于载流子的输运和提取,提升器件的光电转化效率^[28]。



(a) 能级匹配图

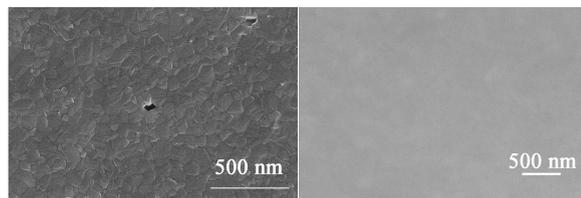


(b) 横截面扫描电子显微镜图像

图 1 ITO/ SnO_2 / MAPbI_3 /P3HT/Carbon 的钙钛矿太阳能电池的能级结构及横截面的 SEM 图像

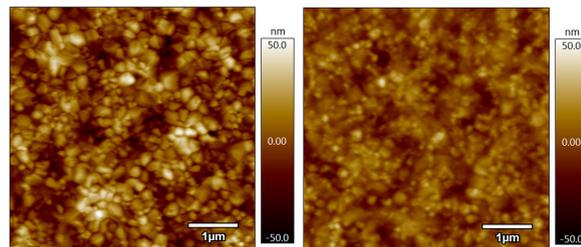
图 2(a) 和图 2(b) 所示的扫描电子显微镜 (SEM) 图像分别显示了在没有 P3HT 层和有 P3HT 层的 MAPbI_3 膜的表面形貌特征。从图 2(a) 可以看出, MAPbI_3 膜均匀覆盖在氧化锡表面,但表面存在一些针孔,这容易引起 MAPbI_3 /Carbon 界面的载流子复合。图 2(b) 中,由于钙钛矿薄膜上均匀地覆盖了 P3HT 层,针孔减少。图 3 所示原子力显微镜 (AFM) 图显示了表面形貌细节。单纯的 MAPbI_3 膜的粗糙度为 13.77 nm 。但是从图 3(b) 可以看出,在 MAPbI_3 上沉积 P3HT 后,表面粗糙度降低到 8.63 nm ,表面更加光滑,这有利于碳电极的粘附,使 MAPbI_3 /Carbon 之间的接触更加良好,

有利于提升钙钛矿太阳电池的性能^[23]。



(a) 无 P3HT 层 (b) 有 P3HT 层

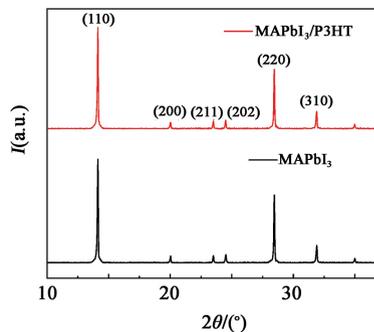
图 2 有无 P3HT 层 MAPbI_3 的 SEM 图像



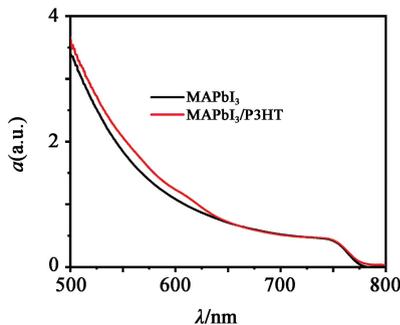
(c) 无 P3HT 层 (d) 有 P3HT 层

图 3 有无 P3HT 层 MAPbI_3 的 AFM 图像

图 4(a) 显示了 MAPbI_3 和 MAPbI_3 /P3HT 样品的 X 射线衍射图谱。 MAPbI_3 样品分别在 $14.1^\circ, 20^\circ, 23.5^\circ, 24.5^\circ, 28.5^\circ$ 和 31.9° 出现了 6 个衍射峰,分别对应立方 MAPbI_3 钙钛矿的 (110), (200), (211), (202), (220) 和 (310) 晶面的衍射峰。 MAPbI_3 /P3HT 的 X 射线衍射图显示了相同的六个衍射峰,表明 P3HT 在 MAPbI_3 薄膜上的沉积并



(a) X 射线衍射图谱



(b) 紫外-可见吸收光谱

图 4 两种样品的 X 射线衍射图谱和紫外-可见吸收光谱

没有改变 MAPbI_3 的晶体结构^[29]。图 4(b) 为加入和不加入 P3HT 的钙钛矿薄膜的紫外-可见吸收光谱。 $\text{MAPbI}_3/\text{P3HT}$ 样品相比于单纯的 MAPbI_3 样品, 在 350~640 nm 的波长范围内吸收增强, 这来源于 P3HT 的吸收。除此之外, 两个薄膜的吸收特性基本相似, 说明 P3HT 的加入对钙钛矿膜的吸收没有负面影响。

为了进一步探讨空穴传输层 P3HT 在 MAPbI_3 膜上的电荷转移特性, 分别对 MAPbI_3 和 $\text{MAPbI}_3/\text{P3HT}$ 薄膜进行了稳态光致发光(PL)和时间分辨光致发光(TRPL)的表征。ITO/ MAPbI_3 和 ITO/ $\text{MAPbI}_3/\text{P3HT}$ 的归一化稳态光致发光光谱如图 5(a) 所示。结果显示当 P3HT 覆盖在钙钛矿表面时, 钙钛矿发光急剧猝灭。说明加入空穴传输层(P3HT)提高了从 MAPbI_3 中萃取空穴的能力。 MAPbI_3 和 $\text{MAPbI}_3/\text{P3HT}$ 的时间分辨光致发光衰减曲线如图 5(b) 所示。时间分辨光致发光光谱符合双指数衰减公式: $I = A_0 + A_1 \exp(-t/\tau_1) + A_2 \exp(-t/\tau_2)$, 其中, τ_1 表示快速衰减时间常数, τ_2 表示较慢衰减时间常数^[30], τ_{avg} 表示平均时间常数, A_0, A_1, A_2 为拟合常数, 其拟合结果如表 1 所示。 MAPbI_3 薄膜的 τ_{avg} 远小于的 $\text{MAPbI}_3/\text{P3HT}$ 薄膜的数值, 说明 P3HT 层的加入有效促进了空穴

萃取。该空穴传输层促进了从 MAPbI_3 到碳电极的空穴传输, 这可以归因于引入 P3HT 后更好的能级匹配。

表 1 为采用双指数法对钙钛矿薄膜的时间分辨光致发光光谱进行拟合得到的衰减时间常数。

表 1 拟合得到的衰减时间常数

P3HT	τ_1/ns	$A_1/\%$	τ_2/ns	$A_2/\%$	$\tau_{\text{avg}}/\text{ns}$
无	4.16	65.7	35.31	34.3	14.86
有	0.59	99	6.67	1	0.64

2.2 以 P3HT 为空穴传输层的碳基太阳能电池的性能

为了进一步探索 ITO/ $\text{SnO}_2/\text{MAPbI}_3/\text{P3HT}/\text{Carbon}$ 器件的性能, 测量了器件的电流密度-电压(J - V)曲线。从图 6(a) 可以看出, 无 P3HT 空穴传输层时器件开路电压(V_{oc})为 0.86 V, 短路电流密度(J_{sc})为 18.82 mA/cm^2 , 填充因子(F_{F})为 68.92%, 光电转化效率(η)为 11.16%。加入 P3HT 空穴传输层后, 器件的各项参数均得到了改善。 V_{oc} 达到 0.92 V, J_{sc} 达到 19.42 mA/cm^2 , F_{F} 达到 74.83%, η 达到 13.37%, 整体效率比加入 P3HT 前提高了 20%。因此, 进一步证实了引入 P3HT 作为空穴传输层后, 从钙钛矿中提取空穴并传输到碳电极上更为有效。我们测量了光伏器件的外量子效率(η_{ex})。从图 6(b) 可以看出, 在 400~750 nm 范围内, η_{ex} 有

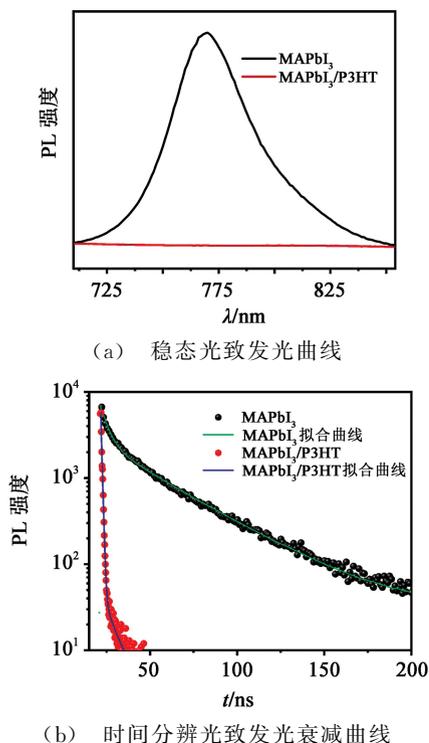


图 5 ITO/ MAPbI_3 和 ITO/ $\text{MAPbI}_3/\text{P3HT}$ 的稳态光致发光及时间分辨光致发光衰减曲线

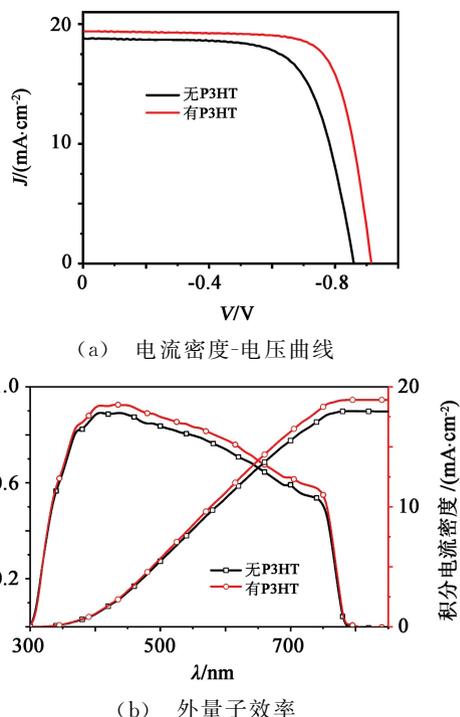


图 6 有/无 P3HT 层时钙钛矿器件的电流密度-电压曲线和外量子效率

明显的改善,这得益于加入空穴传输层之后对载流子更好的收集。同时,引入 P3HT 后,对于电子有一个能级势垒,钙钛矿和碳界面的电子空穴对复合损失也有所减少。这些因素最终导致光电转化效率的提升。

图 7 为有/无 P3HT 条件下碳基钙钛矿太阳能电池的电化学阻抗谱图,图中各点为实测数据,实线为等效电路拟合曲线。测量在暗光条件下进行,频率范围为 $10^{-1} \sim 10^7$ Hz,偏压为 0.92 V。无 P3HT 时器件转移电阻 $R_1 = 1\ 171\ \Omega$,加入 P3HT 之后 $R_1 = 874\ \Omega$ 。可见加入 P3HT 作为空穴传输层之后转移电阻显著减少,这表明原来的 Carbon/MAPbI₃ 接触不佳,加入 P3HT 后,MAPbI₃ 与碳的接触更加光滑和牢固,从而导致电荷转移电阻降低,更有利于载流子的传输,进而提升了器件整体的光电转化性能。

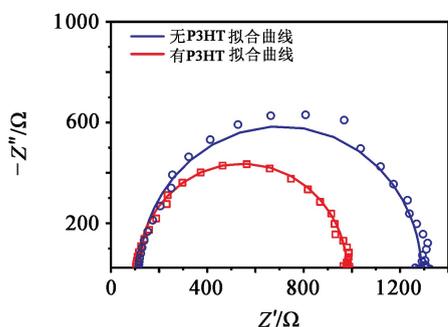


图 7 ITO/SnO₂/MAPbI₃/Carbon 和 ITO/SnO₂/MAPbI₃/P3HT/Carbon 器件的电化学阻抗谱

对于钙钛矿太阳能电池的商业化,器件在连续光照下的稳定性至关重要。为此对其进行了长期的稳定性测试(图 8),包括开路电压、短路电流、填充因子以及光电转化效率的变化情况。未封装的 ITO/SnO₂/MAPbI₃/P3HT/Carbon 和 ITO/SnO₂/

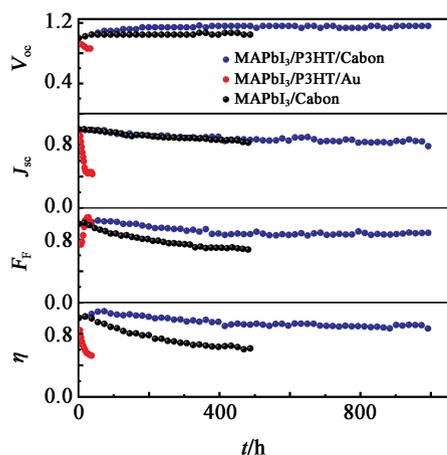


图 8 器件长期稳定性测试

MAPbI₃/Carbon 在氮气环境中被连续光照。加入 P3HT 之前,器件的光电转化效率在 500 h 后下降了 40%;但加入 P3HT 这一空穴传输层之后,器件的稳定性明显提高,开路电压持续上升,最终达到稳定值,而填充因子和短路电流则随时间略有下降。因此在光照 1 000 h 后,P3HT 器件的光电转化效率仍然保持在初始值的 87%。同时,发现金电极与碳电极的稳定性有很大差异。ITO/SnO₂/MAPbI₃/P3HT/Au 的金电极器件的光电转化效率在光照 40 h 后迅速下降到初始值的 50%。这些结果表明碳电极对于提高钙钛矿太阳能电池的工作稳定性具有潜在优势。

3 总结

在本文中,聚合物 P3HT 被用作碳基钙钛矿太阳能电池的空穴传输层。P3HT 使钙钛矿与碳电极之间的能级更匹配,更有利于从钙钛矿层中萃取空穴。引入电子能级势垒可以抑制钙钛矿与碳电极界面的电子-空穴对的复合,降低载流子损耗。随着 P3HT 的引入,光电转化效率增加了 20%。在连续光照 500 h 后,没有 P3HT 的碳基钙钛矿太阳能电池的光电转化效率已下降至初始值的 60%。而加入 P3HT 后,在连续光照 1 000 h 后仍能够保持初始值的 87%,器件的稳定性得到显著提升。该器件结构和制备工艺简单,无需真空工艺,电极材料便宜,有利于钙钛矿太阳能电池的商业化。

参考文献:

- [1] Kojima A, Teshima K, Shirai Y, et al. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells [J]. *J. of the American Chemical Society*, 2009, 131(17): 6050-6051.
- [2] Hu M, Bi C, Yuan Y, et al. Stabilized wide bandgap MAPbBr_xI_{3-x} perovskite by enhanced grain size and improved crystallinity[J]. *Advanced Science*, 2016, 3(6): 1500301.
- [3] Dong Q, Fang Y, Shao Y, et al. Electron-hole diffusion lengths $> 175\ \mu\text{m}$ in solution-grown CH₃NH₃PbI₃ single crystals[J]. *Science*, 2015, 347: 967.
- [4] Aharon S, Gamliel S, Cohen B E, et al. Depletion region effect of highly efficient hole conductor free CH₃NH₃PbI₃ perovskite solar cells [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2014, 16(22): 10512-10518.
- [5] Kim H S, Lee C R, Im J H, et al. Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9% [J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 591.

- [6] Liu M, Johnston M B, Snaith H J. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition[J]. *Nature*, 2013, 501(7467): 395-398.
- [7] Shi D, Adinolfi V, Comin R, et al. Low trap-state density and long carrier diffusion in organolead trihalide perovskite single crystals[J]. *Science*, 2015, 347(6221): 519-522.
- [8] Wu Y, Xie F, Chen H, et al. Thermally stable MAPbI₃ perovskite solar cells with efficiency of 19.19% and area over 1 cm² achieved by additive engineering [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29: 1701073.
- [9] Sahli F, Werner J, Kamino B A, et al. Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency[J]. *Nature Materials*, 2018, 17(9): 820-826.
- [10] Best research-cell efficiencies[EB/OL]. <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.20191106.pdf>, 2019.
- [11] Ku Z, Rong Y, Xu M, et al. Full printable processed mesoscopic CH₃NH₃PbI₃/TiO₂ heterojunction solar cells with carbon counter electrode[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 3132.
- [12] Li H, Cao K, Cui J, et al. 14.7% efficient mesoscopic perovskite solar cells using single walled carbon nanotubes/carbon composite counter electrodes[J]. *Nanoscale*, 2016, 8: 6379-6385.
- [13] Hwang I, Jeong I, Lee J, et al. Enhancing stability of perovskite solar cells to moisture by the facile hydrophobic passivation[J]. *ACS Appl. Mater. & Interfaces*, 2015, 7: 17330-17336.
- [14] Tai Q, You P, Sang H, et al. Efficient and stable perovskite solar cells prepared in ambient air irrespective of the humidity [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11105.
- [15] Rong Y, Hu Y, Mei A, et al. Challenges for commercializing perovskite solar cells[J]. *Science*, 2018, 361: eaat8235.
- [16] Mei A, Li X, Liu L, et al. A hole-conductor-free, fully printable mesoscopic perovskite solar cell with high stability [J]. *Science*, 2014, 345: 295.
- [17] Wu Z, Liu Z, Hu Z, et al. Highly efficient and stable perovskite solar cells via modification of energy levels at the perovskite/carbon electrode interface [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31: 1804284.
- [18] Kim Y C, Jeon N J, Noh J H, et al. Beneficial effects of PbI₂ incorporated in organo-lead halide perovskite solar cells [J]. *Advanced Energy Materials*, 2016, 6: 1502104.
- [19] Ahn N, Jeon I, Yoon J, et al. Carbon-sandwiched perovskite solar cell[J]. *J. of Materials Chemistry A*, 2018, 6: 1382-1389.
- [20] Chu L, Liu W, Qin Z, et al. Boosting efficiency of hole conductor-free perovskite solar cells by incorporating p-type NiO nanoparticles into carbon electrodes[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 178: 164-169.
- [21] Cai C, Zhou K, Guo H, et al. Enhanced hole extraction by NiO nanoparticles in carbon-based perovskite solar cells[J]. *Electrochimica Acta*, 2019, 312: 100-108.
- [22] Zhang F, Yang X, Cheng M, et al. Boosting the efficiency and the stability of low cost perovskite solar cells by using CuPc nanorods as hole transport material and carbon as counter electrode[J]. *Nano Energy*, 2016, 20: 108-116.
- [23] Wu X, Xie L, Lin K, et al. Efficient and stable carbon-based perovskite solar cells enabled by the inorganic interface of CuSCN and carbon nanotubes[J]. *J. of Materials Chemistry A*, 2019, 7: 12236-12243.
- [24] Jiang X, Yu Z, Li H B, et al. A solution-processable copper (ii) phthalocyanine derivative as a dopant-free hole-transporting material for efficient and stable carbon counter electrode-based perovskite solar cells [J]. *J. of Materials Chemistry A*, 2017, 5: 17862-17866.
- [25] Jiang X, Yu Z, Lai J, et al. Interfacial engineering of perovskite solar cells by employing a hydrophobic copper phthalocyanine derivative as hole-transporting material with improved performance and stability [J]. *ChemSusChem*, 2017, 10: 1838-1845.
- [26] Jung E H, Jeon N J, Park E Y, et al. Efficient, stable and scalable perovskite solar cells using poly(3-hexylthiophene) [J]. *Nature*, 2019, 567: 511-515.
- [27] Chu Q Q, Ding B, Peng J, et al. Highly stable carbon-based perovskite solar cell with a record efficiency of over 18% via hole transport engineering [J]. *J. of Materials Science & Technol.*, 2019, 35: 987-993.
- [28] Wang G, Dong W, Gurung A, et al. Improving photovoltaic performance of carbon-based CsPbBr₃ perovskite solar cells by interfacial engineering using P3HT interlayer[J]. *J. of Power Sources*, 2019, 432: 48-54.
- [29] Halder A, Chulliyil R, Subbiah A S, et al. Pseudohalide (SCN⁻)-doped MAPbI₃ perovskites: A few surprises[J]. *The J. of Physical Chemistry Letters*, 2015, 6: 3483-3489.
- [30] Sun M, Liang C, Zhang H, et al. Tailoring a dynamic crystalline process during the conversion of lead-halide perovskite layer to achieve high performance solar cells[J]. *J. of Materials Chemistry A*, 2018, 6: 24793-24804.

作者简介:

万雪健(1994—),男,硕士,主要研究方向为钙钛矿太阳能电池。

MIM 波导结构中的等离激元诱导透明和慢光效应

张利伟^{1,2}, 黄 星¹, 孟威威³, 乔文涛^{2*}

(1. 安庆师范大学 数理学院, 安徽 安庆 246133; 2. 河南理工大学 物理与电子信息学院, 河南 焦作 454003;
3. 电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 成都 610054)

摘要: 基于金属/介质/金属(MIM)波导,提出了一种两侧含有双环、四环谐振腔的等离激元波导滤波结构,采用电磁仿真计算了其电磁传输特性,通过场分布分析了透射谱中通带和谷值产生的物理机理。仿真结果表明该结构可实现等离激元诱导透明(PIT),通过改变谐振腔的有效半径,可调节 PIT 窗口的位置、带宽和慢光效应。计算结果显示在双环和四环谐振结构的 PIT 窗口,可以实现 0.148 和 0.358 ps 的信号延迟。这一特性在可调滤波器器件、光存储器器件和集成光子器件设计上具有潜在应用价值。

关键词: 金属/电介质/金属波导; 等离激元诱导透明; 谐振腔

中图分类号: O436 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0808-07

Plasmon Induced Transparency and Slow Light Effect in MIM Waveguide

ZHANG Liwei^{1,2}, HUANG Xing¹, MENG Weiwei³, QIAO Wentao²

(1. School of Mathematics and Physics, Anqing Normal University, Anqing 246133, CHN; 2. School of Physics and Electronic Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, CHN; 3. State Key Laboratory of Electronic Thin Film and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, CHN)

Abstract: Based on the waveguide structure of metal-dielectric-metal (MIM), a kind of plasma waveguide filter with double-ring and four-ring resonators on both sides was proposed, and its transmission characteristics were calculated by electromagnetic simulations. The physical mechanism of the peak and valley generation in transmission spectrum was analyzed by electromagnetic field distributions. The results show that the structure can realize the plasmon induced transparency (PIT). By adjusting the effective radius of the resonator, the position, bandwidth and slow light effect of the PIT transparent window can be adjusted. The results show that the signal delay of 0.148 and 0.358 ps can be realized in the PIT window of double ring and four ring resonant structures, respectively. This property will have potential applications in the design of tunable filter devices, optical memory devices and integrated photon devices.

Key words: MIM waveguides; plasmon induced transparency; resonator

0 引言

表面等离激元(Surface Plasmon Polaritons, SPP)是一种特殊的电磁模式,多存在于金属介质表面,来源于光子和金属表面电子的相互作用。SPP可沿金属和介质分界面传播,其传播距离可达几微

米^[1-2],其振幅在表面波垂直方向上呈指数衰减。由于具有场局域和增强特性,SPP能在亚波长尺度控制光信号的输运,这些特性使其在高度集成电路和器件中引起广泛关注^[3-4]。在众多 SPP 结构中,介质/金属/介质(IMI)和金属/介质/金属(MIM)波导是最重要的两种。MIM 结构能够在很宽的频率范围内支持深亚波长和低群速度的模式,实现很高的光限制和可接受的传输长度^[5],在光学滤波器^[6-8]、

收稿日期:2020-07-14.

基金项目:国家自然科学基金项目(U1804165).

* 通信作者:乔文涛

E-mail: qwt@hpu.edu.cn

光开关^[9]、传感器^[10-12]等领域得到广泛应用。电磁诱导透明 (Electromagnetically Induced Transparency, EIT) 效应是在原子系统中观察到的一种量子干涉现象, 原子能级之间发生的相消干涉作用导致在材料原本的吸收带上形成一个窄带的透明窗口^[13]。EIT 效应在其透明窗口上有强烈的色散, 预示了慢光实现的可能与信息储存的应用。基于量子 EIT 效应的实现通常需要极低温、强激光等苛刻的实验条件, 使得原子系统中 EIT 的研究和实际应用非常受限^[14]。最近的研究表明, 基于类似的干涉效应可以在经典的光学系统中实现类电磁诱导透明现象, 如在超材料^[14]、光栅、表面等离激元波导等结构中^[15-20]。等离激元诱导透明 (Plasmon-Induced-Transparency, PIT) 是一种类电磁诱导透明, 可在多种谐振器耦合 MIM 波导系统中, 如含有矩形腔^[15-16]、梯形腔^[17-18]、环形腔^[19-20]及方环形腔^[21]的 MIM 等离激元波导结构中实现, 并在透明窗口具有慢波特性的。

文献[19]提出一种双侧环形谐振腔与主波导耦合的 MIM 滤波器结构, 通过模拟计算研究了非对称双环结构参数对滤波性能的影响。文献[20]采用耦合模理论, 从理论和数值两方面研究了双环谐振器耦合 MIM 波导系统中的 PIT 和慢光效应。本文提出了一种主波导两侧含有四环谐振腔的 MIM 结构, 实现了多通道的基于 PIT 效应的透明窗口和慢光特性, 采用理论分析结合电磁仿真研究了结构参数变化对透射性能和慢光效应的影响。在双环和四环谐振结构的 PIT 窗口, 可以实现 0.148 和 0.358 ps 的信号延迟。本文提出的模型结构简单, 对可调滤波器、光存储器件的设计有重要参考价值。

1 理论模型与分析

首先考虑图 1 所示的二维单环型 MIM 等离激元波导滤波器结构, 它包含 MIM 主波导和一个环形谐振腔。其中谐振腔有效半径为 r_1 , 波导宽度和谐振腔宽度均为 w , g 为谐振腔与主波导之间的耦合距离, MIM 波导和环形谐振腔的中间芯层是相对介电常数为 ϵ_d 的电介质, 介质两边为金属银。对于金属银的相对介电常数, 采用 Drude 模型^[22]进行计算, 即

$$\epsilon_{Ag}(\omega) = \epsilon_\infty - \omega_p^2 / [\omega(\omega + i\gamma)] \quad (1)$$

可见金属银的相对介电常数 ϵ_{Ag} 是色散的, 它是入射电磁波角频率 ω 的函数, 这里取 $\epsilon_\infty = 3.7$, 等离共振频率 $\omega_p = 1.29 \times 10^{16}$ Hz, 阻尼系数 $\gamma = 2.73 \times 10^{13}$ Hz。根据电磁场边界连续条件, 可以推出 MIM 波导中对称的 TM 极化表面等离激元的色散关系^[23]:

$$\tanh\left(\frac{\omega k_0 \sqrt{n_{eff}^2 - \epsilon_d}}{2}\right) = -\frac{\epsilon_d \sqrt{n_{eff}^2 - \epsilon_d}}{\epsilon_{Ag} \sqrt{n_{eff}^2 - \epsilon_d}} \quad (2)$$

式中, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的波数, n_{eff} 为 MIM 波导结构的有效折射率。在本文中, 只考虑中介质层宽度 w 比较小的情况, 这就意味着波导中只有表面等离激元导模的传输。

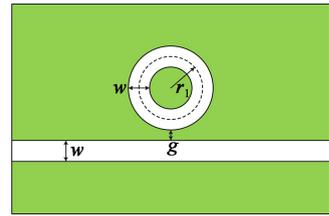


图 1 单环型 MIM 波导滤波器结构

根据式(2)可以计算 MIM 波导结构的有效折射率与波长之间的关系, 如图 2 所示。图 2(a) 是填充介质为空气 $\epsilon_d = 1$ 时, 波导宽度分别为 30, 50, 70 nm 时的波导有效折射率。从图中可以看出, 波导结构的有效折射率 n_{eff} 实部随着波导宽度 w 的增大而减小, 随着入射波长的增加而逐渐减小并趋于稳定。图 2(b) 是波导宽度 $w = 50$ nm 不变, 填充不同介质时的有效折射率, 其中介质的相对介电常数分别为 $\epsilon_d = 1, 2, 3$, 计算结果显示波导结构的有效折射率 n_{eff} 随着填充介质相对介电常数 ϵ_d 的增大而增加。在不同波导宽度和填充介质的情况下, MIM 波导结构的有效折射率总大于 1, 说明这种波导结构可以用来实现亚波长表面等离激元的传播。

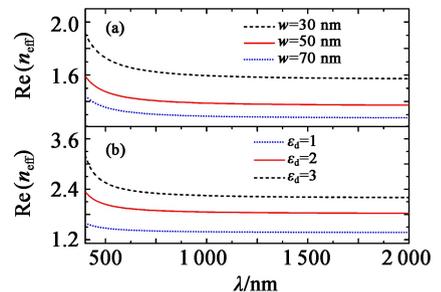


图 2 波导宽度 w 、填充介质不同时, MIM 波导有效折射率实部与波长关系

当电磁波在含环形谐振腔的 MIM 主波导中传

播时,在满足一定条件下电磁波会耦合进入环形谐振腔,在环形谐振腔内形成驻波而产生谐振,使某些特定波长的电磁波不能在主波导中传播,其谐振波长可由^[24-25]

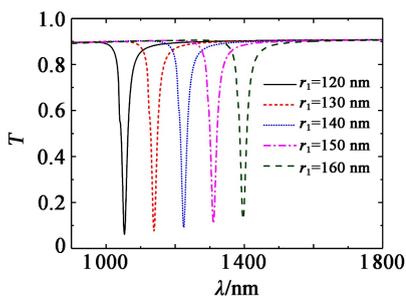
$$2\pi r_1 n_{\text{eff}} = m\lambda \quad (3)$$

确定。式中, n_{eff} 为谐振腔的有效折射率, m 是谐振阶数,如 $m=1,2$ 分别对应一阶和二阶谐振。由于波导结构中横向电磁场是指数量衰减的,谐振时电磁场将局域在谐振腔内。因为表面等离子体在金属中的渗透深度只有几十纳米,所以波导在 z 方向的厚度对传输特性的影响不大^[26],对有限尺度波导的传输性质,我们使用 Comsol Multiphysics 电磁仿真软件进行了二维建模。模拟计算时,设定图 1 左侧为入射端口 port1,右边为输出端口 port2。计算区域以最大单元为 30 nm,最小单元为 0.06 nm 的尺寸划分三角网络,其他区域最大单元为 110 nm,最小单元为 0.375 nm。由于 MIM 波导宽度远小于入射波长,本文只考虑 TM 基模表面等离子体的传输特性。定义透射率 $T=P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$,其中 P_{in} 为入射电磁波功率, P_{out} 为出射电磁波功率。

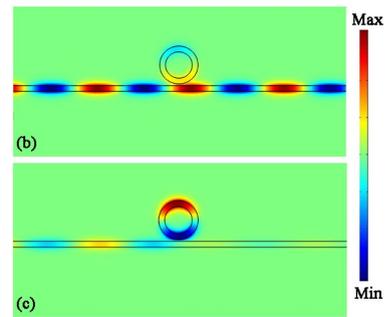
2 仿真结果与分析

2.1 单环型 MIM 波导

首先讨论单环型结构的滤波性能,结构参数分别取 $\omega=50$ nm, $\epsilon_d=1$, $g=15$ nm。图 3(a)为谐振腔有效半径 r_1 分别为 120,130,140,150 和 160 nm 时,单环型 MIM 等离子波导滤波结构在 900~1800 nm 波长范围内的透射谱。从图中可以看出,当 r_1 从 120 nm 增加到 160 nm 时,该滤波结构的谐振波长由 1053 nm 增加到 1397 nm,其中 $r_1=140$ nm 的 MIM 波导结构中,约在 1225 nm 处出现了透射谷。图 3(b)和(c)分别给出了透射率最大值(1107 nm)和最小值(1225 nm)处的磁场分布。从图中可以看出,波长为 1107 nm 的电磁波远离谐振



(a) 不同有效半径下的透射谱



(b-c) 磁场分布图

图 3 单环型 MIM 波导滤波器的透射谱与磁场分布

腔的谐振波长,无法在腔内形成驻波,电磁波几乎可以在波导中无损传输;而波长为 1225 nm 的电磁波耦合进入谐振腔后激发谐振腔一阶谐振形成驻波,电磁波无法通过主波导传输。模拟的透射谱和磁场分布结果与理论分析吻合得非常好。

透射率最小值的位置可以通过改变谐振腔的有效半径进行调控,这一结果可用法布里-珀罗谐振腔原理进行解释。图 4 给出了谐振腔有效半径 r_1 与谐振波长 λ 及透射率最小值 T_{min} 的关系,由图可知结构谐振波长随着谐振腔有效半径的增大而线性增大,并且透射率最小值也略有增加。图 5 给出了耦合距离 g 对单环型结构滤波性能的影响,这里取波导和谐振腔宽度 $\omega=50$ nm,谐振腔有效半径 $r_1=140$ nm。图 5(a)为耦合距离 $g=15,20,25$ 和 30 nm 时,单环型 MIM 等离子波导的透射谱。由图可知当耦合距离 g 从 15 nm 变化到 30 nm 时,透射率最小值对应的波长有一定的移动,由 1225 nm 减小到 1211 nm。由图 5(b)可知随着耦合距离增大,由于环形腔与主波导之间的耦合作用减弱,整个耦合结构的透射谱的半峰宽逐渐减小,透射率最小值逐渐增大。由以上理论分析和电磁仿真可知,单环型 MIM 波导在满足谐振条件下具有滤波功能,可以通过改变谐振腔有效半径以及耦合距离调控耦合结构的滤波性质。

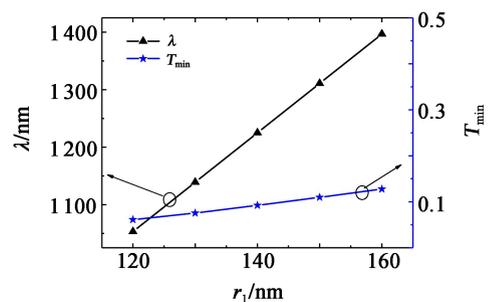
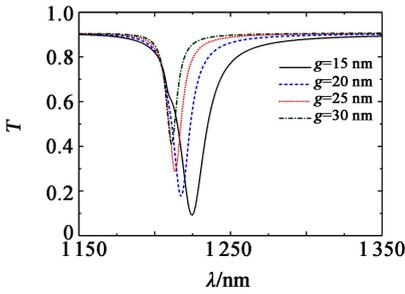
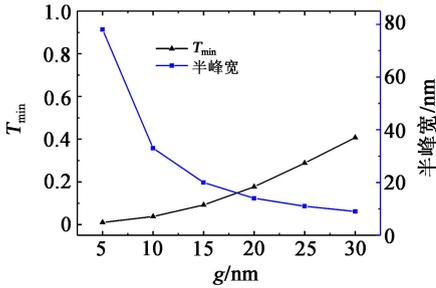


图 4 有效半径与谐振波长及透射率最小值之间的关系



(a) 不同耦合距离下的透射谱

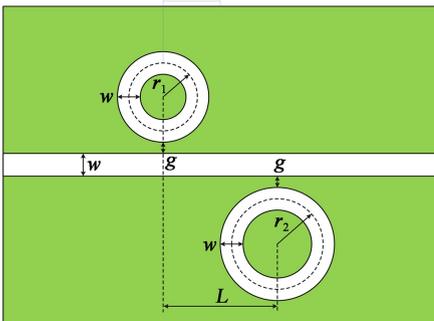


(b) 耦合距离与透射率最小值及半峰宽的关系

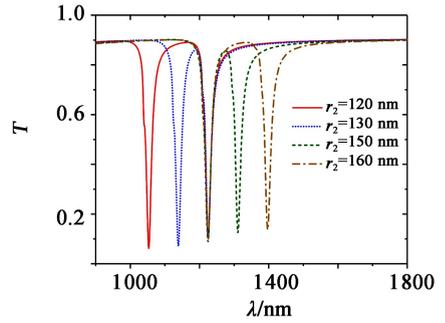
图5 耦合距离对单环型MIM波导滤波器滤波性能的影响

2.2 双环型MIM波导

在图1所示的模型中主波导另一侧增加一个有效半径为 r_2 的环型谐振腔,两腔水平间距为 L ,构成一个双环型MIM波导结构,其模型如图6(a)所示。取 $L=0\text{ nm}$, $g=15\text{ nm}$, $r_1=140\text{ nm}$, 在 r_2 分别取120,130,150和160 nm时,该结构透射谱曲线如图6(b)所示。从图中可以看到,当双侧谐振腔有效半径 r_1 和 r_2 不同时,透射谱中出现了两个透射谷值点,这两个透射谷值分别与两个耦合环所形成的谐振有关。在两个透射谷值之间还出现了一个透射峰。并且发现,在波长域两透射极小值间距和透射峰带宽随着上下环有效半径差值的增大而增大。这是一个典型的等离激元诱导透明效应^[27],这一结果显示,含有双侧谐振环的波导结构可以用来实现一定带宽的滤波功能。另一方面,保持一侧谐振环有效半径 r_1 不变,在改变主波导另一侧谐振环的



(a) 双环型MIM波导滤波器结构



(b) 不同有效半径 r_2 对应的透射谱

图6 双环型MIM波导结构及其透射谱

有效半径 r_2 时,透射谱中1225 nm处出现的透射极小值保持不变。根据前面的仿真结果,我们知道这个透射极小值对应的波长正好是 $r_1=140\text{ nm}$ 的谐振环耦合主波导对应的谐振波长。

为了理解这一PIT效应的内在机制,我们研究了不同透射波长处的场分布。以参数 $L=0\text{ nm}$, $g=15\text{ nm}$, $r_1=140\text{ nm}$, $r_2=150\text{ nm}$ 的结构为例,由图(3)可知上、下环的谐振波长分别为1225和1311 nm。当波长为1225和1311 nm的电磁波耦合进入谐振腔后激发谐振腔一阶谐振形成驻波,电磁波无法继续传输,图7(a)和(b)为其磁场分量赫兹的分布情况。当入射波长位于两谐振波长之间取1275 nm时,SPP在上、下两个环型谐振腔组成的系统中由于电磁干涉产生了等离激元诱导透明响应,从而在1275 nm波长处产生了一个透射峰。图7(c)给出了在透射峰处磁场的分布,从场分布可见波长为1275 nm的电磁波经上、下环耦合后,在主波导处具有 π 相位差,由于上、下谐振环之间的耦合作用,电磁场在主波导中的传播影响很小,从而形成了一个传输通带。当入射波长取1118 nm时,电磁波远离上、下谐振腔的谐振波长,所以两谐振腔与主波导的耦合作用很小,在此波长的电磁波传输基本也不受主波导上、下谐振环的影响,而具有高的电磁传输特性。图7(d)为1118 nm处磁场分量的分布情况,其与理论分析结果相一致。

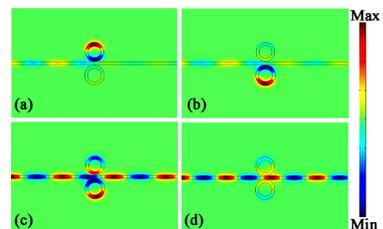
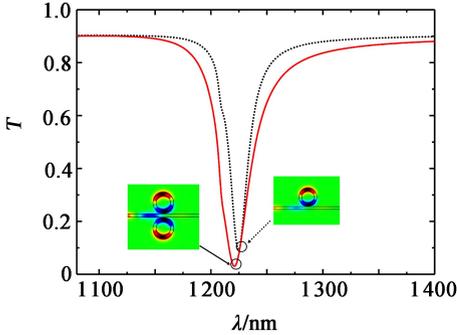
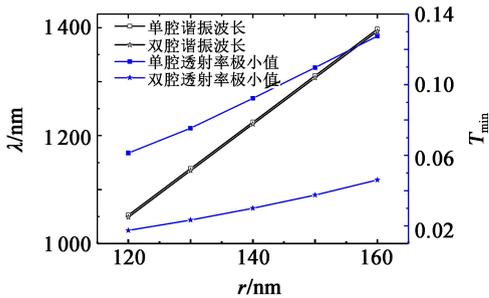


图7 谐振腔有效半径为 $r_1=140\text{ nm}$, $r_2=150\text{ nm}$ 的双环型MIM波导滤波器四种波长处的磁场分布

图 8 给出了固定 $L = 0 \text{ nm}$, $g = 15 \text{ nm}$, 单环结构 $r_1 = 140 \text{ nm}$ 和双环结构 $r_1 = r_2 = 140 \text{ nm}$ 时, MIM 波导滤波器的电磁传输谱。由图 8(a) 可知, 单环、双环结构的谐振波长分别位于 $1\ 225$ 和 $1\ 221 \text{ nm}$ 处, 透射率极小值分别为 0.092 和 0.030 , 透射率极小值变化较明显。这是因为入射电磁波与谐振波长相等时, 耦合进入谐振腔的电磁场形成驻波使得电磁波不能在主波导中传播, 两环结构与单环结构相比耦合作用更强(如图 8(a) 插图两极小值点磁场分布所示), 使得从主波导传播的电磁波更少, 故双环结构可以降低 MIM 波导滤波器透射率的极小值, 增加带宽。图 8(b) 给出有效半径取值为 $120, 130, 140, 150$ 和 160 nm 时谐振波长和透射率极小值。从图中可知, 在不同有效半径下, 双腔耦合都能降低谷值透射率、增加带宽, 但结构的谐振波长基本不变。



(a) 谐振腔有效半径为 140 nm 时, 单环和双环透射谱

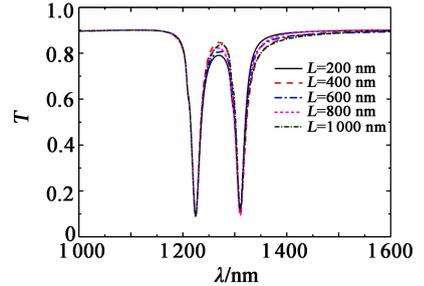


(b) 不同有效半径下, 单环和双环波导结构的谐振波长和透射率

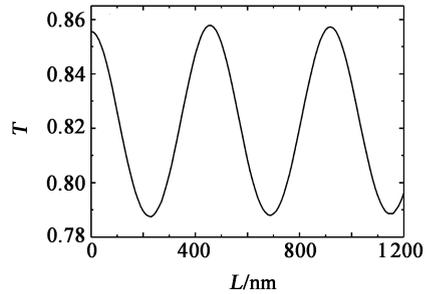
图 8 上、下环有效半径相同时 MIM 波导滤波器的透射规律

为进一步研究结构参数对双环型 MIM 波导滤波器透射谱的影响, 计算了固定参数 $g = 15 \text{ nm}$, $r_1 = 140 \text{ nm}$, $r_2 = 150 \text{ nm}$ 不变, 改变 L 取值时的透射谱, 如图 9 所示。图 9(a) 给出了 $L = 200, 400, 600, 800$ 和 $1\ 000 \text{ nm}$ 时的透射谱, 由图可知 L 取值不同时, 透射率极小值位置无明显变化, 两极小值间透射峰极大值略有变化。图 9(b) 计算了透射谱两

极小值间波长为 $1\ 272 \text{ nm}$ 处、 L 取值 $0 \sim 1\ 200 \text{ nm}$ 时, 双环型 MIM 波导结构电磁传输性质的变化, 由图可知, 此处透射率先降低再增大, 呈周期性变化规律。这是因为波长为 $1\ 272 \text{ nm}$ 的电磁波在谐振腔 r_1 和 r_2 中均无法产生谐振, 但经过谐振腔 r_1 传播的电磁波与经过谐振腔 r_2 传播的电磁波存在固定相位差, 传播 L 距离后发生相位叠加, 从而使得透射率呈周期变化规律。



(a) 不同 L 取值对应的透射谱

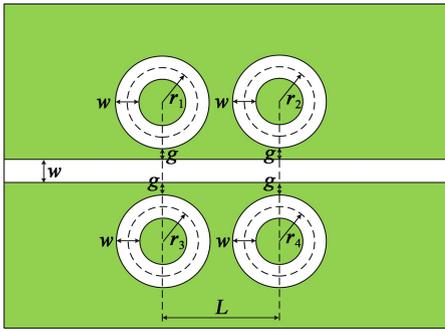


(b) 波长为 $1\ 272 \text{ nm}$ 时不同 L 的透射率

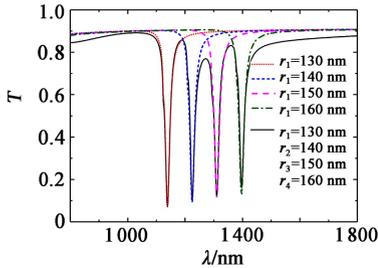
图 9 不同 L 取值时双环型 MIM 波导滤波器透射谱

2.3 四环型 MIM 波导

为了增加结构的可调性, 我们研究了四谐振环耦合主波导的四环结构, 如图 10(a) 所示。在双环右侧 $L = 600 \text{ nm}$ 处再加一对环型谐振腔而构成四环型 MIM 波导滤波器结构, 保持耦合距离 $g = 15 \text{ nm}$ 不变, 四环有效半径从 130 nm 开始以 10 nm 为步长增加。为直观地比较四环型和单环型 MIM 波导滤波器滤波效果, 图 10(b) 同时列出 $r_1 = 130 \text{ nm}$, $r_2 = 140 \text{ nm}$, $r_3 = 150 \text{ nm}$, $r_4 = 160 \text{ nm}$ 的四环结构和 r_1 分别取 $130, 140, 150$ 和 160 nm 的单环型 MIM 波导结构的透射谱。从图 10(b) 可以看出, 在透射谱中分别在波长为 $1\ 187, 1\ 270$ 和 $1\ 360 \text{ nm}$ 处出现了三个透射峰, 出现四个透射谷值, 从而展示了三个 PIT 响应窗口。从图 10(b) 可知, 四环结构的四个透射谷值分别是由半径不同的四个谐振环引起的, 对应的谐振波长分别是 $1\ 138, 1\ 225, 1\ 311$ 和 $1\ 398 \text{ nm}$ 。



(a) 四环型 MIM 波导结构示意图



(b) 四环型和单环型 MIM 波导透射谱

图 10 四环型 MIM 波导结构及其透射谱曲线

固定参数耦合距离 $g = 15 \text{ nm}$, 水平间距 $L = 600 \text{ nm}$ 不变, 定义谐振腔有效半径取 $r_1 = 140 \text{ nm}$, $r_2 = 150 \text{ nm}$, $r_3 = 150 \text{ nm}$, $r_4 = 140 \text{ nm}$ 时为结构 1; 取 $r_1 = 140 \text{ nm}$, $r_2 = 140 \text{ nm}$, $r_3 = 150 \text{ nm}$, $r_4 = 150 \text{ nm}$ 时为结构 2。图 11 给出了 $r_1 = 140 \text{ nm}$, $r_2 = 150 \text{ nm}$ 的双环结构、结构 1 和结构 2 的透射谱曲线。由图 11 可知, 四环型 MIM 波导的结构 1 和结构 2 的透射率极小值比双环结构的更小, 但透明窗口的电磁输运效率却有所下降。四环结构的透射率谷值在 0.02 附近, 而双环结构的透射率谷值在 0.1 附近; 与双环结构相比, 结构 2 透明窗口的透射率峰值从 0.857 降到 0.656, 而结构 1 透明窗口的透射率峰值仅降到 0.814。总的来说, 结构 1 能获得更好的透明窗口。

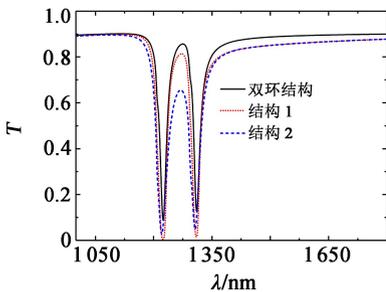


图 11 四环型和双环型 MIM 波导透射谱曲线比较

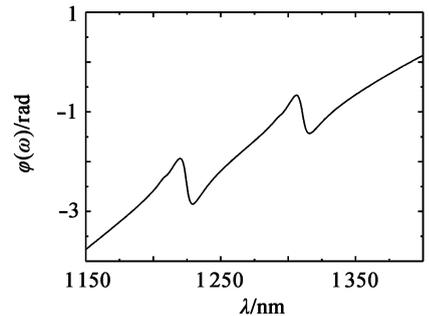
2.4 慢光讨论

类似于原子 EIT 效应, 带谐振腔的 MIM 波导

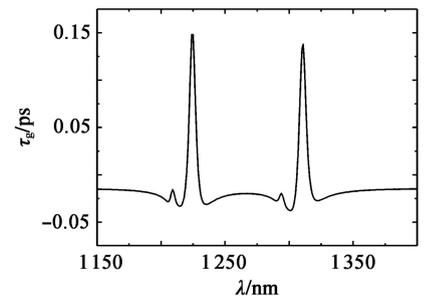
的 PIT 效应具有慢光特性^[28]。慢光效应可用等离子波导的群折射率 n_g 来描述^[29]:

$$n_g = \frac{c}{v_g} = \frac{c}{D} \tau_g = \frac{c}{D} \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} \quad (4)$$

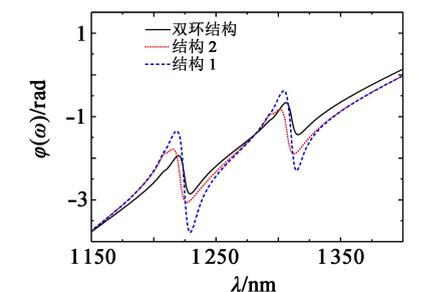
式中, v_g 为等离子波导中的电磁波的群速度, D 为波导的长度, τ_g 为电磁波的时延, $\varphi(\omega)$ 为电磁波的传输相移。先对双环结构进行模拟, 结构参数 $g = 15 \text{ nm}$, $L = 0 \text{ nm}$, $r_1 = 140 \text{ nm}$, $r_2 = 150 \text{ nm}$ 固定不变, 图 12(a) 为该结构的相位图, 在类 PIT 峰两侧透射率极小值处相位有突变, 这种结构在其传输窗口上能实现较大的光延迟。其时延分布如图 12(b) 所示, 在透射率极小值对应波长 1 225 和 1 311 nm 处光时延达到了极大值 0.148 和 0.138 ps。再对四环结构 1 和结构 2 (参数同图 11) 进行计算, 与双环结构比较, 如图 12(c)~(d) 所示。由图 12(c) 可知, 结构 1 和结构 2 在 PIT 峰附近相位斜率均比双环结构大, 相位突变更显著, 故其光延时也应增大; 由图 12(d) 可知结构 1 和结构 2 的光延时峰值分别达到



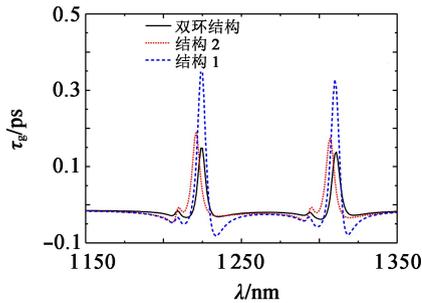
(a) 双环型 MIM 波导结构相位分布图



(b) 双环型 MIM 波导结构延时分布图



(c) 双环型及四环型 MIM 波导结构相位分布比较图



(d) 双环型及四环型 MIM 波导结构延时分布比较

图 12 不同波导结构的相位分布及延时分布图

0.358 和 0.328 ps, 与双环结构相比有较大提高。可见四环结构与双环结构相比, 有更大的光延时。

3 结论

本文采用理论分析结合电磁仿真研究了两侧双环、四环型 MIM 波导结构的电磁传输特性, 由于多谐振腔之间的耦合作用, 该结构可实现可调滤波、PIT 和慢光效应。结果表明, 可通过改变谐振腔的有效半径和耦合距离来调控谐振波长、PIT 窗口以及光信号延迟等。另外发现双环和四环谐振结构的 PIT 窗口, 可以实现 0.148 和 0.358 ps 的信号延迟。这些性质可用于可调滤波器、光存储器件和集成光子器件的设计。

参考文献:

- [1] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- [2] Genet C, Ebbesen T W. Light in tiny holes[J]. *Nature*, 2007, 445(7123): 39-46.
- [3] Neutens P, Dorpe P V, Vlamincq I D, et al. Electrical detection of confined gap plasmons in metal-insulator-metal waveguides[J]. *Nat. Photon.*, 2009, 3(5): 283-286.
- [4] Gramotnev D K, Bozhevolnyi S I. Plasmonics beyond the diffraction limit[J]. *Nat. Photon.*, 2010, 4(2): 83-91.
- [5] Liu D D, Sun Y, Fan Q B, et al. Tunable plasmonically induced transparency with asymmetric multi-rectangle resonators[J]. *Plasmonics*, 2016, 11(6): 1621-1628.
- [6] Rahman M Z U, Krishna K M, Reddy K K, et al. Ultra-wide-band band-pass filters using plasmonic MIM waveguide-based ring resonators[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2018, 30(19): 1715-1718.
- [7] Ebadi S M, Rams B. A dual band-pass plasmonic filter based on stub structure in a MIM waveguide at optical channels [C]//Proc. of 2015 Photonics North IEEE, 2015: 1-1.
- [8] 庞绍芳, 屈世显, 张永元, 等. 基于 L 形谐振腔 MIM 波导结

构滤波特性的研究[J]. *光学学报*, 2015, 36(6): 272-277.

- Pang Shaofang, Qu Shixian, Zhang Yongyuan, et al. Filter characteristic research of MIM waveguide based on L-shaped resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 36(6): 272-277.
- [9] Liu H Q, Ren G B, Gao Y X, et al. Ultrafast and low-power all-optical switch based on asymmetry electromagnetically induced transparency in MIM waveguide containing Kerr material[J]. *Opt. Commun.*, 2015, 353: 189-194.
- [10] Palizvan P, Olyae S, Seifouri M. An optical MIM pressure sensor based on a double square ring resonator[J]. *Photonic Sensors*, 2018, 8(3): 242-247.
- [11] AL-Mahmod M J, Hyder R, Islam M Z. Numerical studies on a plasmonic temperature nanosensor based on a metal-insulator-metal ring resonator structure for optical integrated circuit applications[J]. *Photonic Nanostruct.*, 2017, 25: 52-57.
- [12] Rakhshani M R, Mansouri-birjandi M A. High-sensitivity plasmonic sensor based on metal-insulator-metal waveguide and hexagonal-ring cavity[J]. *IEEE Sensors J.*, 2016, 16(9): 3041-3046.
- [13] Fleischhauer M, Imamoglu A, Marangos J P. Electromagnetically induced transparency: Optics in coherent media[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2005, 77(2): 633.
- [14] Papisimakis N, Fu Y H, Fedoto V V A, et al. Metamaterial with polarization and direction insensitive resonant transmission response mimicking electromagnetically induced transparency[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 94(21): 211902.
- [15] Noual A, Abouti O E, Boudouti E H E, et al. Plasmonic-induced transparency in a MIM waveguide with two side-coupled cavities[J]. *Appl. Phys. A*, 2017, 123(1): 49.
- [16] Liu L, Xia S X, Luo X, et al. Multiple detuned-resonator induced transparencies in MIM plasmonic waveguide[J]. *Opt. Commun.*, 2018, 418: 27-31.
- [17] Wang J C, Niu Y Y, Liu D D, et al. Tunable plasmon-induced transparency effect in MIM side-coupled isosceles trapezoid cavities system[J]. *Plasmonics*, 2018, 13(2): 609-616.
- [18] Liu D D, Fan Q B, Mei M F, et al. Tunable multiple plasmon-induced transparency with side-coupled rectangle cavities[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2016, 14(5): 052302.
- [19] Liu D D, Wang J C, Zhang F, et al. Tunable plasmonic band-pass filter with dual side-coupled circular ring resonators[J]. *Sensors*, 2017, 17(3): 585.
- [20] Zhan S P, Li H J, Cao J T, et al. Slow light based on plasmon-induced transparency in dual-ring resonator-coupled MDM waveguide system[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2014, 47(20): 205101.

(下转第 821 页)

用于卫星次镜座结构的光纤光栅温度传感器设计

王天奇^{1,2}, 孟凡勇^{1,2}, 王永千^{1,2}, 宋言明^{1,2}, 闫光^{1,2*}

(北京信息科技大学 1. 仪器科学与光电工程学院; 2. 光纤传感与系统实验室, 北京 100016)

摘要: 针对太空环境下在轨卫星内部次镜座结构的特殊性,为监测其温度状态,设计了一种金属基底的光纤光栅温度传感器来贴合次镜座使用。通过变换固定点距离,结合光纤温度传感原理以及弯曲栅区的应变状态,设计了结构小、质量轻且可同时多位置测量温度的基底结构。实验测试结果表明,该结构温度传感器中三个波段的线性度均达到了0.999,灵敏度分别为10.78, 10.81和10.36 pm/°C,同一温度下的中心波长波动在±3 pm内,受外界应力影响较小,有良好的重复性。

关键词: 光纤光栅; 温度传感器; 次镜座; 卫星监测

中图分类号: TN253 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0815-07

Design of Fiber Bragg Grating Temperature Sensor for Satellite Secondary Mirror Base Structure

WANG Tianqi^{1,2}, MENG Fanyong^{1,2}, WANG Yongqian^{1,2}, SONG Yanming^{1,2}, YAN Guang^{1,2}

(1. College of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beijing 100192, CHN; 2. Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, CHN)

Abstract: In view of the particularity of the structure of the secondary mirror base in the space environment, it is necessary to monitor its temperature state, thus a FBG temperature sensor with metal base is designed for the application of satellite secondary mirror seat. By changing the distance of fixed points, combining the principle of optical fiber temperature sensing with the strain state of bent gate region, a substrate with small structure and light weight is designed, and also it can realize multi-position temperature measurement simultaneously. Experimental results show that the linearity of the temperature sensor reaches 0.999 in three bands, and the sensitivity is 10.78, 10.81 and 10.36 pm/°C respectively for the three bands. The center wavelength of the sensor fluctuates within ±3 pm at the same temperature, which is less affected by external stress and has good repeatability.

Key words: FBG; temperature sensor; secondary mirror base; satellite monitoring

0 引言

太空环境中存在着各种形态的粒子和场,包括高能带电粒子辐射环境、太阳辐射环境、高低温度交变环境等^[1]。其中,温度场的变化是影响卫星内电子器件正常使用的因素之一,监测卫星的温度场分

布对保障系统的安全运行有很重要的科学意义。和普通的电子类温度传感器相比,光纤光栅温度传感器具有体积小、质量轻及抗电磁干扰等特点^[2],所以被越来越广泛地应用在航天领域中。近几年来,国内外的专家学者对航天环境下卫星结构的温度场监测展开了相关研究。2009年,欧洲太空局的研究人员将光纤栅区封装在陶瓷片上制成温度传感器,安装在 Proba-2 卫星上,在室温和 1 000 °C 之间可稳定

收稿日期:2020-10-15.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51675053).

*通信作者:闫光 E-mail: 1084945257@qq.com

循环工作 50 h 以上^[4];2017 年,北京航空航天大学魏鹏等使用光纤光栅温度传感器监测 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温真空环境下的卫星翼架状态^[4];2019 年,北京卫星环境工程研究所的韩放等利用金属涂覆增敏技术制作了光纤布拉格光栅温度传感器,并将其应用在一 $-110\sim-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温航空环境中^[5]。

虽然针对卫星环境下光纤温度传感器的研究有了一定的进展,但就卫星本身异形复杂结构如何测温没有较多的分析。温度是航空航天领域中的重要考量参数,直接影响卫星中各个电子设备的工作性能、工作寿命及测量精度^[6]。本文针对小型卫星激光通信收发装置中次镜座结构内的温度场分布测量问题,依据光纤传感原理,设计了一种以铝合金材质作为基底的新型环状光纤光栅温度传感器。该传感器可配合卫星次镜座结构,同时解决了光纤光栅温度-应变耦合问题,保证了卫星测温的精度。

1 光纤光栅传感原理

光纤布拉格光栅(简称 FBG)是在单模光纤的纤芯内通过某种方式对其折射率进行周期性调制而形成的一种全光纤器件^[7]。光纤光栅结构如图 1 所示。

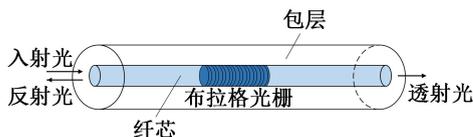


图 1 光纤光栅结构示意图

FBG 是一种空间相位光栅,可以在光纤纤芯内形成,通过光栅前向传输的纤芯模式与后向传输的纤芯模式之间发生耦合,前向传输的纤芯模式的能量可以传递给后向传输的纤芯模式,形成对入射波的反射^[8]。根据以上耦合理论,光纤的中心波长 λ_B 与光栅周期 Λ 的关系为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中, n_{eff} 是光纤纤芯的有效折射率。一般情况下,当光纤所处外界环境的温度、应变发生变化时,由于弹光效应和热光效应的影响,光纤光栅的周期和纤芯折射率会发生变化,波长也会产生相应变化^[9]。

若只考虑应力作用,光纤光栅波长变化 $\Delta\lambda_B$ 与它所受的纵向应变 $\Delta\varepsilon$ 之间的关系为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - \rho_a)\Delta\varepsilon \quad (2)$$

$$\rho_a = \frac{n^2}{2}[\rho_{12} - \nu(\rho_{11} - \rho_{12})] \quad (3)$$

其中, ρ_a 是光纤的弹光系数, ρ_{11} 和 ρ_{12} 是光纤的光学应力张量分量, ν 是泊松系数^[10]。

若只考虑温度变化,光纤光栅波长变化 $\Delta\lambda_{\text{BT}}$ 与外界环境温度变化 ΔT 之间的关系为

$$\Delta\lambda_{\text{BT}} = \lambda_B(1 + \xi)\Delta T \quad (4)$$

其中, ξ 是光纤的热光系数,若忽略波导效应的影响,则在这种情况下光纤光栅的温度灵敏度为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B\Delta T} = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \left[\xi - \frac{n_{\text{eff}}^3}{2}(P_{11} + 2P_{12})\alpha \right] + \alpha \quad (5)$$

式中, α 为光纤的线性热膨胀系数^[11]。

由式(2),(4)可知,光纤光栅受到应力作用或外界温度改变时,其中心波长会发生偏移。由式(5)可知,光纤光栅的温度灵敏度系数与热膨胀系数有关^[12],若用光纤光栅测温,光纤在本身材料不变的情况下,传感器基底可选用热膨胀系数较低的金属材料。

2 次镜座结构特征与光纤光栅温度传感器设计

2.1 次镜座结构特征

卫星次镜座为特殊圆环结构,此结构凹槽内外圆半径分别为 $R_1 = 12\text{ mm}$, $R_2 = 14.5\text{ mm}$,凹槽深度 d 为 4 mm 。次镜座结构如图 2 所示。若要对此结构凹槽部位进行测温,未封装的光纤光栅放入其中会受应变的干扰而导致测温精度降低,所以需要对此结构进行精确分析,设计的传感器应安装在凹槽内部,进行多点测量并合理布局栅区位置,以达到精准测温的目的。

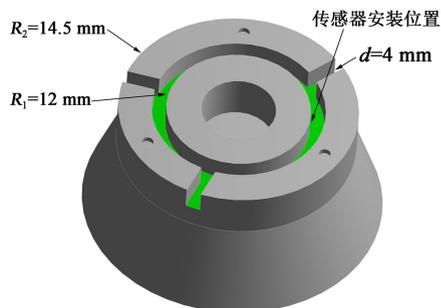


图 2 次镜座结构图

2.2 传感器基底结构设计

在选择传感器基底材料时,考虑到卫星监测对重量的敏感性,以及材料进行热传导的速率,所以选用质量轻、导热快的铝合金 7075-T651 作为基底材料。

为解决传感器与次镜座凹槽匹配度的问题,将传感器的外形设计成环状结构。传感器内的光纤光栅布置在环形中间圈层,光纤圈直径 D 为 26.5 mm,一根光纤上设有 3 个栅区,两端分别点胶固定。当次镜座受到外界应力干扰后,传感器结构可能会产生形变,降低测温准确性,甚至导致获取数据缺失。为了保证传感器内的光栅不受应变影响,只需确定栅区两端固定点距离以及弧高。已知光纤的尺寸,光纤内 3 个栅区的弧高 h 及点胶固定点距离 L 未知,根据传感器内部结构的对称性,只需确定一个栅区即可推出整体固定点布局,所以本文通过变换单个光纤光栅固定点之间的距离与弧高,对不同尺寸光栅受应力影响情况进行仿真分析。

传感器内光纤呈圆环状,半径 $r = 13.25$ mm,两端固定点分别为 A 和 B ,相距 L ,光纤弧度结构如图 3 所示。设弧度为 α ,结合相关定理,弧度 α 与弧高 h 关系为

$$\cos \alpha = \frac{r-h}{r} = 1 - \frac{h}{r} \quad (6)$$

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{h}{r}\right)^2} \quad (7)$$

由式(7)可得出两端固定点相距 L 为

$$L = 2r \sin \alpha = 2r \sqrt{1 - \left(1 - \frac{h}{r}\right)^2} \quad (8)$$

固定点 A, B 在直径处时, L 最大为 26.5 mm,沿垂直中心线往上,距离 L 与弧高 h 逐渐缩小。

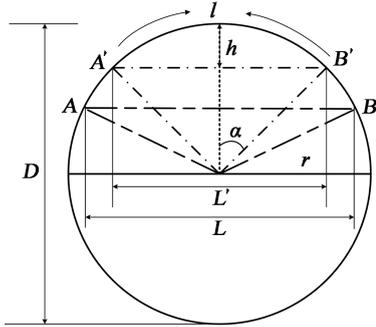


图3 光纤弧度结构示意图

通过改变固定点距离 L 和弧高 h ,按照以上公式进行计算,得到表 1 数据。把栅区固定在基底上,将基底装配在钢材试验件(150 mm × 50 mm × 5 mm)中心位置。根据应力应变理论知识,已知应力 σ 与拉力 F 之间的关系^[13]为

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (9)$$

式中, A 为原始横截面积,并且应变 ϵ 和应力 σ 的关系式为

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (10)$$

式中, E 为材料的弹性模量,由式(9)和(10)可知应变与拉力之间^[14]的关系为

$$\epsilon = \frac{F}{EA} \quad (11)$$

由式(11)可知,应变与拉力成线性关系。设 F 为 30 000 N, $A = 2.5 \times 10^{-4}$, $E = 200$ GPa,则计算可得试验件传递到基底的应变为 $600 \mu\epsilon$;若拉力 F 不变,则传感器底部传递到光纤处的应变不变,此时改变固定点距离以及弧高,则可发现光栅应变量的变化情况。将上述各结构建模仿真,使用 Ansys 有限元仿真软件对试验件施加 30 000 N 的力,将其一端固定,在另一侧施加拉力。以固定点距离为 26.5 mm 为例,由单栅设计整体应变仿真图 4 可以看出,在拉伸时钢材试验件受应变为 $600 \mu\epsilon$ 左右,与上述理论计算结果吻合。图 5 为单个基底结构应变仿真图,最大受力处为 $520 \mu\epsilon$,对比图 6 所示单栅结构应变仿真结果可以发现,栅区应变几乎为零。

表 1 固定点距离、弧高与应变关系

L/mm	h/mm	应变/ $\mu\epsilon$
26.50	13.25	0.67
25.69	10.00	0.42
20.74	5.00	0.43
16.79	3.00	0.41
14.00	2.00	0.84
12.25	1.50	5.76
10.10	1.00	19.00

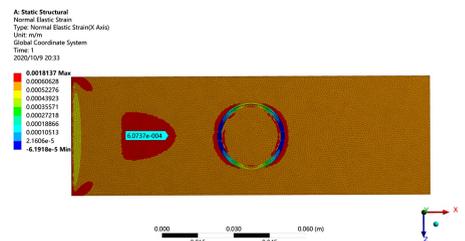


图4 单栅整体应变仿真图

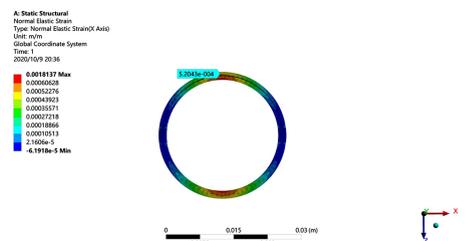


图5 单个基底结构应变仿真图

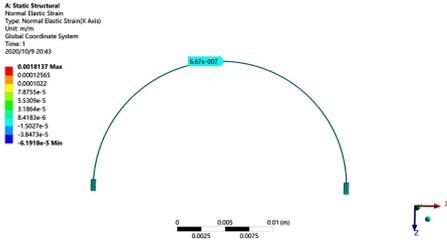


图6 单栅结构应变仿真图

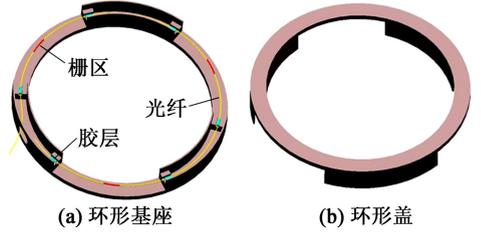


图8 传感器上下部位结构图

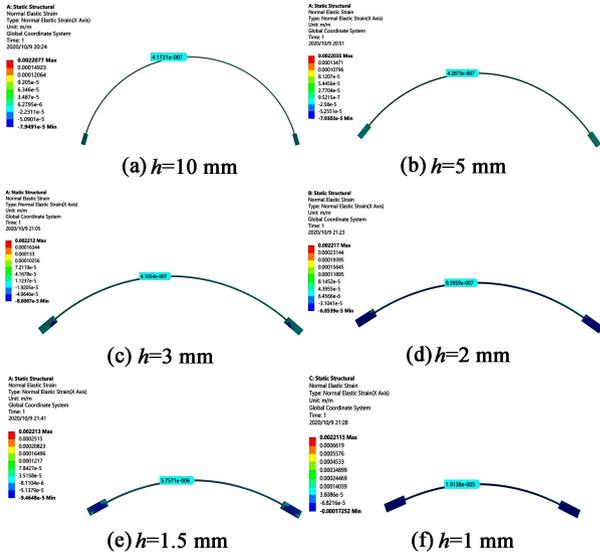


图7 不同弧高仿真图

之后按表1数据改变固定点距离及弧高,依次进行建模仿真,对试验件施加相同的力,各个弧高下仿真结果如图7所示。

从仿真结果可以发现,在固定点相距14~26.5 mm时,栅区受应变影响较小,可忽略不计,在 $L=12.25$ 时栅区受到应变的影响开始变大,为 $5.76 \mu\epsilon$ 。因设有3个栅区,每个栅区固定点距离需分布均匀,且两个相近固定点之间要保留一定距离,方便封装的同时避免数据交叉影响,所以在应变值较小的范围内选择固定点距离最短的14 mm,弧高为2 mm作为传感器尺寸,依此尺寸进行3个栅区布局设计。

栅区固定点距离设为14 mm后,再对其他部位进行设计,为方便栅区封装,留出3个栅区豁口,每个点胶台的高度为0.8 mm,并设有小凹槽可以卡入光纤点胶固化,基底整体高度为2.5 mm,基底外环处留有一孔用于导入光纤。配合基底的上盖设计与基底完全吻合,厚度为0.5 mm,整体结构高为3 mm。环形传感器上下基底结构以及栅区位置如图8所示。

2.3 封装设计

光纤光栅温度传感器中有3个栅区,为了防止在测温时栅区中心波长数据重叠,所以选用3个不同波段的光纤光栅,在常温状态下分别为1 532, 1 534和1 536 nm,定义3个栅区序号分别为1号、2号和3号,栅区长度为5 mm,3个栅区刻在一条光纤上,然后将其封装在传感器中。

在封装时,光纤从圆孔进入,沿着基底中的凹槽顺时针放入,栅区位置分别对应底盘的3个豁口处,栅区在中间位置,然后使用353ND胶固定栅区两侧,完成后在外侧一端光纤加入黑色纤维套管防护,并在入口处使用硅橡胶进行结构封闭,固定套管与光纤。最后以硅橡胶为粘合剂完成上下结构的合并封装,封装过程中注意保持上下端面一致,避免产生相对位移,最后用重物压置24 h。传感器封装完成后的实物照片如图9所示。



图9 传感器封装实物图

3 实验结果分析

3.1 温度传感实验分析

为了验证封装好的传感器能否在卫星次镜座上稳定测温,需要对光纤光栅温度传感器的性能进行实验验证。传感器的重复性、灵敏度以及线性度是考量测温性能的重要标准。

首先,使用高低温试验箱对传感器进行温度循环实验,以检测其重复性。卫星在运行时期,次镜座结构位于热控制系统内,温度控制在 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。所以设置程序将温度控制在10,20,30和 $40 \text{ }^\circ\text{C}$,每个温度点稳定10 min,温度由低到高再变低持续进行

5个循环,观察温度的变化以及温度传感器中各栅区的重复性,温度循环实验测量原理如图10所示。实验过程中使用Labview软件实时记录中心波长,待实验结束导出,并通过Matlab编写程序对数据进行细化处理,找出每个循环中每个温度点停留的中心波长的平均值,5次循环结果如图11所示,横坐标为温度,纵坐标为每个栅区的中心波长值。以第一次循环的数据作为标准,对比之后的4次循环,获得三个波段的波长偏移量,分别如图12(a),(b)和(c)所示。由图12可知,这三个波段在不同温度下中心波长重复性偏差分别在 $\pm 3\text{ pm}$, $\pm 2\text{ pm}$, $\pm 2\text{ pm}$ 内,证明此温度传感器具有良好的重复性。

接着,在试验箱中进行温度标定实验,对传感器的灵敏度和线性度进行标定。设定箱内温度为 $10\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,递增步长为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,记录温度点的中心

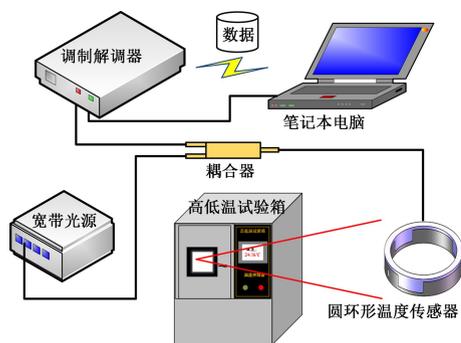


图10 温度循环实验测量原理图

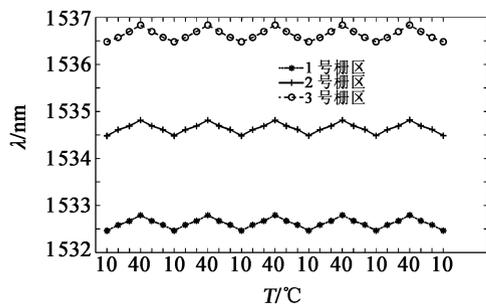
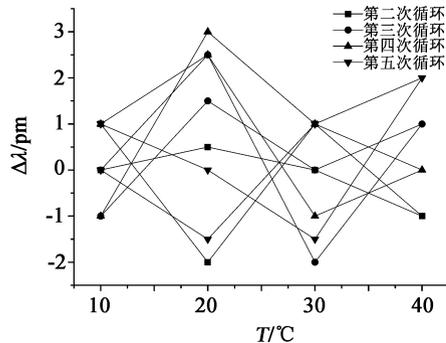
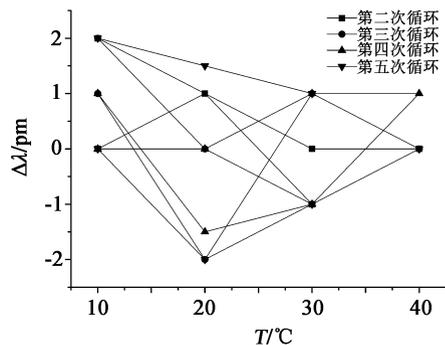


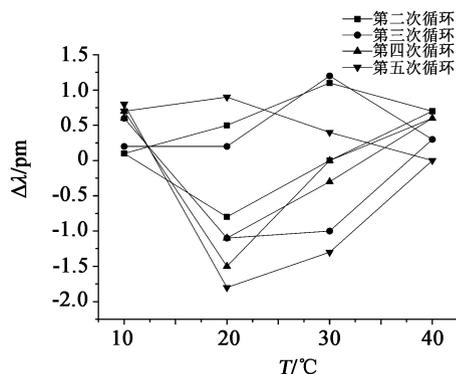
图11 传感器三个栅区温度循环图



(a) 1号栅区



(b) 2号栅区



(c) 3号栅区

图12 传感器重复性偏差曲线图

波长值,利用数据处理软件Origin将3个波段的数据进行温度-中心波长的线性拟合,结果如图13所示。

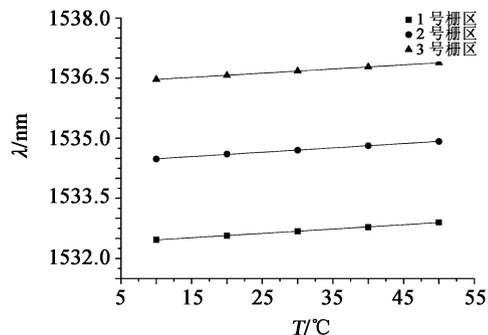


图13 传感器温度-中心波长关系图

分析图13,得到1号栅区的线性度为0.99946,灵敏度为 $10.78\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,中心波长与温度之间的线性关系为

$$\lambda = 1532.3562 + 0.01078T \quad (12)$$

2号栅区的线性度为0.99886,灵敏度为 $10.81\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,中心波长与温度之间的线性关系为

$$\lambda = 1534.3807 + 0.01081T \quad (13)$$

3号栅区的线性度为0.99961,灵敏度为 $10.36\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,中心波长与温度之间线性关系为

$$\lambda = 1\,536.364\,6 + 0.010\,36T \quad (14)$$

根据以上结果,可以发现在 $10\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,传感器内的 3 个栅区具有良好的线性度及灵敏度。

3.2 应变拉伸实验分析

在 MTS 机上进行应变拉伸实验,检测基底发生形变对传感器内光纤光栅产生的影响。在温度恒定的室温环境下,将温度传感器粘贴固定在拉伸件钢板中心位置,然后使用 MTS 机上的夹具夹住拉伸件两端进行拉伸实验。卫星次镜座在工作时,外界环境导致的应变约为 $600\ \mu\epsilon$,因此机器设定程序对拉伸件施加 $0\sim 600\ \mu\epsilon$ 的应变,递增步长为 $100\ \mu\epsilon$,在排除温度对波长的影响后,对获取的三个栅区的中心数据进行对比处理。相较于平稳状态下的波长,拉伸时每个应变节点波长的漂移量变化关系如图 14 所示。

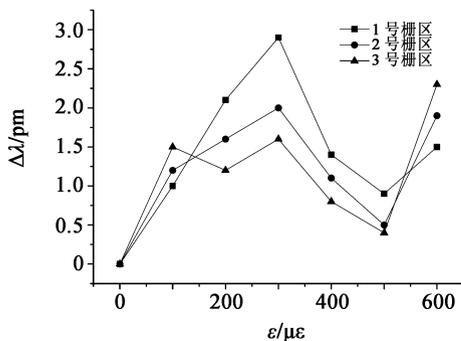


图 14 传感器应变拉伸实验波长漂移量

从图 14 可以看出,对拉伸件进行纵向拉伸,在不同应变下,传感器内三个波段的中心波长漂移量始终在 $3\ \text{pm}$ 范围内,可以证明这种光纤光栅温度传感器受到应变的影响微小,得到的温度数据可靠。

4 结论

本文通过改变环形栅区的固定点距离以及弧高,设计了一种可配合卫星次镜座使用的金属基底的光纤光栅温度传感器。该传感器内设有三个栅区,可以多方位对次镜座进行测温。对封装完成后传感器的灵敏度、线性度以及温度重复性进行了实验检测,发现传感器内三个栅区的灵敏度分别为 $10.78, 10.81$ 和 $10.36\ \text{pm}/^{\circ}\text{C}$,线性度均为 0.999 ,同一温度下中心波长的重复性在 $3\ \text{pm}$ 范围内。以上结果表明传感器内的栅区在环形状态下也可以稳定地监测温度,为环形光纤光栅温度传感器在航天

环境中的应用提供了参考。

参考文献:

- [1] 侯睿,赵尚弘,李勇军,等.空间环境对卫星光通信系统光学器件的影响[J].半导体光电,2010,31(5):771-777.
Hou Rui, Zhao Shanghong, Li Yongjun, et al. The influence of space environment on optical devices of satellite optical communication system [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2010, 31(5): 771-777.
- [2] 任越,张钰民,钟国舜,等.管式光纤光栅高温传感器封装及温度特性[J].激光与红外,2020,50(5):598-601.
Ren Yue, Zhang Yumin, Zhong Guoshun, et al. Package and temperature characteristics of tube-type fiber grating high temperature sensor [J]. Laser & Infrared, 2020, 50(5): 598-601.
- [3] Haddad E, Kruzelecky R, Zou J, et al. Fiber optic high temperature sensors for re-entry vehicles [C]// Proc. of 6th European Symp. on Aerothermodynamics for Space Vehicles, 2009: 659.
- [4] Wei Peng, Liu Jie, Dai Zejing, et al. Monitoring the shape of satellite wing frame using FBG sensors in high electronic noise, vacuum and $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ environment [J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2017.
- [5] 韩放,廖韬,苏新明,等.用于航天环境的布拉格光栅温度传感器灵敏度与精度研究[J].计算机测量与控制,2019,27(10):289-293.
Han Fang, Liao Tao, Su Xinming, et al. Research on sensitivity and accuracy of FBG temperature sensor for aerospace environment [J]. Computer Measurement and Control, 2019, 27(10): 289-293.
- [6] 卢建中,孟凡勇,闫光,等.卫星镜头结构光纤光栅温度传感器研究[J].激光与红外,2019,49(10):1252-1259.
Lu Jianzhong, Meng Fanyong, Yan Guang, et al. Research on the FBG temperature sensor with satellite lens structure [J]. Laser & Infrared, 2019, 49(10): 1252-1259.
- [7] 杨兴,胡建明,戴特力.光纤光栅传感器的原理及应用研究[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2009,26(4):101-105.
Yang Xing, Hu Jianming, Dai Teli. Research on the principle and application of FBG sensor [J]. J. of Chongqing Normal University (Natural Science Edi.), 2009, 26(4): 101-105.
- [8] Wang C, Zhang Y, Sun J, et al. Research on a fiber Bragg grating temperature measurement method for inter-satellite laser link [J]. Rev. of Scientific Instruments, 2020, 91(1): 015007.
- [9] Wang L, Wang Y, Wang J, et al. A high spatial resolution FBG sensor array for measuring ocean temperature and depth [J]. Photonic Sensors, 2020, 10(1): 57-66.
- [10] Kingsbury R W, Riesing K M, Cahoy K L, et al. Free-space optical communication module for small satellites: US, 20180076895 [P]. 2017.

- [11] Ibrahim S K, McCue R, O'Dowd J A, et al. Demonstration of strain independent temperature measurements using optical PM-FBG sensors for ground testing of satellite panels[C]// Proc. of Inter. Conf. on Space Optics—ICSO 2018. Inter. Society for Optics and Photonics, 2019, 11180: 111807B.
- [12] Gao X, Ning T, Zhang C, et al. A dual-parameter fiber sensor based on few-mode fiber and fiber Bragg grating for strain and temperature sensing[J]. Opt. Commun., 2019, 454: 124441.
- [13] 闫光, 卢建中, 张开宇, 等. 温度解耦大量程光纤光栅应变传感器[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(5): 1682-1688.
- Yan Guang, Lu Jianzhong, Zhang Kaiyu, et al. Temperature

decoupled large range FBG strain sensor [J]. J. of Jilin University (Engin. Edition), 2019, 49(5): 1682-1688.

- [14] Nandini Basumallick, Palas Biswas, Kamal Dasgupta, et al. Design optimization of fiber Bragg grating accelerometer for maximum sensitivity[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2013: 194.

作者简介:

王天奇(1994—),女,硕士生,主要研究方向为光纤传感与光电器件;

闫光(1979—),男,博士,讲师,硕士生导师,主要从事光纤激光器与传感器的研究。

(上接第 814 页)

- [21] Akhavan A, Ghafoorifard H, Abdolhosseini S, et al. Metal-insulator-metal waveguide-coupled asymmetric resonators for sensing and slow light applications[J]. IET Optoelectron., 2018, 12(5): 220-227.
- [22] Han Z, Forsberg E, He S. Surface plasmon Bragg gratings formed in metal-insulator-metal waveguides [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2007, 19(2): 91-93.
- [23] Dionne J A, Sweatlock L A, Atwater H A, et al. Plasmon slot waveguides: Towards chip-scale propagation with subwavelength-scale localization[J]. Phys. Rev. B, 2006, 73(3): 035407.
- [24] Wang T B, Wen X W, Yin C P, et al. The transmission characteristics of surface plasmon polaritons in ring resonator [J]. Opt. Express, 2009, 17(26): 24096-24101.
- [25] Setayesh A, Mirnaziry S R, Abrishamian M S. Numerical investigation of a tunable band-pass plasmonic filter with a hollow-core ring resonator [J]. J. Opt., 2011, 13(3): 035004.

- [26] Kurokawa Y, Miyazaki H T. Metal-insulator-metal plasmon nanocavities: Analysis of optical properties[J]. Phys. Rev. B, 2007, 75(3): 035411.
- [27] Kekatpure R D, Barnard E S, Cai W S, et al. Phase-coupled plasmon-induced transparency[J]. Phys. Rev. Lett., 2010, 104(24): 243902.
- [28] Lu Q, Wang Z Z, Huang Q Z, et al. Plasmon-induced transparency and high-performance slow light in a plasmonic single-mode and two-mode resonators coupled system[J]. J. Lightwave Technol., 2017, 35(9): 1710-1717.
- [29] Mario L Y, Chin M K. Optical buffer with higher delay-bandwidth product in a two-ring system[J]. Opt. Express, 2008, 16(3): 1796-1807.

作者简介:

张利伟(1979—),男,博士,副教授,主要从事表面等离子激元、超材料等方面的研究;

乔文涛(1982—),男,硕士,副教授,主要从事表面等离子激元波导及其应用技术方面的研究。

基于光学干涉法的翻新电子元器件鉴别方法

温景超*, 吴立强, 赵彦飞, 于 望

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: 翻新电子元器件存在重大质量隐患,对航天装备的质量和安​​全构成了严重威胁。为了确保装机电子元器件的质量和可靠性,结合翻新元器件的特点,提出了一种鉴别翻新元器件的无损检测方法。首先,阐述了翻新元器件的检测方法和原理,即通过光学干涉法定量测量器件上下表面的粗糙度,并根据二者之间的差异来判断器件表面是否经过翻新处理。然后,采用该方法对正常元器件和翻新元器件的表面粗糙度差异进行对比检测分析,并进行不确定度评定。结果表明,该方法可用于对翻新元器件进行高效准确鉴别。这为全面提升航天电子元器件的质量提供了新的检测手段。

关键词: 翻新元器件; 鉴别方法; 表面粗糙度; 光学干涉法; 无损检测

中图分类号: TN306 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0822-05

Identification Method of Refurbished Electronic Components Based on Optical Interferometry

WEN Jingchao, WU Liqiang, ZHAO Yanfei, YU Wang

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, CHN)

Abstract: Refurbished electronic components present serious potential quality problems, which will pose serious threats to the quality and safety of space equipments. In order to ensure the quality and reliability of installed electronic components, a nondestructive measurement method is proposed for identifying refurbished components based on their characteristics. Firstly, the measurement methods and principles are described; the roughness of both the top and the bottom surfaces of the device is measured quantitatively by optical interferometry, and then the difference between the two roughness values will be used to judge whether the surface of the device was refurbished or not. Lastly, the surface roughness of the normal and refurbished components is compared and analyzed, and the uncertainty evaluation is carried out. It is shown that this method can be used to identify refurbished components efficiently and accurately. It provides a new measurement method for improving the quality of aerospace electronic components.

Key words: refurbished components; identification method; surface roughness; optical interferometry; nondestructive measurement

0 引言

近年来,国产电子元器件的发展取得了重大突破,但航天用电子元器件尚未实现百分百自主可控,

部分大规模或超大规模集成电路依然需要进口。受供货渠道影响以及商业利益的驱动,越来越多的翻新进口元器件进入军用产品供应链^[1-3]。由于翻新元器件一般为淘汰的、使用过的、低质量等级的或是制造过程中的废次品、假冒品,其潜在的过电损伤、芯片腐蚀、芯片微损伤等质量风险无法通过检验或

收稿日期:2020-08-03.

* 通信作者:温景超

E-mail: wenjingchao521@163.com

筛选的手段进行有效剔除^[4-5],装机后可能会导致整机故障,严重影响航天装备的质量和可靠性。因此,对进口元器件进行真伪鉴别是航天电子元器件质量保证过程中不可或缺的重要环节。

目前,航天系统内元器件质量保证机构已经针对翻新元器件的鉴别方法和手段开展了大量的研究工作,并通过工程实践取得了良好效果。其中,普遍采取的方法主要有^[6-7]:(1)翻新痕迹检查。借助显微镜对元器件的引脚、表面边缘、表面纹理、定位环等进行检查,以确定是否存在使用痕迹或打磨痕迹。(2)信息比对分析。通过外观检查、X射线检查、超声检查、芯片镜检等手段来获取元器件的外观标识、结构工艺、芯片版图等信息,并与原厂正常器件进行差异比对分析。实践证明,这些方法只能实现检测结果的定性表征,过多依赖于检验人员的经验和技能,存在漏检风险。为此,本文在上述方法的基础上提出了一种新方法——基于光学干涉技术测量元器件表面粗糙度的方法,具有无损、定量的优点,可实现对进口翻新元器件的快速识别和分析,对提高航天用进口元器件的质量和可靠性具有重要意义。

1 机理分析与测量方法

1.1 机理分析

翻新元器件通常是将淘汰品、拆机件、废次品或低等级产品经过表面研磨、喷涂以及打标处理后作为新品重新投入使用。对于塑封器件来说,打磨几乎是翻新元器件所必须的工序^[8],此外还需要进行喷涂处理,其目的主要是为了改变元器件表面的原有标识。由于打磨和喷涂一般发生在元器件上表面,经过打磨或者喷涂的元器件,其上表面粗糙度会发生变化,从而导致元器件上下表面粗糙度不一致。因此,可将上下表面粗糙度差异作为鉴别翻新元器件的重要特征。

表面粗糙度是反映工件表面微观几何形状偏差的一个重要指标^[9]。用于表征表面粗糙度的参数有很多,其中最常用的是粗糙度轮廓的算术平均值 R_a 和均方根值 R_q 。 R_a 是指在一个取样长度内纵坐标 $Z(x)$ 绝对值的算术平均值, R_q 是在一个取样长度内纵坐标 $Z(x)$ 的均方根值,表达式分别为^[10]

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (1)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx} \quad (2)$$

其中, l 为取样长度, $Z(x)$ 为表面粗糙度轮廓的纵坐标曲线函数,如图1所示。

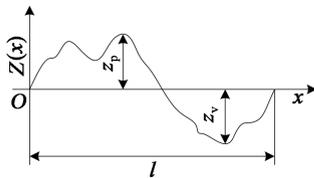


图1 表面粗糙度轮廓坐标示意图

1.2 测量方法选取

常用的表面粗糙度测量方法有比较法、针描法、光学干涉法等。其中,比较法和针描法属于接触式测量方法,光学干涉法属于非接触式测量法,具有快速、无损、可在线测量等优点,弥补了传统接触测量方法的不足,在小尺寸平面以及小尺寸曲面测量方面优势明显^[11]。对于电子元器件来说,其外形尺寸较小且对表面粗糙度的测量精度要求较高,故选取光学干涉法对元器件的表面粗糙度进行测量。

采用光学干涉法测量元器件表面粗糙度的原理如图2所示。由光源发出的光束经过滤波器后由分光镜分成两束,其中一束由参考表面反射回来,另一束由被测工件表面反射。两束光因存在光程差而发生干涉,经过显微物镜放大后在成像平面上形成干涉图像,并被CCD传感器接收。当压电驱动器驱动显微物镜在垂直方向进行扫描时,两束光的光程差发生改变,导致干涉图像也随之改变。被测工件的表面粗糙度轮廓信息被编码到干涉条纹图像的强度、光谱成分及对比度等信息中,从而利用光学干涉条纹的特殊性质来进行表面微观形貌的测量^[11]。

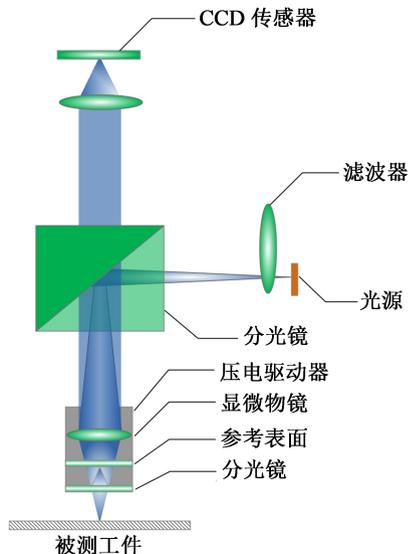


图2 光学干涉法测量表面粗糙度原理示意图

2 实验结果分析与讨论

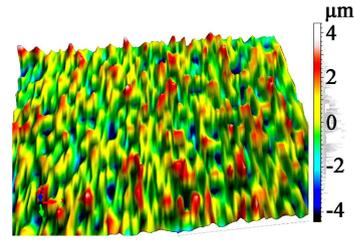
2.1 实验条件选取

实验样品选取 14 只进口塑封集成电路,其中包括 7 只正常器件(编号为 n1~n7)和 7 只已知翻新器件(编号为 r1~r7)。器件表面粗糙度测量选取瑞士 TRIMOS 公司的 TR-SCAN 微观形貌测量仪,其测量精度高达纳米级。

样品器件正反面均为黑色,反光能力较差,因此测量结果选取三次测量结果的平均值。由于芯片尺寸较小且表面有标识,为不影响测量结果,在测量时需要避开器件表面标识和定位孔位置,测量长度根据实际情况选择 1.24 mm,高斯滤波为 0.25 mm。

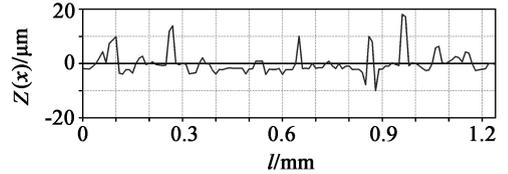
2.2 器件表面粗糙度测量

选择 1 只翻新器件(编号为 r7),测量其上表面和下表面的粗糙度,已知该器件上表面经过打磨和喷涂处理。图 3 为测量的器件上表面和下表面三维图像,可以看出,器件上表面和下表面的粗糙度轮廓明显存在差异,其中下表面粗糙度轮廓纵坐标在 $-4 \sim +4 \mu\text{m}$ 之间,而上表面粗糙度轮廓纵坐标在 $-10 \sim +20 \mu\text{m}$ 之间,这说明上表面比下表面粗糙。图 4 为测量的器件上表面和下表面二维轮廓曲线。通过曲线可以提取出 R_q, R_v, R_z, R_c 等多个反映器件表面粗糙度的参数值,如表 1 所示。其中算术平均值 R_a 和均方根值 R_q 能更好地反映粗糙度的整

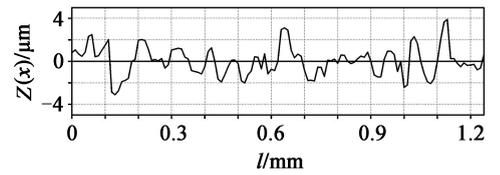


(b) 下表面

图 3 器件表面三维图像



(a) 上表面



(b) 下表面

图 4 器件表面二维轮廓曲线

体水平, R_a 和 R_q 的值越大,说明器件表面越粗糙。通过测量的 R_a 值和 R_q 值可以看出,器件上表面粗糙度明显大于表面粗糙度,结果与三维图像中反映的现象一致。

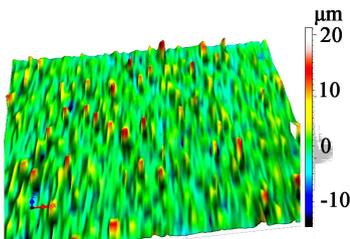
2.3 测量结果分析

对 14 只样品器件上下表面的 R_a 和 R_q 值进行测试和分析,测试结果如表 2 所示。表中 R_{a-T}, R_{a-B} 分别为器件上表面和下表面的粗糙度算术平均值, R_{q-T}, R_{q-B} 分别为器件上表面和下表面的粗糙度均方根值。从表中可以看出,7 只正常器件的上表面粗糙度算术平均值和均方根值与下表面差异均较小,其中 4 只器件上表面粗糙度比下表面小,3 只器件上表面粗糙度比下表面大,该差异主要是由测试误差、仪器精度等因素引起的;7 只翻新器件的上表面粗糙度算术平均值和均方根值与下表面差异相对较大,其中 6 只器件的上表面粗糙度比下表面大,1 只器件的上表面粗糙度比下表面小。这说明,器件经过打磨处理后,上表面粗糙度既可能比原来小,也可能比原来大,具体情况取决于翻新打磨工艺的水平,但经过打磨的元器件很难保持原有的粗糙度。

将翻新器件的上下表面粗糙度差异与正常器件进行对比,图 5(a)和(b)分别为翻新器件和正常器件的上下表面粗糙度 R_a 差异绝对值($|\Delta R_a|$)和 R_q

表 1 器件表面粗糙度测量结果 单位: μm

参数	上表面	下表面
R_p	7.845	1.955
R_v	4.628	1.780
R_z	12.47	3.734
R_c	7.125	2.724
R_t	17.28	5.337
R_a	1.764	0.951 3
R_q	2.685	0.966 6
R_{sk}	1.222	0.057 79
R_{ku}	5.138	2.614



(a) 上表面

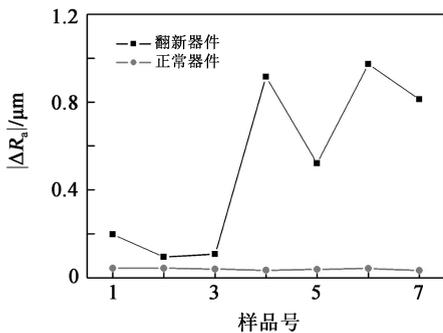
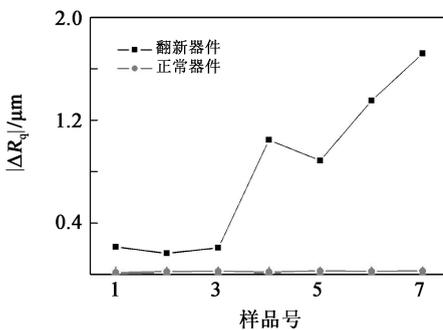
差异绝对值($|\Delta R_q|$)。从图中可以看出,正常器件上下表面粗糙度差异均维持在一个相对稳定的水平, $|\Delta R_a|$ 为33.6~44 nm, $|\Delta R_q|$ 为0.015~0.027 nm,差异水平接近于测量仪器的测试精度;翻新器件上下表面粗糙度差异比较明显, $|\Delta R_a|$ 最

小为95.5 nm,最大达到了973.4 nm, $|\Delta R_q|$ 最小为165.4 nm,最大达到了1 718.4 nm。综上分析,可以根据器件上下表面粗糙度差异大小来判断器件是否为翻新器件。

表2 正常器件和翻新器件的表面粗糙度

单位: μm

编号	正常器件				翻新器件			
	R_{a-T}	R_{a-B}	R_{q-T}	R_{q-B}	R_{a-T}	R_{a-B}	R_{q-T}	R_{q-B}
n1/r1	1.840	1.884	2.300	2.315	0.938 8	0.740 9	1.219	1.007
n2/r2	1.506	1.550	2.107	2.130	0.763 0	0.667 5	1.085	0.919 6
n3/r3	0.755 1	0.719 4	0.907 5	0.882 7	0.798 1	0.689 9	1.046	0.839 7
n4/r4	0.693 1	0.657 9	0.921 3	0.901 2	1.031	1.946	1.377	2.422
n5/r5	0.983 8	0.945 7	1.275	1.249	1.513	0.991 5	2.102	1.215
n6/r6	0.631 6	0.673 8	0.789 6	0.813 9	1.808	0.834 6	2.355	1.001
n7/r7	0.854 9	0.879 5	1.124	1.151	1.764	0.951 3	2.685	0.966 6

(a) $|\Delta R_a|$ (b) $|\Delta R_q|$ 图5 翻新和正常器件的上下表面粗糙度差异绝对值 $|\Delta R_a|$ 和 $|\Delta R_q|$

2.4 测量的不确定度评定

以样品器件(编号 r7)的 R_a 测量结果为例,对器件表面粗糙度测量的不确定度进行评定。

(1) 来源分析

在对器件的表面粗糙度进行测试时,测量的不确定度主要取决于测试的重复性和测试仪器的不准确性。

(2) 标准不确定度分量计算

测量仪器采样的位置不同会对测量结果的重复

性产生影响,采用不确定度的A类评定。首先,使用测量仪器对器件表面粗糙度进行重复测量10次,测量结果如表3所示,用10次测量结果的实验标准偏差表征A类标准不确定度。在实际测量过程中,测量结果一般取3次测量的平均值,其标准不确定度分量 $u_A(C)$ 计算如下:

$$u_A(C) = \frac{S(C)}{\sqrt{n}} = \frac{0.0147}{\sqrt{3}} = 0.0085 \quad (3)$$

其中, $u_A(C)$ 为测试重复性引入的不确定度分量, $S(C)$ 为实验标准偏差, n 为测量次数。那么,其相对标准不确定度分量为

$$u_{Arel}(C) = \frac{u(C)}{R_a} \times 100\% = 0.49\% \quad (4)$$

测试仪器不准确产生的标准不确定度采用不确定度的B类评定。该仪器的最大误差为5%,根据均匀分布计算其相对标准不确定度分量:

$$u_{Brel}(C) = \frac{5\%}{\sqrt{3}} \times 100\% = 2.89\% \quad (5)$$

(3) 合成标准不确定度计算

合成标准不确定度的计算公式^[11]为

$$u_C^2 = [C(C) \times u_{Arel}(C)]^2 + [C(C) \times u_{Brel}(C)]^2 \quad (6)$$

式中, $C(C)=1$,为输入量 C 的灵敏系数。根据式(6)计算合成的相对不确定度为

$$u_C = \sqrt{(1 \times 0.49)^2 + (1 \times 2.89)^2} \% = 2.93\%$$

(4) 扩展相对不确定度计算

扩展相对不确定度的计算公式为

$$U = k u_C \quad (7)$$

式中, k 为包含因子。取 $k=2$,则置信概率 $p=$

95%,可以得出:

$$U = 2 \times 2.93\% = 5.86\%$$

扩展相对不确定度的评定结果为5.86%,小于10%,利用光学干涉法测量器件的表面粗糙度满足精度要求。因此,通过光学干涉法测量元器件上下表面粗糙度差异来对翻新元器件进行鉴别具有实际意义。

表3 测量结果和实验标准偏差

实验编号	$C/\mu\text{m}$
1	1.749
2	1.768
3	1.727
4	1.735
5	1.746
6	1.751
7	1.764
8	1.732
9	1.759
10	1.724
平均值 \bar{R}_a	1.746
$S(C)$	0.0147

3 结论

电子元器件经过翻新处理后,其上下表面粗糙度会存在明显差异。基于该特点,利用光学干涉法测量器件上表面和下表面的粗糙度,通过分析二者之间的差异来鉴别器件是否经过翻新处理。算术平均值 R_a 和均方根值 R_q 作为表征器件表面粗糙度的重要参数,经过对测量结果进行不确定度评定,得出其扩展相对不确定度小于10%,满足实际测量精度需求。该检测方法具有定量、无损、高效等优点,可用于鉴别翻新电子元器件,对于提高航天电子元器件的质量控制水平,进而确保航天装备的质量和可靠性具有重要意义。

参考文献:

- [1] 胡开博,张倩,杨志维. 美军仿冒电子元器件问题现状及对策[J]. 全球科技经济瞭望, 2014, 29(4): 21-26.
Hu K B, Zhang Q, Yang Z W. Issue of counterfeit electronic component in the United States and its countermeasures[J]. Global Science, Technology and Economy Outlook, 2014, 29(4): 21-26.
- [2] 张倩. 封装形式对电子元器件长期储存可靠性研究[J]. 电子元件与材料, 2017, 36(6): 99-104.
Zhang Q. Reliability study of long-term storage for electronic component packaging [J]. Electronic Components and Materials, 2017, 36(6): 99-104.

- [3] 周帅,彭泽亚. 假冒翻新塑封器件鉴别的方法和程序[J]. 中国测试, 2015(S1): 120-123.
Zhou S, Peng Z Y. Methods and procedures to identify counterfeit and refurbished devices in plastic package[J]. China Measurement & Test, 2015(S1): 120-123.
- [4] 魏爱新. 假冒钽电容辨识[J]. 电子元件与材料, 2014, 33(2): 71-75.
Wei A X. Recognition for counterfeit Ta-capacitor [J]. Electronic Components and Materials, 2014, 33(2): 71-75.
- [5] Stradley J, Karraker D. The electronic part supply chain and risks of counterfeit parts in defense applications[J]. IEEE Trans. on Components and Packaging Technologies, 2006, 29(3): 703-705.
- [6] 高金环. 翻新伪造电子元器件的鉴别[J]. 电子科技, 2014, 27(8): 50-56.
Gao J H. Discrimination of counterfeit imported electronic parts [J]. Electronic Science and Technology, 2014, 27(8): 50-56.
- [7] 刘平. 假冒电子元器件的识别与分析[J]. 电子元件与材料, 2012, 31(2): 59-60.
Liu P. Identification and analysis on counterfeit electronic components[J]. Electronic Components and Materials, 2012, 31(2): 59-60.
- [8] 杨城,张吉,马清桃,等. 基于封装工艺识别翻新塑封集成电路[J]. 电子与封装, 2013, 13(10): 5-9.
Yang C, Zhang J, Ma Q T, et al. Detect the remark plastic ICs on the basis of packing technology[J]. Electronics & Packing, 2013, 13(10): 5-9.
- [9] 刘晨,卢荣胜,陈磊,等. 基于光学法表面粗糙度的测量研究进展[J]. 半导体光电, 2010, 31(4): 495-500.
Liu C, Lu R S, Chen L, et al. Progress of surface roughness measurement based on optical method [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2010, 31(4): 495-500.
- [10] 全国产品尺寸和几何技术规范标准化技术委员会. GB/T 3505-2009 产品几何计数规范(GPS)表面结构轮廓法术语定义及表面结构参数[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
CSBTS/TC240. GB/T 3505-2009 Geometrical product specifications(GPS)—Surface texture: profile method—terms, definitions and surface texture parameters [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [11] 刘姗姗,刘大亮,刘兆宾,等. 光学干涉法在航天阀门产品表面粗糙度测量中的应用[J]. 制造技术与机床, 2017(3): 116-120.
Liu S S, Liu D L, Liu Z B, et al. Application of optical interferometry in surface roughness measurement of aerospace valve products [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2017(3): 116-120.

作者简介:

温景超(1985—),男,河北人,硕士,高级工程师,从事航天元器件质量保证和可靠性研究工作。

印刷烧结工艺对单晶硅太阳能电池栅线形貌及电学性能的影响

李琰琪, 沈鸿烈*, 杨汪洋, 徐彬彬, 许亚军

(南京航空航天大学材料科学与技术学院, 江苏省能量转化材料与技术重点实验室, 南京 211106)

摘要: 正面金属化是制备单晶硅太阳能电池中的重要工艺步骤, 栅线质量对电池的电学性能起着关键的作用。通过探究不同栅线处理工艺对栅线宽度的影响, 发现烧结过程中栅线会向两侧崩塌, 从而增加电极的遮光率, 结合表征手段对这一过程进行了分析和机理阐释。在对浆料类型、网版开口宽度、网版图案以及烧结峰值温度的研究中, 发现浆料中的有机物含量会影响栅线在烧结过程中的稳定性, 而合适的网版开口及图案设计能降低遮光面积和栅线高度起伏, 从而显著提升电池的电学性能, 制得了最高转换效率为 22.54% 的单晶硅 PERC 电池。可以预见, 通过优选浆料和网版, 可以进一步改善单晶 PERC 电池的电学性能, 获得更高的光电转换效率。

关键词: 晶硅太阳能电池; 丝网印刷; 烧结; 遮光率; 电池效率

中图分类号: TM914.4 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0827-06

Influence of Screen Printing and Sintering Process on Grid Morphologies and Electrical Properties of Single-Crystalline Silicon Solar Cells

LI Yanqi, SHEN Honglie, YANG Wangyang, XU Binbin, XU Yajun

(Jiangsu Key Laboratory of Materials and Technology for Energy Conversion, College of

Materials Science & Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, CHN)

Abstract: Front metallization is one of the most important steps during the process of fabricating single-crystalline silicon (sc-Si) solar cells. The quality is proven to be closely relative to electrical properties of solar cells. According to the investigation of the influence of grid treatment techniques on the width of grids, it is found the grid will collapse to both sides in the sintering process, which might increase the shading coefficient of electrodes. With the help of characterization, the mechanism of this phenomenon was analyzed. What's more, the effects of the slurry types, halftone opening widths, halftone patterns and the peak temperature of sintering on electrical properties were investigated. The organic content of slurry is found to affect the stability of grids in the sintering process, and the suitable opening width or design of halftone patterns can efficiently reduce the shading areas and keep the grid height consistently. On this basis, sc-Si PERC solar cells with a high average conversion efficiency of 22.54% were fabricated. It could be expected that through optimization of slurry and halftone pattern, improved electrical properties and higher efficiencies of sc-Si PERC solar cells will be realized.

Key words: silicon solar cell; screen printing; sintering; shading coefficient; efficiency

0 引言

更高的转换效率是光伏发电技术与其他能源类型竞争的重要保证^[1],除了高效电池结构的开发,太阳电池工艺的优化也是该领域的研究热点。科研人员通过不断优化和完善制备工艺,来进一步提升已有电池结构的转换效率。作为太阳电池工艺的最后一步,正面电极的制备对于太阳电池的性能起着“把关”的作用^[2]。接触良好的电极能够在一定程度上提升太阳电池的短路电流(I_{sc})和开路电压(V_{oc})性能^[3]。1975年,Ralph提出的丝网印刷电极工艺取代了传统的照相制版覆膜极真空沉积技术,该工艺在提高电极高宽比的同时极大地节约了电极制备成本^[4]。迄今为止,使用丝网印刷导电浆料制备电极已经在光伏产业中得到了广泛的应用^[5]。

就高效太阳电池的正面电极制备而言,发射区的扩散方阻与电极宽度的匹配程度是当前研究的热点之一^[6]。相较于普通太阳电池,高性能电池的栅线宽度控制对短路电流和填充因子等性能具有更大的影响。相关文献报道指出,降低栅线宽度能够减小短路电流、提高填充因子,电池的光电转换效率会呈现先增大后减小的趋势。研究表明,适当地提高扩散方阻、降低栅线宽度有利于增大短路电流、提升电池效率。扩散方阻与栅线宽度的匹配程度对电池串阻影响明显,因此扩散方阻与栅线宽度之间会存在一个最优值。通过建立仿真模型,可以获得特定条件下的最优解。近年来,随着电池扩散工艺的显著提升和导电浆料的更新换代,科研人员提出了使用高方阻密栅线^[7]的组合来实现效率提升的工艺路线。通过在发射极的发射区采用浅结磷扩散来提升该区域的方阻,配合密栅线丝网印刷工艺,可以制备出性能更优良的高效单晶硅太阳电池。

本文主要揭示了单晶 PERC 电池丝网印刷及后续烧结工艺对电池电学性能的影响规律。首先,通过探究不同栅线处理方式的作用,发现烧结过程对栅线宽度具有显著的影响。其后,通过调控工艺过程,分别讨论了浆料、网版及烧结峰值温度对高效单晶硅太阳电池电学性能的影响。

1 实验及表征方法

实验硅片是厚度为 180 μm ,尺寸为 156 mm \times 156 mm 的 p 型单晶硅片。本文涉及的实验均基于单晶硅 PERC 工艺开展,其主要工艺流程为:去除

硅片损伤层,制备减反射绒面 \rightarrow 在 POCl_3 的气氛中进行 P 扩散,形成 n^+ 扩散层 \rightarrow 背面碱抛光 \rightarrow 使用 PECVD 工艺制备正面 SiN_x 减反膜和背面 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ 钝化叠层 \rightarrow 激光开槽 \rightarrow 丝网印刷、烧结栅线电极。主要实验内容有以下几方面:

1.1 栅线处理方式对栅线宽度影响的探究实验

首先将 30 片实验片平均分为三组:实验组 A1, A2 和对照组 A3。使用丝网印刷工艺在三组样品的正面制备 Ag 栅线电极。然后分别对三组样品施以不同的栅线处理方式,其中 A1 组样品印刷后不进行任何处理,A2 组样品印刷后在 220 $^\circ\text{C}$ 下烘干 10 s (带速 130 mm/s),A3 组样品印刷后使用正常的金属化工艺烧结。

1.2 浆料对电池电学性能影响的对比实验

将 90 片硅片分为三组,分别为实验组 B1, B2 和 B3。B1 组样品使用 1 号浆料,B2 组样品使用 2 号浆料,B3 组样品使用 3 号浆料。研究不同浆料类型对样品栅线宽度及电池电学性能的影响。B3 组导电银浆料银粉分散更加均匀,无明显团聚,浆料细度较好。

1.3 网版对电池电学性能影响的对比实验

为了分析栅线宽度对高效电池片的影响,将 120 片实验片平均分为四组:C1, C2, C3 和 C4。对应的网版宽度分别为 30, 40, 50 和 60 μm ,使用 BACCINI 印刷机丝网印刷,并在 783 $^\circ\text{C}$ 下烧结得到待测电池样品。除了网版开口对栅线宽度的影响,网版的结构也会对栅线形貌产生影响,进而影响电池的电学性能。将 90 片硅片分为三组:实验组 D1, D2 和 D3。D1 组样品使用 1 号网版,D2 组样品使用 2 号网版,D3 组样品使用 3 号网版,3 号为无网结网版,1, 2 号为斜网网版。采用实验 1.2 优化后的浆料,研究不同的网版在相同工艺下,各组样品栅线宽度及对应电学性能的变化。

1.4 烧结峰值温度对电池电学性能影响的对比实验

将 90 片硅片分为三组,分别为实验组 E1, E2 和 E3。E1 组样品的烧结温度为 770 $^\circ\text{C}$, E2 组样品的烧结温度为 783 $^\circ\text{C}$, E3 组样品的烧结温度为 800 $^\circ\text{C}$ 。研究不同的烧结峰值温度对各组样品栅线宽度及电池电学性能的影响。

1.5 表征方法

基于 SEMI 行业标准,使用光学金相显微镜 (KEYENCE, VK9700) 观测并测量栅线宽度;使用场发射扫描电子显微镜 (HITACHI, S-4800) 表征样品

表面的栅线形貌,利用模拟太阳光照系统(AM1.5)和 I - V 测试设备表征电池样品的电学性能。

2 结果与讨论

2.1 栅线处理方式对栅线宽度的影响

首先使用金相显微镜观察 A 组样品栅线及其附近区域的微观形貌,如图 1(a)~(c)所示。图 1(a)为 A1 组样品栅线区域的微观形貌,从图中可以明显观察到栅线电极周围存在一定数量的散点状电极。对比图 1(b)和图 1(c),发现散点状电极依然存在,初步推测其可能是在丝网印刷过程中形成的。在多次印刷后,网版开口周围会粘附部分导电银浆,在连续丝网印刷的过程中这些残余银浆会粘在下一片电池的副栅线附近区域,形成散点状电极。为了证实这一观点,对印刷后网版的细栅区域进行了 SEM 表征,如图 1(d)所示,从图中可以明显观察到网版与电池片接触面的细栅开口附近会有白色点状物质的存在。使用 EDS 对该区域进行分析,发现其主要成分为银元素,从而证实了上述观点。此外,对比图 1 中三组样品的栅线区微观形貌,可以发现烧结过程对电池栅线的宽度具有显著的影响。

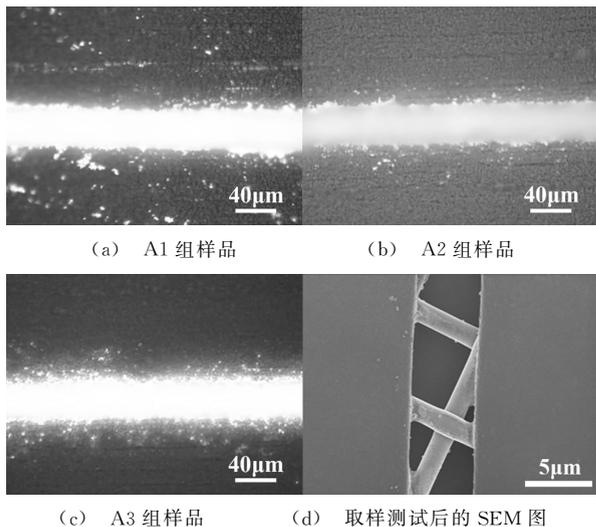


图 1 三组样品的金相显微镜照片和印刷浆料后的 SEM 图

通过随机选取栅线上的点,测试对应宽度并求取平均值,获得了如图 2 所示的晶硅电池栅线在未烧结、烘干及正常烧结后,各组样品栅线宽度 w 的对比图。由图可知,电池进行烘干后,栅线电极的平均宽度从其栅线宽度 $46.9 \mu\text{m}$ 降低至 $45.7 \mu\text{m}$,几乎没有变化(对比 A1 和 A2)。这说明干燥过程对栅线电极宽度的影响有限,其中 $1.1 \mu\text{m}$ 的差异可

能来源于烘干时有机物的部分燃烧。而烧结后的样品(A3),其栅线宽度增加至 $53.6 \mu\text{m}$,相较于刚完成丝网印刷的样品(A1)发生了明显的变化,该变化可能与烧结过程中栅线边缘的塌陷有关。

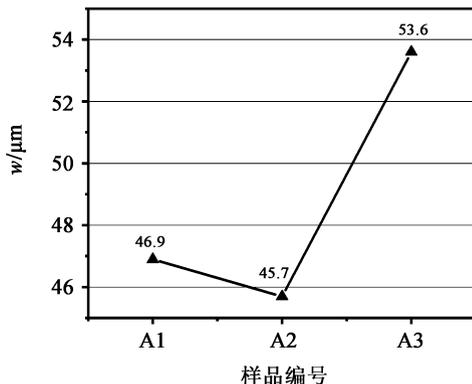


图 2 A 组电池样品的栅线宽度变化趋势

栅线宽度增加产生的遮光现象会极大地影响电池性能,所以需要探讨烧结过程中栅线宽度变化的原因进行深入探讨。对 A2 和 A3 组晶硅副栅线局部区域进行了 SEM 测试(A1 里面有溶剂,故不能放入电镜中测试,没有进行对比测试),结果如图 3 所示。对比图 3(a)和图 3(b),发现烧结后栅线边缘呈现明显的向两边塌陷的结构,这种塌陷结构增加了栅线的宽度。这种塌陷主要由两方面原因导致:一是浆料中的玻璃粉在烧结过程中会发生相互粘连;二是玻璃粉的熔融会使浆料中的银颗粒发生集聚现象。在厚膜内部应力作用下,导电银颗粒互相粘结,形成了如图 3(b)所示的网状结构^[8]。在高温作用下,导电银浆中的有机物充分燃烧,原本分散在有机物网络中的银颗粒失去了支撑,向边缘滑动,导致了宏观层面栅线的崩塌。栅线高度降低、宽度变大,增大了金属化区域的面积及遮光率^[9]。此外,根据粘滞流动传质机制,粉末颗粒之间在高温烧结时会相互接触、流动^[10]。银浆中含有的玻璃颗粒在高温下熔融,对分散在其中的银粉颗粒进行润湿。这时,熔融的液流将浸润如图 3(c)所示晶硅电池绒面的低洼处。

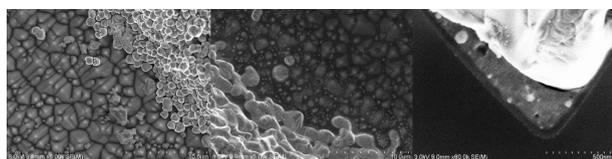


图 3 A2 和 A3 组样品烧结后副栅线边缘与 A3 组烧结后栅线与硅界面处的微观形貌

2.2 浆料对电池电学性能的影响

B组样品为使用不同浆料,在相同的印刷、烧结工艺下制得的太阳电池。栅线尺寸及电学性能的变化如图4所示。由图4(a)和图4(e)可知,B2组浆料相对于B1组浆料烧结后栅线宽度更大,这说明B2组浆料在烧结过程中的保型性很差,浆料向栅线两侧的塌陷较为严重,而高度下降后,栅线中载流子的纵向传输也受到极大的影响,但是浆料塌陷增强了金属化面积,故串阻有所下降。而B3组的栅线高度与B1组相当,栅线宽度更低,但是串阻明显是最低的,这可能是由于B3组所用浆料具有最优的保型性和载流子传输性。而最小的栅线宽度和较高的栅线高度(最小的宽/高比)降低了遮挡作用,确保了载流子高效的纵向传输,故B3组电池的电学性能是最优的,其光电转换效率达到了21.35%。为了证明浆料类型对电池性能具有较大影响,对所用浆料开展了对比实验。发现B3浆料在长时间放置后无结块现象出现,而B1,B2组浆料容易出现结块现象,且B2组尤为明显。这说明B1,B2组浆料中有机物含量较多,在烧结过程中有机物的燃烧导致栅线边缘崩塌、宽度增加,从而影响电池电学性能。通过优选浆料,将电池的平均转换效率提升了近1%。

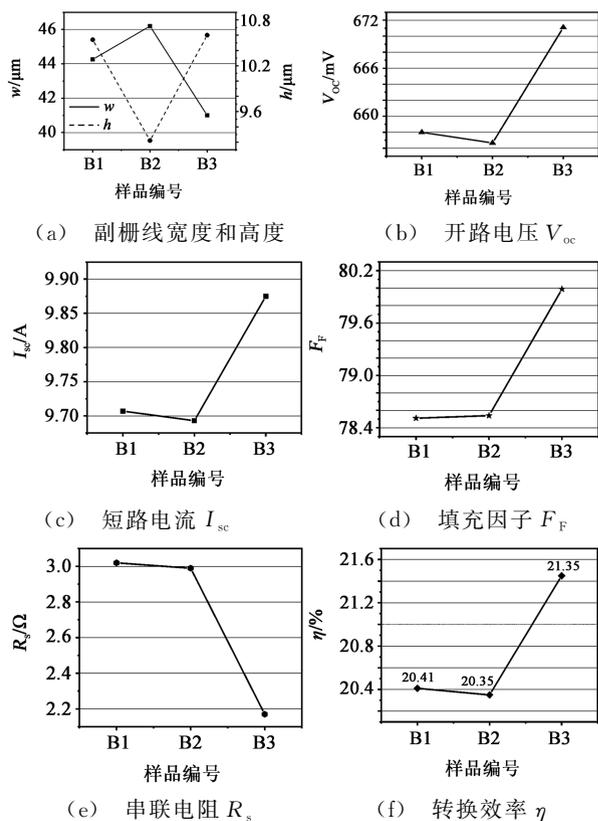


图4 不同浆料制得电池的电学性能

2.3 网版对电池电学性能的影响

通过改变网版开口宽度,制备了不同丝网印刷栅线宽度的电池片(C组),其电学性能如图5所示。由图5(b)和图5(c)可知,当栅线宽度增加时,电池的开路电压和短路电流均呈下降趋势。短路电流的下降是电池发射极处遮光面积增加的直观体现,而开路电压往往由pn结和表面的复合速率共同决定^[10],栅线宽度的增加虽然不会对pn结造成影响,但是直接影响了表面复合速率。金属与硅接触区域的能带中存在较多的缺陷能级,这些缺陷能级的存在会充当复合中心,导致复合电流的增大,从而影响开路电压^[11]。因此,金属化区域面积,应尽可能地减小,这与降低栅线宽度、减少遮光面积的目的是一致的。开路电压和短路电流的减小会极大地影响电池效率,从图5(d)中,可以看到光电转换效率随栅线宽度增加而降低的趋势。因此,使用30 μm 开口宽度的网版制得的太阳电池综合电学性能最优。使用该网版进行丝网印刷时,获得了21.23%的最高效率。

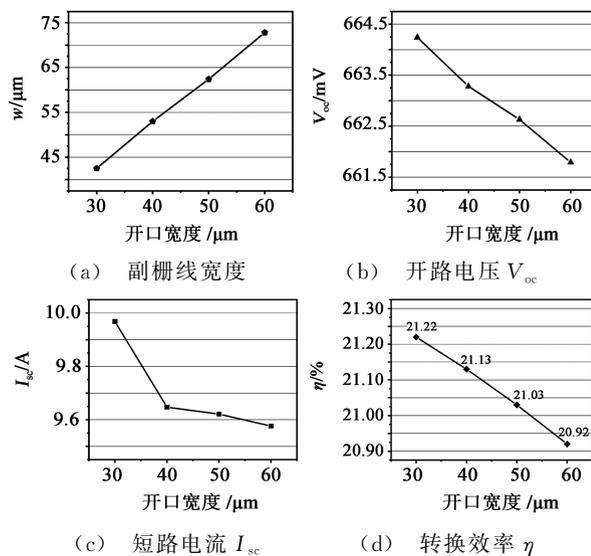


图5 不同开口宽度网版制得电池的电学性能

对于相同开口宽度的网版,不同的网版图案也会对栅线电极的形貌产生影响,从而改变电池性能。图6展示了不同网版图案制得电池的栅线长度、宽度和电学性能。我们发现,从D1到D3组,除了填充因子,电池的电学性能均有所提升。其中,D3组样品的转换效率达到了22.54%。如图6(a)所示,使用D3组无网结网版图案制得栅线的高宽比最大,说明该网版图案能有效减少印刷毛边,使副栅线高低起伏减小,印刷更加均匀。D1组和D2组网版

图案制得的栅线高宽比相近,但是栅线宽度降低有助于减少遮挡面积,故 D2 组电池的开路电压(图 6(b))和短路电流(图 6(a))较 D1 组要高。而较低的栅线宽度会影响接触,从而使填充因子降低。D3 组使用的网版图案能有效减少印刷毛边,这种图案制得的副栅线高低起伏减小,印刷更加均匀。因此,在优选浆料的基础上,还可通过优选网版将电池的平均转换效率进一步提升。

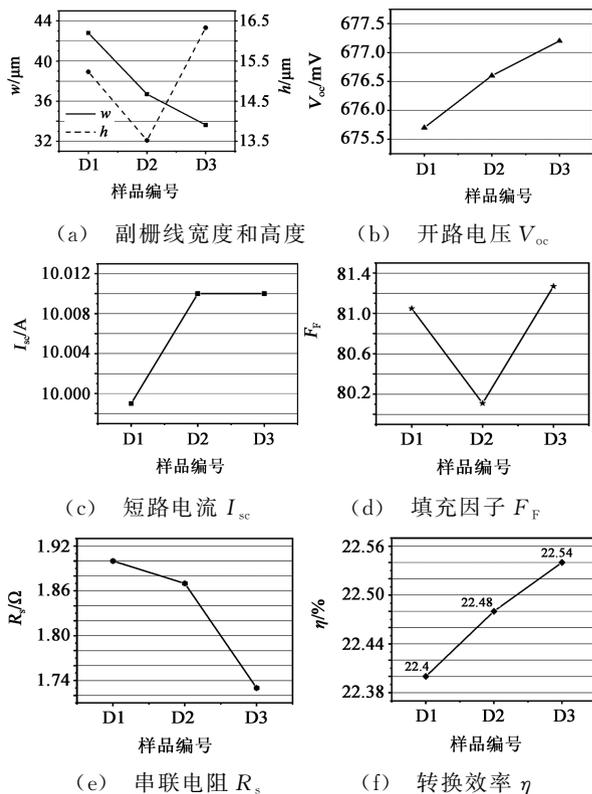


图 6 不同网版图案制得电池的栅线长度、宽度和电学性能

2.4 烧结峰值温度对电池电学性能的影响

E 组样品为不同烧结峰值温度下制备的电池,其电学性能如图 7 所示。由图 7(a)和图 8 可知,不同烧结温度下,栅线的宽度几乎没有变化,且栅线高宽比分别为 42.74,40.64 和 44.39,说明峰值温度 T_{peak} 对栅线的宏观形貌没有太大的影响,但是电池的串阻(图 7(e)所示)变化较为明显。这可能是当温度从 770 $^{\circ}\text{C}$ 升至 783 $^{\circ}\text{C}$ 时,银颗粒逐渐凝聚收缩,栅线的致密度上升,故电阻率下降。而烧结温度达到 800 $^{\circ}\text{C}$ 时,银颗粒的过度收缩使颗粒间孔洞增多,栅线致密度急剧下降,电阻率显著增加。而温度进一步升高时,过高的烧结温度使大量的银熔融于液态玻璃料中,并沉积到硅片发射极表面,导致局部区域的掺杂浓度下降,使电池串阻上升。电池的短路

电流随烧结峰值温度的变化(图 7(c))也印证了这一观点。综合 E 组样品电池的电学性能可知,烧结峰值温度并不会对高效电池的宽度造成很大影响,相较于浆料类型和网版等影响因素,峰值温度对电池电学性能的影响较为有限。

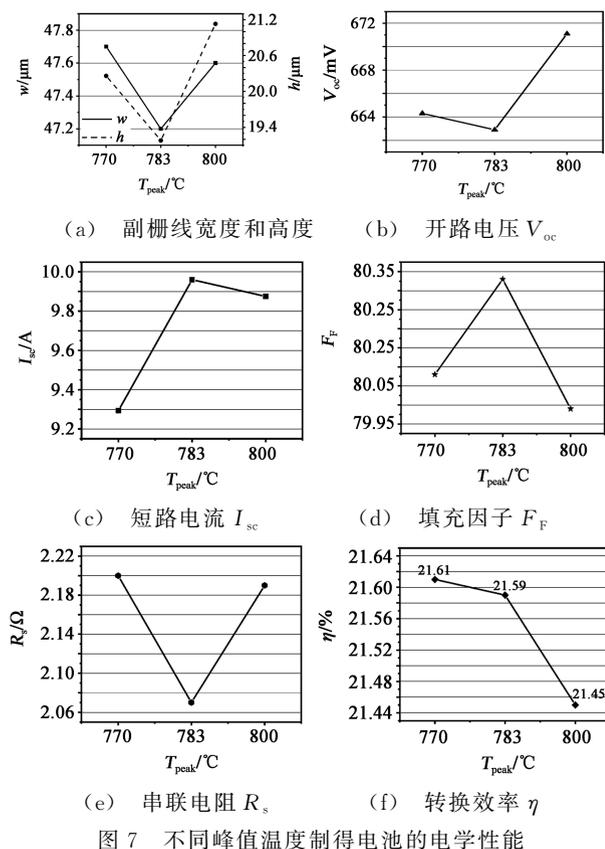
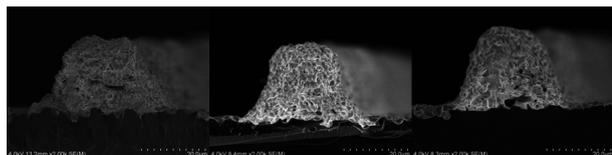


图 7 不同峰值温度制得电池的电学性能



(a) 770 $^{\circ}\text{C}$ (b) 783 $^{\circ}\text{C}$ (c) 800 $^{\circ}\text{C}$

图 8 不同烧结峰值温度对应的栅线截面 SEM 图

3 结论

发现在单晶 PERC 电池正面金属化的过程中,烧结过程是影响栅线宽度的主要因素。在烧结过程中,栅线边缘会向两边塌陷,从而增加栅线宽度,严重的遮光现象会导致电池电学性能下降。随后,通过调控浆料类型,证明了浆料中有机物含量越多,则栅线塌陷现象越严重,而合适的有机物含量会保证浆料在烧结过程中的稳定性,进而保证电池获得更高的转换效率。通过优选银粉分散更均匀且细度更好的浆料,将电池的平均转换效率提升了近 1%。

此外,发现丝网印刷网版的开口宽度和图案也会影响烧结后栅线电极的形貌,遮挡面积的下降和栅线高度起伏的减少都能够显著提升电池的电学性能。在使用最佳浆料进行丝网印刷的条件下,通过将网版的开口宽度调整为 $30\ \mu\text{m}$,选用无网结网版图案,分别获得了 21.23% 和 22.54% 的最高转换效率。而在对烧结峰值温度的研究过程中,我们发现,对于确定的浆料类型和网版图案,峰值温度的影响则较为有限。综上所述,优选浆料和网版是改良印刷烧结工艺、提升单晶 PERC 电池电学性能的较优途径。

参考文献:

- [1] 陈俊帆, 赵生盛, 高天, 等. 高效单晶硅太阳能电池的最新进展及发展趋势[J]. 材料导报, 2019, 33(1): 110-116.
Chen Junfan, Zhao Shengsheng, Gao Tian, et al. High-efficiency monocrystalline silicon solar cells: development trends and prospects[J]. Materials Reports, 2019, 33(1): 110-116.
- [2] Jeong Ms, Min K H, Choi S, et al. Dependence of the optimization of the front grid design in passivated emitter and rear contact c-Si solar cells on the finger width and the aspect ratio[J]. J. Korean Phys. Soc., 2020, 76(8): 774-780.
- [3] 周涛, 赵洋, 陆晓东, 等. N型背接触晶硅太阳能电池前表面场研究[J]. 电子元件与材料, 2015, 34(4): 14-18.
Zhou Tao, Zhao Yang, Lu Xiaodong, et al. Front surface field on N type back contact crystalline silicon solar cell [J]. Electronic Components and Materials, 2015, 34(4): 14-18.
- [4] 李东立, 许文才, 武军. 印刷制版原理的剖析[J]. 包装工程, 2009, 30(7): 164-166.
Li Dongli, Xu Wencai, Wu Jun. Analysis of plate making principle of printing[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(7): 164-166.
- [5] Deng W, Ye F, Liu R, et al. 22.61% efficient fully screen printed PERC solar cell[C]// Proc. of 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 2017.
- [6] 李栋才. 晶硅太阳能电池丝网印刷工艺优化的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
Li Dongcai. Optimization of screen printing process of crystal silicon solar cells [J]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [7] 王静, 张东升. 单晶硅太阳能电池高阻密栅工艺的研究[J]. 电子技术与软件工程, 2017(14): 138.
Wang Jing, Zhang Dongsheng. Study on high resistance and density gate technology of monocrystalline silicon solar cell[J].

Electronic Technology & Software Engineering, 2017(14): 138.

- [8] 李翠双, 张晓朋. 丝印电极的刮印角度和银浆特性对多晶硅太阳能电池性能的影响[J]. 光电子技术, 2018, 38(4): 262-266.
Li Cuishuang, Zhang Xiaopeng. The effect of sloped squeegee angle in screen printing and silver paste characteristics on the performance of polysilicon solar cells [J]. Optoelectronic Technology, 2018, 38(4): 262-266.
- [9] 宋江, 李蓬, 钟文涛, 等. 银粉和玻璃粉对太阳能电池正银浆料接触界面的影响[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2019, 35(1): 1-6, 59.
Song Jiang, Li Peng, Zhong Wentao, et al. Ag powder and glass frit effect on the contact interface of the front contract with silicon solar cells [J]. J. of Shaanxi University of Technology(Nature Science Edition), 2019, 35(1): 1-6, 59.
- [10] 郭桂全. 太阳能电池正面银浆的制备及其性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
Guo Guiquan. Study on the preparation and properties of silver paste for solar cells[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [11] 夏德宏, 张刚. 烧结机热工过程优化探讨[J]. 冶金能源, 2004, 23(4): 10-13.
Xia Dehong, Zhang Gang. Simulation of thermal process of sintering[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2004, 23(4): 10-13.
- [12] 史济群, 欧海燕, 马稚尧, 等. pn结太阳能电池饱和电流密度的理论研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2001, 29(4): 24-26.
Shi Jiqun, Ou Haiyan, Ma Zhiyao, et al. A study of saturated current density of solar cells with pn junction [J]. J. of Huazhong University of Science and Technol. (Natural Science Edi.), 2001, 29(4): 24-26.
- [13] 朱海燕. 太阳能电池用晶体硅中缺陷及其与金属杂质相互作用行为的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
Zhu Haiyan. Study on defects and their interaction with metal impurities in crystalline silicon used in solar cells [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

作者简介:

李琰琪(1986—),女,吉林人,在职研究生,应用工程师,研究方向为先进光电/电光转换材料与器件、新能源材料与应用技术等;

沈鸿烈(1958—),男,江西人,博士,教授,博士生导师,研究方向为先进光电/电光转换材料与器件、新能源材料与应用技术等。

FBG形状传感器应变传递与传感性能研究

张冬伟^{*}, 金靖, 朱云鸿, 张艺博

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 光电工程系, 北京 100191)

摘要: 为提高光纤布拉格光栅(FBG)形状传感器的形状重建精度,减小光栅点的重建位置误差,设计了一种FBG传感元件结构。通过建立传感元件应变传递力学模型,推导出平均应变传递率表达式,并结合传感元件有限元仿真模型,分析了相关结构参数对传感元件应变传递率的影响,将有限元仿真与理论计算结果进行对比,验证了理论模型的有效性。进而分析了应变传递率对传感系统形状重建精度的影响,得出当光栅点应变传递率保持在90%以上时,光栅点的重建位置误差将保持在0.08 mm内。该研究表明,通过合理控制影响参数,可有效提高传感元件应变传递效率,减小传感系统形状重建位置误差,从而提高光纤形状传感器的形状重建定位精度。

关键词: 光纤传感; 光纤光栅; 应变传递; 位置误差; 形状重建精度

中图分类号: TN253 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0833-06

Research on Strain Transmission and Sensing Performance of FBG Shape Sensor

ZHANG Dongwei, JIN Jing, ZHU Yunhong, ZHANG Yibo

(Dept. of Optoelectronic Engin., School of Instrument Science and Optoelectronic Engin.,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, CHN)

Abstract: In order to improve the shape reconstruction accuracy of fiber Bragg grating (FBG) shape sensor and reduce the reconstruction position error of the grating points, a FBG sensing element structure was designed in this paper. By establishing the strain transfer mechanics model of the sensing element, the expression of the average strain transfer rate was derived. And by combining with the finite element simulation model of the sensing element, the influence of the relevant structural parameters on the strain transfer rate of the sensing element was analyzed. The finite element simulation and theoretical calculation results were compared to verify the validity of the theoretical model. Furthermore, the effect of strain transfer rate on the shape reconstruction accuracy of the sensing system was analyzed, and it was concluded that when the strain transfer rate of the grating points remains above 90%, the reconstruction position error of the grating points will remain within 0.08 mm. The study shows that by reasonably controlling the influencing parameters, the strain transmission efficiency of the sensing element can be effectively improved, and the position error of the shape reconstruction of the sensing system can be reduced, thus the positioning accuracy of the shape reconstruction of the optical fiber shape sensor will be improved.

Key words: optical fiber sensing; fiber grating; strain transfer; position error; shape reconstruction accuracy

收稿日期: 2020-10-17.

* 通信作者: 张冬伟

E-mail: zhangdongwei@buaa.edu.cn

0 引言

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)因其质量轻、尺寸小、灵敏度高、抗电磁干扰、易于嵌入材料内部、集传感和传输于一体等诸多优点^[1],可实现对结构应变、温度等物理量的高精度、分布式传感测量^[2-3],被认为是复杂环境下结构检测领域最具有前途的传感器之一,在航空航天航海^[4]、土木工程^[5]、智能医疗^[6-7]等领域获得了广泛的应用,具有十分广阔的发展前景。

在将 FBG 应用于三维形状传感测量时,一根单芯光纤光栅只能进行应变的测量,无法检测出待测结构三维形状,只能通过多根光纤光栅组合测量,得到同一个位置的多个应变值,进而重构出三维形状^[8-9]。沈林勇等^[10]将 4 根 FBG 传感阵列分别安放在基材上相互呈 90°角的位置,每一个空间点由相互垂直的两个方向的 2 根 FBG 阵列测量,实现了光纤形状的传感测量。Park 等^[11]通过将 FBG 引入小尺度磁共振成像兼容活检针,实现了手术针体内偏转轮廓的形状显示,可实时追踪探针的轨迹状态,此三维形状传感器由嵌入 120°等距分布的形状记忆合金凹槽的三根 FBG 传感阵列组成。研究发现光栅应变测量的精确性对形状重建结果影响较大。为提高 FBG 形状传感器的形状重建精度,章亚南等^[12]将应变传递率引入形状重建中,改进了 FBG 形状传感器的形状重建算法,传感器末端相对定位精度由原来的 3.5% 提高到 2.7%。研究表明,在将多根 FBG 传感阵列嵌入基材中构成形状传感器传感元件时,由于 FBG 和基材之间存在粘结层等中间结构,造成 FBG 实测应变与基材应变之间存在传递误差,而粘结剂厚度、弹性模量等对应变传递也存在直接影响^[13]。因此明确 FBG 传感元件应变传递效率的影响因素及其对系统形状传感性能的影响,对提高光纤形状传感器的形状重建定位精度具有重要指导意义。

本文将 FBG 传感元件光栅点应变传递率的研究与传感系统形状重建相结合,利用 FBG 测量应变从而实现传感系统的形状重建。通过建立应变传递理论模型分析应变传递率的影响因素,并与有限元仿真结果进行对比,验证理论模型的有效性,进而将应变传递率引入形状重建,实现形状重建定位精度的有效改善。

1 理论分析

1.1 光纤光栅传感特性

FBG 是利用掺有铯等离子体的光纤纤芯的光敏性,通过紫外光等照射光纤,在纤芯内部形成折射率周期性变化的空间相位光栅^[1]。当宽带光在均匀的 FBG 中传输时,产生模式耦合,其中满足 Bragg 条件的入射光波被反射回来,光栅反射波的中心波长受折射率和光栅周期变化的影响,中心反射波长满足的 Bragg 条件为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \cdot \Lambda \quad (1)$$

式中, n_{eff} 为光栅的有效折射率, Λ 为光栅周期。

FBG 作为波长调制型传感器的敏感元件时,任何可以改变光栅有效折射率 n_{eff} 和光栅周期 Λ 的物理量都可以作为被测对象,但最直接的作用量还是应变与温度。假定温度及其他条件不变,FBG 仅受到均匀轴向应变 ϵ 作用时,光栅发生伸缩并产生弹光效应,两者均会引起 FBG 中心波长 λ_B 的变化,其变化量可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon \quad (2)$$

式中, P_e 为有效弹光系数,约为 0.216, $\Delta\lambda_B$ 为光栅中心波长的变化量。

1.2 光纤光栅与基材之间应变传递理论模型

FBG 形状传感器通过 FBG 测量应变以实现传感元件的形状重建,采用粘结剂将 FBG 粘贴至形状记忆合金基材表面,形成基材-粘结层-光纤-粘结层四层复合结构,如图 1 所示,三根 FBG 阵列绕基材 120°分布,通过粘结剂固定在基材凹槽中,粘结剂固化形成粘结层,依靠粘结层实现从基材到光栅之间的应变传递。

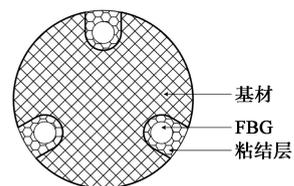


图 1 传感元件结构横截面示意图

从基材到 FBG 的轴向应变传递过程为:基材在外部载荷下产生轴向应变,由于基材和粘结层弹性模量不匹配使得平行于粘结层轴向的平面内产生剪应力,基材应变通过剪应力的作用传递给粘结层,使得粘结层产生应变,粘结层应变又通过剪应力传递给 FBG,最后使 FBG 产生轴向应变。以一个 FBG

测量点为研究对象进行分析,建立图2所示受力分析图。

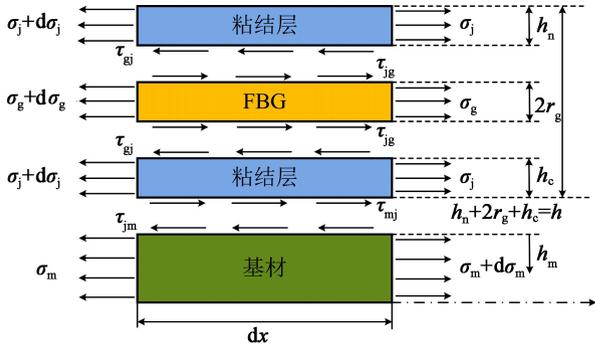


图2 传感元件轴向应力分析

对栅区轴向上长度为 dx 的微段进行各层受力分析,建立力平衡方程:

(1) 光纤光栅微元段的力平衡微分方程:

$$2\pi r_g \tau_{jg} dx + \pi r_g^2 \sigma_g = \pi r_g^2 (\sigma_g + d\sigma_g) \quad (3)$$

(2) 粘结层微元段的力平衡微分方程:

$$\tau_{mj} L dx + (S - \pi r_g^2) \sigma_j = (S - \pi r_g^2) \cdot (\sigma_j + d\sigma_j) + 2\pi r_g \tau_{gj} dx \quad (4)$$

(3) 光纤光栅和粘结层轴向应变积分:

$$\int_h^{h+h_m} G_m \frac{du}{dy} dy = \int_h^{h+h_m} \frac{h+h_m-y}{h_m} \left[\frac{\pi r_g^2 E_g}{L} + \frac{(S - \pi r_g^2) E_j}{L} \right] d\epsilon_g \quad (5)$$

$$\int_{h-h_c}^h G_j \frac{du}{dy} dy = \int_{h-h_c}^h \left(\frac{\tau_{mj} - \tau_{gj}}{h_c} y + \frac{h_c \tau_{mj} - h \tau_{mj} + h \tau_{gj}}{h_c} \right) dy \quad (6)$$

得到 ϵ_m 与 ϵ_j , ϵ_j 与 ϵ_g 之间的关系:

$$\epsilon_m = \epsilon_j + \frac{h_m}{2G_m} \left[\frac{\pi r_g^2 E_g}{L} + \frac{(S - \pi r_g^2) E_j}{L} \right] \frac{d^2 \epsilon_g}{dx^2} \quad (7)$$

$$\epsilon_j = \epsilon_g + \frac{h_c}{2G_j} \left[\frac{\pi r_g^2 E_g}{L} + \frac{(S - \pi r_g^2) E_j}{L} + \frac{r_g E_g}{2} \right] \frac{d^2 \epsilon_g}{dx^2} \quad (8)$$

最终得到 ϵ_m 与 ϵ_g 之间的关系:

$$\epsilon_m - \epsilon_g = \left\{ \frac{h_c}{2G_j} \cdot \left[\frac{\pi r_g^2 E_g}{L} + \frac{(S - \pi r_g^2) E_j}{L} + \frac{r_g E_g}{2} \right] + \frac{h_m}{2G_m} \left[\frac{\pi r_g^2 E_g}{L} + \frac{(S - \pi r_g^2) E_j}{L} \right] \right\} \frac{d^2 \epsilon_g}{dx^2} \quad (9)$$

取:

$$\frac{1}{k^2} = \left\{ \frac{h_c}{2G_j} \cdot \left[\frac{\pi r_g^2 E_g}{L} + \frac{(S - \pi r_g^2) E_j}{L} + \frac{r_g E_g}{2} \right] + \frac{h_m}{2G_m} \left[\frac{\pi r_g^2 E_g}{L} + \frac{(S - \pi r_g^2) E_j}{L} \right] \right\}$$

$$\left. \frac{r_g E_g}{2} \right] + \frac{h_m}{2G_m} \left[\frac{\pi r_g^2 E_g}{L} + \frac{(S - \pi r_g^2) E_j}{L} \right] \right\} \quad (10)$$

则有:

$$\epsilon_m - \epsilon_g = \frac{1}{k^2} \frac{d^2 \epsilon_g}{dx^2} \quad (11)$$

解得:

$$\epsilon_g(x) = \left[1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kl)} \right] \epsilon_m \quad (12)$$

由此得到 FBG 测得应变与基材实际应变的比值,即应变传递率:

$$\alpha(x) = \frac{\epsilon_g(x)}{\epsilon_m} = 1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kl)} \quad (13)$$

因此整个粘结段 $2l$ 长度上的平均应变传递率为

$$\alpha_{av} = \frac{\overline{\epsilon_g(x)}}{\epsilon_m} = \frac{1}{2l} \int_{-l}^l \alpha(x) dx = 1 - \frac{\sinh(kl)}{kl \cosh(kl)} \quad (14)$$

通过式(10)和(14)可以得到传感元件应变传递效率的主要影响因素包括:粘结层弹性模量 E_j 、粘结层下部厚度 h_c 等。

图2及以上公式中各参数表示含义见表1。

表1 应变传递理论模型参数

基本参数	说明
r_g/mm	光纤光栅半径
l/mm	光栅半粘结长度
h_n/mm	光栅上部粘结层厚度
h_c/mm	光栅下部粘结层厚度
h_m/mm	粘结层对基体影响深度
x/mm	传感元件轴向长度
y/mm	传感元件径向深度
E_g/GPa	光栅弹性模量
E_j/GPa	粘结层弹性模量
E_m/GPa	基体弹性模量
σ_g/GPa	光栅轴向应力
σ_j/GPa	粘结层轴向应力
σ_m/GPa	基体轴向应力
τ_{gj}/GPa	光栅与粘结层界面剪应力
τ_{mj}/GPa	粘结层与基体界面剪应力
μ_j	粘结层泊松比
μ_m	基体泊松比

1.3 光栅中心波长与基体应变关系的光力转换理论方程

光栅应变传感的光-力转换理论方程是指待测基材应变与 FBG 中心反射波长之间的关系,由式(2)与(12)可得该方程为

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_c) \left[1 - \frac{\sinh(kl)}{kl \cosh(kl)} \right] \epsilon_m = K_{\epsilon} \alpha_{av} \epsilon_m =$$

$$K_{\epsilon_a} \cdot \epsilon_m \tag{15}$$

其中, $K_{\epsilon_a} = K_{\epsilon} \cdot \alpha_{av}$ 为传感元件波长应变灵敏度系数, α_{av} 为平均应变传递率。光-力转换方程的建立为 FBG 形状传感器传感元件的应变传递率对传感性能的影响分析提供了理论依据。

2 结构参数影响作用分析

2.1 粘结层弹性模量和泊松比对平均应变传递率影响分析

当粘结层材料弹性模量 E_j 在 $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^{20}$ Pa 之间变化时, 分别绘制粘结层泊松比 $\mu_j = [0.15, 0.35, 0.55]$ 条件下的粘结层弹性模量对 FBG 传感元件平均应变传递率 α_{av} 的影响变化曲线, 如图 3 所示。

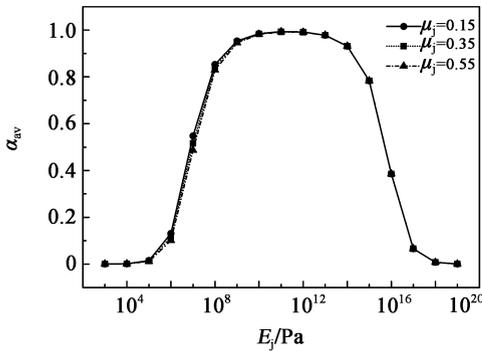


图 3 不同泊松比下粘结层弹性模量对平均应变传递率的影响

可以看出, 当粘结层材料泊松比 μ_j 为定值时, 平均应变传递率随弹性模量 E_j 的增大先逐渐增大后逐渐减小。当弹性模量 E_j 在 $1 \times 10^9 \sim 1 \times 10^{14}$ Pa 之间变化时, 平均应变传递率逐渐趋近且稳定保持在 0.97 附近, 粘结层泊松比 μ_j 的变化对平均应变传递率的影响较小。因此, 在粘结剂选取时应当重点考虑粘结剂的弹性模量是否符合要求。结合以上分析, 在传感元件制作过程中考虑选取环氧树脂胶作为粘结剂, 其材料弹性模量为 $E_j = 3.5 \times 10^9$ Pa, 泊松比 $\mu_j = 0.35$, 符合设计范围要求。

2.2 粘结层厚度对平均应变传递率影响分析

当光栅上部粘结层厚度 $h_n = [0.01, 0.05, 0.10]$ mm 时, 分析光栅下部粘结层厚度 h_c 的变化对平均应变传递率的影响作用, 结果如图 4 所示。

可以看出, 当光栅上部粘结层厚度 h_n 恒定时, 平均应变传递率随光栅下部粘结层厚度 h_c 的逐渐增大而减小, 当 h_c 在 0.05 mm 左右时, 平均应变传

递率下降速率约为 $0.257\%/0.01$ mm。当光栅上部粘结层厚度 $h_n = [0.01, 0.05, 0.10]$ mm 时, 平均应变传递率变化趋势较为接近。理论分析表明, 光纤下部粘结层厚度越小, 应变传递率损耗越小, 平均应变传递率越大。但粘结层过薄, 无法将光纤牢固粘结在基材表面, 这点也需在传感元件制作过程中加以考虑。

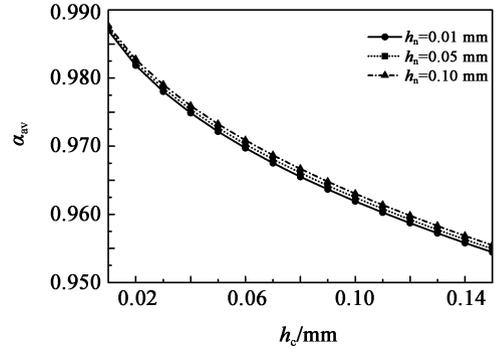


图 4 光栅下部粘结层厚度对平均应变传递率的影响

3 FBG 传感元件有限元仿真分析

3.1 FBG 传感元件有限元分析算例建立

为验证应变传递理论模型的有效性, 建立传感元件有限元分析模型。在模型上设置两条路径, 一条沿基材中心轴向, 一条沿光纤中心轴向。在两条路径上分别插入 50 个取值观察点, 经过加载计算后, 将两条路径的 50 个应变值相比, 得到 50 个观察点的应变传递率。并与应变传递模型理论分析结果进行对比, 如图 5 所示。

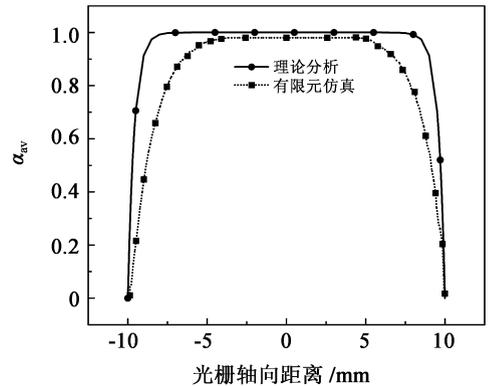


图 5 平均应变传递率随光栅轴向距离变化

由图可知, 应变传递理论分析和有限元仿真结果变化趋势一致。在传感元件中部 10 mm 长度内两者得到的应变传递率基本相等; 在两端 7.5 mm 附近存在最大 5% 的误差, 且有限元仿真应变传递率略小于理论分析值。由于理论计算过程中假设各

层应变分布均匀,各层剪应力呈线性变化,只考虑传感元件轴向变形,未考虑其径向变形,而有限元计算中粘结层的末端存在较大的剪应力导致传感元件各层应变在端部存在一定的不均匀,使得应变传递值的理论值与仿真值有所差异。

3.2 结构参数对应变传递率影响分析

3.2.1 粘结层弹性模量对应变传递率影响分析

当粘结层弹性模量 E_j 在 $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^{19}$ Pa 之间变化时,在有限元分析算例中分别提取基材和FBG观察点处应力值,计算得到传感元件平均应变传递率,并与理论计算结果进行对比,如图6所示。

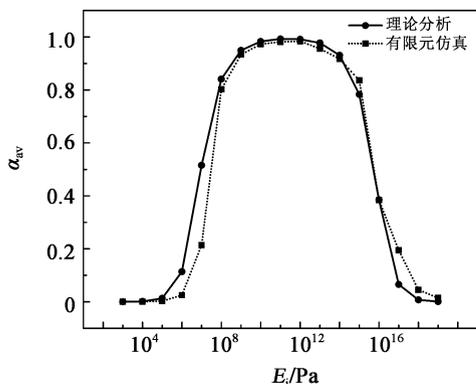


图6 粘结层弹性模量对平均应变传递率的影响

可以看出,有限元分析结果与理论计算结果变化趋势一致,可以验证传感元件平均应变传递率理论模型的有效性。当粘结层弹性模量 E_j 在 $1 \times 10^9 \sim 1 \times 10^{14}$ Pa 之间变化时,平均应变传递率的有限元分析值和理论计算值均稳定保持在 0.97 附近,其理论计算值略大于有限元分析值,两者相差约 0.03。

3.2.2 粘结层厚度对应变传递率影响分析

当粘结剂弹性模量 $E_j = 3.5 \times 10^9$ Pa 时,分析粘结层厚度对应变传递率的影响效果,如图7所示。

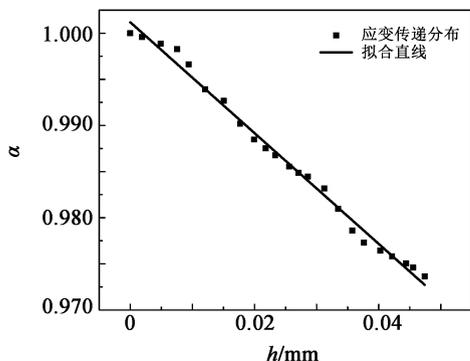


图7 粘结层厚度对应变传递率的影响

可以看出,粘结层中应变传递率随着粘结层厚度的增大而逐渐减小,变化趋势近似呈直线下降,直线拟合相关性系数 R^2 为 0.992,拟合效果较好。同时得到粘结层应变传递率变化幅度为 $-0.6\%/0.01$ mm,该系数是造成FBG与基材之间应变传递误差的直接原因,该分析结果同时也验证了图4中在较好的粘结层弹性模量范围内应变传递率的稳定值为 0.97。

4 FBG传感元件应变传递率对形状传感精度影响分析

4.1 传感元件弯曲形状重建

通过将FBG形状传感器传感元件嵌入标准模具中,连接FBG解调仪,收集各栅点波长漂移量,根据式(15)计算各光栅点处的应变值,并代入传感系统形状重建算法,最终得到各光栅点的坐标值,重建出传感元件弯曲形状。其中FBG传感元件的长度为 210 mm,共 7 个光栅点,每个光栅点间隔 30 mm。如图8所示,以初始重建形状为基准,为下文单个光栅点处应变传递率变化对传感系统形状重建误差的影响分析提供参考标准。

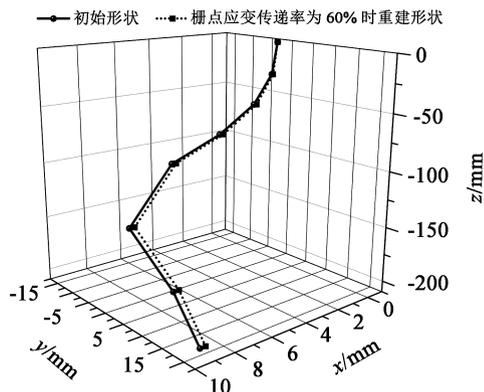


图8 传感元件弯曲形状重建

4.2 应变传递率对形状传感精度影响分析

当第一位置点光栅3处的应变传递率分别为 90%, 80%, 70%, 60%, 50%, 40% 和 30% 时,分别重建传感元件弯曲形状,并与初始重建形状进行对比,分析应变传递率对形状重建位置误差的影响。图8中展示了当应变传递率为 60% 时的传感元件重建形状,可以看出,当光栅点应变传递率为 60% 时,传感元件形状重建位置相对初始形状出现明显偏移,形状重建位置误差明显增大。

设点 (x_{i0}, y_{i0}, z_{i0}) 为初始重建形状中光栅位置

点的坐标,点 (x_i, y_i, z_i) 为加入应变传递误差后传感系统重建形状中对应位置点的坐标值, d_i 是两点之间的空间距离, d_{\max} 是各 d_i 值中的最大值,用来表示形状重建位置的绝对误差,且有下式成立:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_{i0})^2 + (y_i - y_{i0})^2 + (z_i - z_{i0})^2} \quad (16)$$

$$d_{\max} = \max(d_i) \quad (17)$$

分别计算光栅点处应变传递率在30%~90%之间变化时,传感系统重建形状中光栅点位置的绝对误差值 d_{\max} 。图9所示为光栅点位置绝对误差随应变传递率的变化曲线,可以看出,随着应变传递率的逐渐增大,曲线斜率逐渐逐渐增大,位置绝对误差减小幅度增大。在应变传递率由30%增大至40%的过程中,位置绝对误差减小了0.022 mm;在应变传递率由60%增大至70%的过程中,位置绝对误差减小了0.064 mm;在应变传递率由90%增大至100%过程中,位置绝对误差减小了0.080 mm,即当光栅点应变传递率保持在90%以上时,光栅点的重建位置误差将保持在0.080 mm内。因此,应变传递率越高,每提高一个传递率百分点,光栅点重建位置绝对误差变化越大,形状传感精度提升越明显。

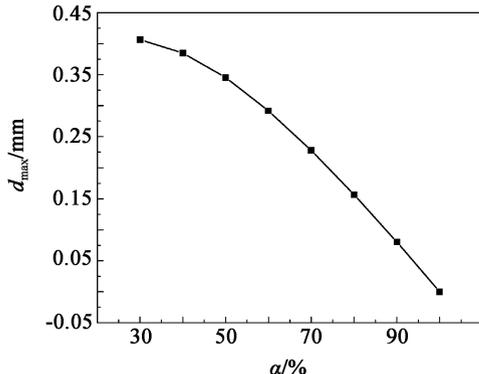


图9 应变传递率对重建位置误差的影响

5 结论

FBG形状传感器传感元件应变传递理论模型分析结果表明:理论计算与有限元仿真结果中应变传递率随光栅轴向距离分布变化趋于一致,光栅中心位置处的应变传递率基本相等;光栅粘结层长度越长,平均应变传递率越大;当粘结层材料弹性模量在 $1 \times 10^9 \sim 1 \times 10^{14}$ Pa之间变化时,理论计算与有限元仿真应变传递率均稳定保持在0.97附近;粘结层厚度对应变传递率的影响约为 $-0.6\%/0.01$ mm。在应变传递率对传感系统光栅点重建位置误差的影

响规律分析中,得出应变传递率越高,每提高一个应变传递率百分点,光栅点重建位置绝对误差变化量越大,形状传感精度提升越明显;且当光栅点应变传递率保持在90%以上时,光栅点的重建位置误差将保持在0.080 mm内。因此,通过合理控制光栅应变传递率的影响参数,能有效提高传感元件的应变传递率,减小传感系统的形状重建位置误差,达到提升光纤形状传感器形状重建精度的目的。

参考文献:

- [1] Hill K O, Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. J. of Lightwave Technol., 1997, 15(8): 1263-1276.
- [2] Ge J, James A E, Xu L, et al. Bidirectional soft silicone curvature sensor based on off-centered embedded fiber Bragg grating[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2016, 28(20): 2237-2240.
- [3] Lun T L T, Wang K, L J D, et al. Real-time surface shape sensing for soft and flexible structures using fiber Bragg gratings[J]. IEEE Robotics and Automation Lett., 2019, 4(2): 1454-1461.
- [4] 姜劭栋,张发祥,李淑娟,等. 光纤光栅应变传感系统在船舶结构监测中的应用[J]. 半导体光电, 2017, 38(2): 268-270. Jiang Shaodong, Zhang Faxiang, Li Shujuan, et al. Application of FBG strain sensing system in ship structure monitoring[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(2): 268-270.
- [5] 刘捷. 光纤传感应变检测理论、方法及其工程应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016. Liu Jie. Research on theory, method and engineering application of optical fiber sensor strain detection[D]. Wuhan: Wuhan University of Technol., 2016.
- [6] Henken K, Van Gerwen D, Van Den Dobbelen J, et al. Accuracy of needle position measurements using fiber Bragg gratings [J]. Minimally Invasive Therapy and Allied Technologies; MITAT: Official J. of the Society for Minimally Invasive Therapy, 2012, 21(5/6): 408-414.
- [7] Roesthuis R J, Kemp M, Dobbelen J J V D, et al. Three-dimensional needle shape reconstruction using an array of fiber Bragg grating sensors [J]. IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 2014, 19(4): 1115-1126.
- [8] Moon H, Jeong J, Kang S, et al. Fiber-Bragg-grating-based ultrathin shape sensors displaying single-channel sweeping for minimally invasive surgery[J]. Optics and Lasers in Engin., 2014, 59: 50-55.
- [9] Ryu S C, Dupont P E. FBG-based shape sensing tubes for continuum robots[C]// Proc. of 2014 IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), 2014.

(下转第844页)

一种双模大模场面积多芯光纤的设计和特性分析

赵丽娟, 王贺晴, 徐志钮*

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 提出了一种具有双模大模场面积的多芯光纤,建立了该多芯光纤的电磁场模型并采用有限元方法对其进行求解。基于该模型研究了光纤的模式特性和弯曲特性,系统分析了纤芯间距、纤芯半径和芯包折射率差对光纤模式特性和基模有效模场面积的影响。结果表明:通过引入空气孔并适当减少纤芯间距、纤芯半径和芯包折射率差,该光纤能实现严格的双模传输。保持双模传输时,通过增大纤芯间距,减小纤芯半径和芯包折射率差均有助于增大基模的模场面积。通过调整结构参数,在近似满足双模传输的条件下,光纤的基模模场面积在平直状态下可达到 $3\ 155\ \mu\text{m}^2$ 。

关键词: 多芯光纤; 双模; 大模场面积; 弯曲损耗

中图分类号: TN253 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0839-06

Design and Characteristic Analysis of a Dual-mode Large-mode-area Multi-core Fiber

ZHAO Lijuan, WANG Heqing, XU Zhiniu

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN)

Abstract: A dual-mode large-mode-area multi-core optical fiber is proposed in this paper, and the electromagnetic field model of the proposed fiber is constructed and solved by the finite element method. Both the mode and the bending characteristics of optical fiber are studied based on the model. The influence of the three parameters of core pitch, core radius and refractive index difference between core and cladding on the mode characteristics and effective mode field area of the fiber is analyzed systematically. The proposed multi-core fiber can realize strict dual-mode transmission by using air holes and reducing the core pitch, core radius and refractive index difference between core and cladding. When the optical fiber maintains dual mode transmission, the area of the mode field of the fundamental mode will increase with the increasing core pitch and decreasing fiber cores radius and the refractive index difference between core and cladding. If the dual-mode transmission is approximatively met, the mode field area of the fundamental modes of the straight fiber can reach $3\ 155\ \mu\text{m}^2$ by adjusting the structural parameters.

Key words: multi-core fiber; dual-mode; large-mode-area; bending loss

0 引言

随着互联网行业的飞速发展和信息需求的日益增长,人们对光通信网络传输容量的要求也在不断

提高。常规单芯单模光纤受到非线性效应等的限制,已逐渐接近其 100 Tb/s 的容量极限^[1]。基于模式复用的少模光纤^[2-4]可用来提升信道传输容量,但模式数量的增加会导致传输损耗增加,各模式之间的耦合也比较复杂,提高少模光纤模式的稳定性是需要解决的关键问题。

多芯光纤设计较为灵活,可通过改变结构来实现模式数量的控制^[6-7],而且强耦合型多芯光纤的模场分布可呈现超模特性^[8],具有超模特性时光纤通

收稿日期:2020-05-06.

基金项目:国家自然科学基金项目(51607066, 61377088);河北省自然科学基金资助项目(E2019502177, E2020502010);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2020YJ005, 2019MS085).

*通信作者:徐志钮

E-mail: wzcjxx@sohu.com

常具有大模场面积。增大光纤的模场面积可降低光纤中的光功率密度,有效减小非线性导致的不利影响^[5],实现大容量高功率传输。因此多芯光纤可实现少模大模场面积特性,为克服传输容量的限制提供解决方案。郑斯文等提出了不同结构的强耦合型多芯光纤结构^[9-11]并对其进行了研究。但是目前关于少模、大模场面积、强耦合型多芯光纤的研究仍然较少,需要进一步探索。

本文首先提出了一种八边形结构的多芯光纤,建立了其电磁场模型,并采用有限元法对该模型进行了求解以研究光纤的模式特性。该光纤通过引入空气孔结构,可使高阶模式截止,实现严格的双模传输^[9]。之后研究了纤芯间距、纤芯半径和芯包折射率差对光纤模式特性和基模有效模场面积的影响。通过选择适当的参数,可使近似满足双模传输时光纤的基模模场面积在平直状态下达到 $3\ 155\ \mu\text{m}^2$ 。最后分析了光纤的弯曲特性。

1 光纤结构及模式特性

1.1 光纤结构

本文所设计不含护套的光纤横截面结构如图 1 所示,包层为纯石英结构,纤芯部分由中间纤芯和三层按八边形排列的纤芯组成,其中部分纤芯替换为空气孔,图中灰色表示空气孔,蓝色表示纤芯。包层半径 $r_{cl}=62.5\ \mu\text{m}$,空气孔半径与纤芯半径相等,用 r_{co} 表示,纤芯间距用 Δ 表示,包层折射率 $n_{cl}=1.444$,纤芯折射率用 n_{co} 表示,纤芯与包层折射率差为 $\Delta n=n_{co}-n_{cl}$ 。

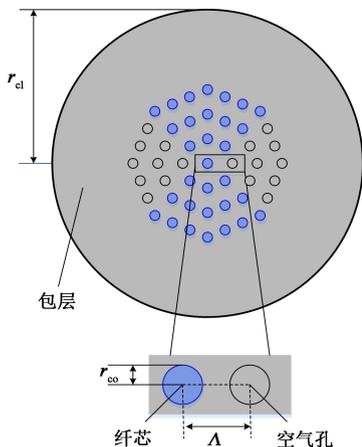


图 1 设计的多芯光纤横截面结构示意图

1.2 光纤模式特性

选用 COMSOL Multiphysics 软件建立上述多

芯光纤的二维电磁场模型并使用有限元方法对其进行求解,根据结果分析光纤特性。设置 $\Lambda=10\ \mu\text{m}$, $r_{co}=2\ \mu\text{m}$, $\Delta n=0.002$,入射波波长 $\lambda=1\ 550\ \text{nm}$,计算了所设计的光纤各模式的有效折射率 n_{eff} ,其中基模 HE_{11} 模的有效折射率 $n_{eff1}=1.444\ 183$,两个简并模式的有效折射率差 $B=|1.444\ 183\ 57-1.444\ 183\ 206|=3.64\times 10^{-7}$,双折射数值很小,可以忽略不计;二阶模 HE_{21} 模的有效折射率 $n_{eff2}=1.444\ 169$,两个简并模式的有效折射率差 $B=|1.444\ 169\ 522-1.444\ 169\ 168|=3.54\times 10^{-7}$,双折射数值也很小,可以忽略;二阶模 TE_{01} 模和 TM_{01} 模的有效折射率 $n_{eff3}=1.443\ 959$ 。光纤中传输的模式折射率 n_{eff} 需满足 $n_{cl}<n_{eff}<n_{co}$,低于包层折射率的模式不能在光纤中传导,据此可以判断模式截止特性。而 $n_{cl}<n_{eff1}<n_{co}$, $n_{cl}<n_{eff2}<n_{co}$, $n_{eff3}<n_{cl}$,说明 HE_{11} 和 HE_{21} 模能传输, TE_{01} 模和 TM_{01} 模截止,该光纤中可传导 4 个模式(两个简并的 HE_{11} 模和两个简并的 HE_{21} 模),图 2 给出了这 4 个模式的模场分布和二维电矢量分布。

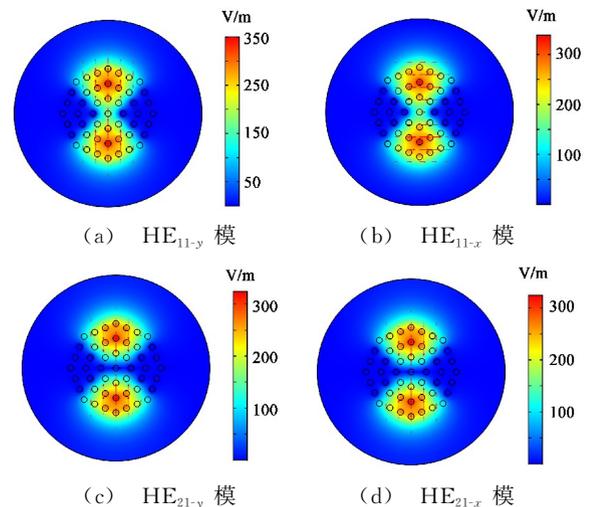


图 2 引入空气孔后 4 个模式的模场分布和二维电矢量分布

为了进行对比,计算了参数相同的无空气孔结构光纤的各个模式有效折射率,其中基模 HE_{11} 模的有效折射率 $n_{eff1}=1.444\ 318$,4 个二阶模(两个 HE_{21} 模、 TE_{01} 模和 TM_{01} 模)的有效折射率 $n_{eff2}=1.444\ 214$,高阶模式(两个 EH_{11} 模,两个 HE_{31} 模)的有效折射率 $n_{eff2}=1.444\ 082$,10 个模式的模场分布和二维电矢量分布在图 3 中给出。

比较图 2 和 3 可知,引入空气孔后高阶模式的数量减少,这是因为两侧及外层的空气孔形成了高

阶模的泄露通道,打破了高阶模的圆对称性,增加了高阶模的泄露损耗,光纤中只能传输2个基模 HE_{11} 模和2个二阶模 HE_{21} 模,即实现严格的双模传输。

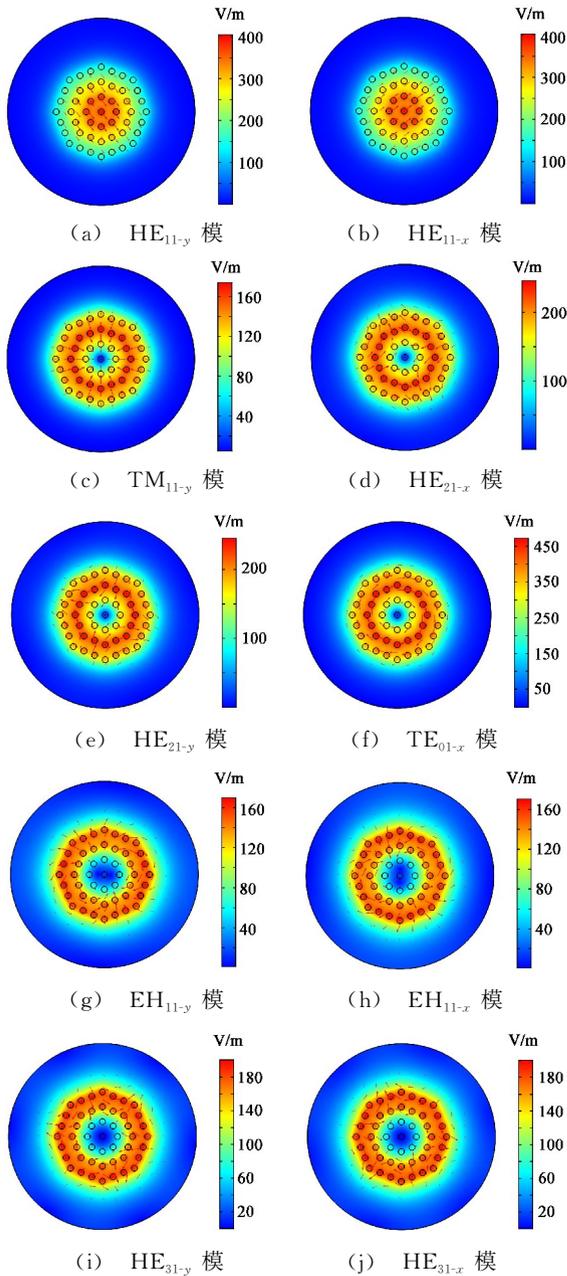


图3 无空气孔时10个模式的模场分布和二维电矢量分布

2 结构参数对光纤特性的影响

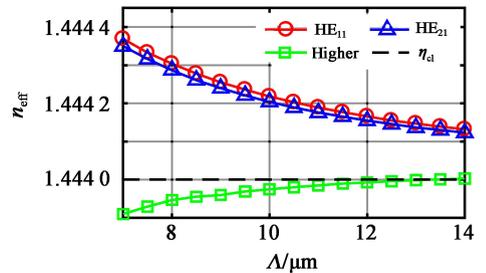
当纤芯结构发生变化时,纤芯之间的耦合作用会对模场面积产生影响,在保持双模特性的同时增大模场面积,本节研究纤芯间距 Δ 、纤芯半径 r_{co} 和芯包折射率差 Δn 对各个模式有效折射率和光纤基模有效模场面积的影响。其中,光纤基模有效模场面积 A_{eff} 为

$$A_{eff} = \frac{\left[\iint_S |E(x,y)|^2 dx dy \right]^2}{\iint_S |E(x,y)|^4 dx dy} \quad (1)$$

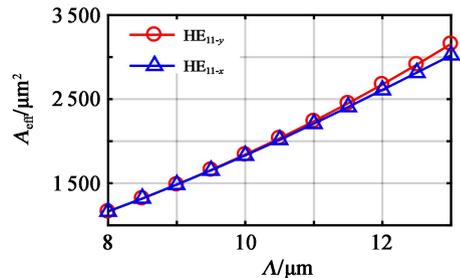
式中, $E(x,y)$ 为基模电场分布。

2.1 纤芯间距的影响

设置 $r_{co} = 2.1 \mu\text{m}$, $\Delta n = 0.002$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$, 各个模式有效折射率 n_{eff} 随纤芯间距 Δ 的变化如图4(a)所示。图中, HE_{11} 模和 HE_{21} 模均只用一条曲线表示, Higher 表示最接近截止的高阶模的有效折射率。可以看出,随着纤芯间距的增大, HE_{11} 模和 HE_{21} 模的有效折射率都逐渐减小,高阶模的折射率则逐渐增加。当 $\Delta > 12 \mu\text{m}$ 时,高阶模式满足传输条件,此时不能严格实现双模传输,但 $\Delta < 14 \mu\text{m}$ 时也能近似实现双模传输。



(a) 纤芯间距与有效折射率关系



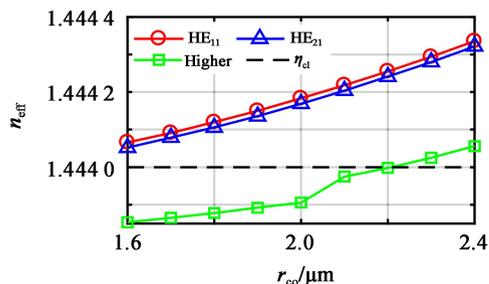
(b) 纤芯间距与模场面积关系

图4 纤芯间距对有效折射率和模场面积的影响

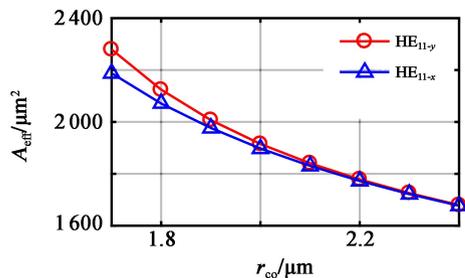
基模的模场面积 A_{eff} 随纤芯间距 Δ 的变化如图4(b)所示。可以看出,随着纤芯间距的增大,基模的 A_{eff} 逐渐增大。在纤芯间距相同时, HE_{11-y} 模的模场面积略大于 HE_{11-x} 模,且随着 Δ 的增大,两个模式的模场面积差逐渐增大。当 Δ 从 $8 \mu\text{m}$ 增加到 $13 \mu\text{m}$ 时, HE_{11-y} 模的 A_{eff} 从 $1163 \mu\text{m}^2$ 增加到 $3155 \mu\text{m}^2$, HE_{11-x} 模的 A_{eff} 从 $1163 \mu\text{m}^2$ 增加到 $3021 \mu\text{m}^2$ 。由图4可知,当其他参数不变时,适当增大 Δ 值,在保证双模传输的情况下能实现增大模场面积的目的。

2.2 纤芯半径的影响

设置 $\Lambda = 10 \mu\text{m}$, $\Delta n = 0.002$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$, 各个模式有效折射率 n_{eff} 随纤芯半径 r_{co} 的变化如图 5(a) 所示。可以看出, 各个模式的 n_{eff} 随着纤芯半径 r_{co} 的增大而增加。当 $1.6 \mu\text{m} < r_{\text{co}} < 2.2 \mu\text{m}$ 时, HE_{11} 模和 HE_{21} 模均满足传输条件, 当 $r_{\text{co}} > 2.2 \mu\text{m}$ 后, 高阶模式出现, 因此选取合适的 r_{co} 值可使高阶模式截止, 实现双模传输。



(a) 纤芯半径与有效折射率关系



(b) 纤芯半径与模场面积关系

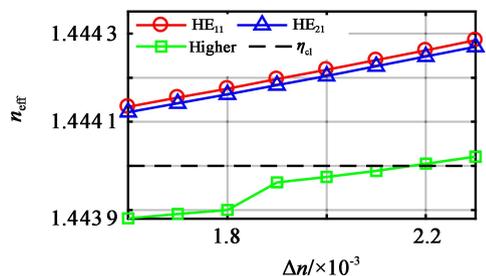
图 5 纤芯半径对有效折射率和模场面积的影响

HE_{11} 模的模场面积 A_{eff} 随纤芯半径 r_{co} 的变化如图 5(b) 所示。由图可知, 随着 r_{co} 的增大, HE_{11} 模的 A_{eff} 逐渐减小, r_{co} 相同时, HE_{11-y} 模的模场面积略大于 HE_{11-x} 模, 随着 r_{co} 的增大, 两者之间的差值逐渐减小。 HE_{11-y} 的模场面积最大值约为 $2278 \mu\text{m}^2$, HE_{11-x} 的模场面积最大值约为 $2187 \mu\text{m}^2$ 。由图 5 可知, 其他参数不变时, 适当减小纤芯半径可减少高阶模数量, 在保证严格双模传输的同时能够增大模场面积。

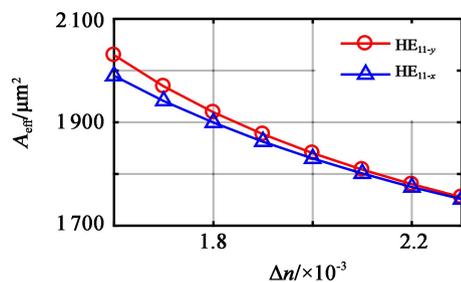
2.3 芯包折射率差的影响

设置 $\Lambda = 10 \mu\text{m}$, $r_{\text{co}} = 2.1 \mu\text{m}$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$, 各个模式有效折射率 n_{eff} 随芯包折射率差 Δn 的变化如图 6(a) 所示。当 $0.0016 < \Delta n < 0.0022$ 时, HE_{11} 模和 HE_{21} 模满足模式传输条件, 高阶模式截止, 可实现严格的双模传输。各模式的有效折射率随着 Δn 的增加而增大, 这是由于纤芯折射率的增大能使光功率更多地分布在纤芯中。基模模场面积 A_{eff} 随

Δn 的变化如图 6(b) 所示。可以看出, 当 Δn 由 0.0016 增大到 0.0023 时, HE_{11-y} 模的 A_{eff} 从 $2029 \mu\text{m}^2$ 减小到 $1754 \mu\text{m}^2$, HE_{11-x} 模的 A_{eff} 从 $1989 \mu\text{m}^2$ 减小到 $1750 \mu\text{m}^2$, 前者大于后者。由图 6 可知, 减小芯包折射率差可得到较大的模场面积, 但同时会减小各模式的有效折射率, 在其他参数不变时, 选择合适的 r_{co} 值可实现双模大模场传输。



(a) 芯包折射率差与有效折射率关系



(b) 芯包折射率差与模场面积关系

图 6 芯包折射率差对有效折射率和模场面积的影响

3 弯曲特性

光纤在实际应用时容易发生弯曲, 导致折射率发生变化, 本文利用将弯曲光纤等效为折射率随弯曲半径变化的平直光纤来分析所设计光纤的弯曲特性。设沿纸张横向向右方向为 x 轴正向, 沿纸张纵向向上方向为 y 轴正向, 当光纤沿 x 轴正向向 y 轴正向弯曲时, 其横截面等效折射率^[12-13]分布表示为

$$n(x, y) = n_0(x, y) \sqrt{1 + 2x/R_{\text{eff}}} \quad (2)$$

式中, $n_0(x, y)$ 为光纤初始折射率, $n(x, y)$ 为光纤弯曲后的等效折射率, R_{eff} 为引入校正因子后的弯曲半径, $R_{\text{eff}} = 1.28R$, R 为光纤真实弯曲半径。注意, 本节仍使用第 1 节的二维电磁场模型, 但折射率采用以上修正后的结果。

选择 2.2 节中的参数组合 ($\Lambda = 10 \mu\text{m}$, $r_{\text{co}} = 2 \mu\text{m}$, $\Delta n = 0.002$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$) 来对光纤的弯曲特性进行分析, 计算得到未弯曲情况下 HE_{11-y} 模的模场面积为 $1840 \mu\text{m}^2$, HE_{11-x} 模的模场面积为 $1830 \mu\text{m}^2$ 。在光纤包层外侧采用完美匹配层, 其使

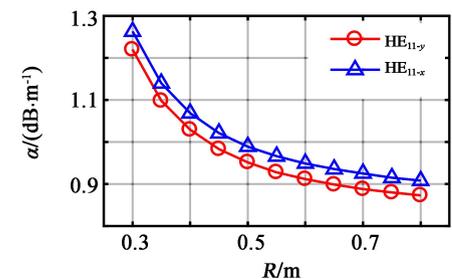
用高折射率材料(折射率为1.5)时,根据式(3)计算不同弯曲半径下基模的弯曲损耗^[14],如图7(a)所示,模场面积随弯曲半径的变化如图7(b)所示。

$$\alpha = -\frac{20\pi}{\ln 10} \text{Im}(\beta) \approx -8.686 \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \quad (3)$$

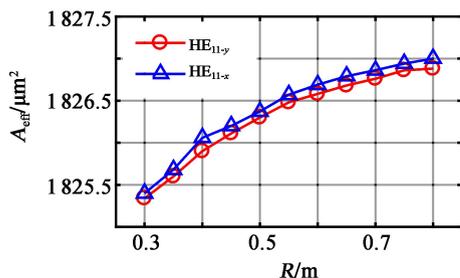
式中, α 为不同弯曲半径下基模的弯曲损耗, $\beta = (2\pi/\lambda) \cdot n_{\text{eff}}$ 为模式传播常数,Im表示复数的虚部。

由图7可知,随着弯曲半径的增大,基模的弯曲损耗逐渐减小,当弯曲半径 $R > 0.5$ m后,基模的弯曲损耗小于1 dB/m。弯曲半径增大时,基模的模场面积变化较小。与平直光纤相比,在弯曲状态下,HE_{11-y}模和HE_{11-x}模间模场面积差变小,两个模式的模场面积略有减小,但仍能达到1825 μm^2 。

传统光纤传感器多用于实现温度和应变^[15-20]、振动^[21]、电场^[22]、磁场^[23]、角速度^[24]等参量的传感,而多芯光纤不仅可以实现大容量、高功率的传输,还可以实现弯曲的传感^[25],是对常规光纤传感器的重要补充。



(a) 弯曲半径与基模弯曲损耗关系



(b) 弯曲半径与基模模场面积关系

图7 光纤的弯曲半径对基模模场面积和弯曲损耗的影响

4 结论

本文提出了一种引入空气孔结构的八边形多芯光纤。采用电磁场建模分析了光纤结构参数及弯曲半径等对模式特性和模场面积的影响。发现增大纤芯间距时,基模和二阶模的模式有效折射率减小,而高阶模式的折射率则逐渐增加,同时基模的模场面积增加,减小纤芯半径和芯包折射率差有助于增大

基模的模场面积,但会导致各个模式有效折射率的减小。通过选择适当的参数,该结构光纤可传导4个模式(2个简并的HE₁₁模和2个简并的HE₂₁模),实现严格的双模传输。在近似保持双模传输的条件下合理调整参数可使基模模场面积达到3155 μm^2 。弯曲半径增大时,基模弯曲损耗减小,模场面积略有增加。

参考文献:

- [1] Desurvire E B. Capacity demand and technology challenges for lightwave systems in the next two decades [J]. J. of Lightwave Technol., 2006, 24(12): 4697-4710.
- [2] 赵霞, 韦锦. 一种基于三芯光纤的模式复用器/解复用器的设计[J]. 半导体光电, 2018, 39(1): 32-36, 41. Zhao Xia, Wei Jin. Design of a mode multi/demultiplexer based on a three-core optical fiber [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2018, 39(1): 32-36, 41.
- [3] 裴丽, 王建帅, 郑晶晶, 等. 空分复用光纤的特性及其应用研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 42-53. Pei Li, Wang Jiانشuai, Zheng Jingjing, et al. Research on specialty and application of space-division multiplexing fiber[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 42-53.
- [4] 肖健, 胡贵军, 杜洋, 等. 用于模式复用的少模光纤设计及特性分析[J]. 半导体光电, 2013, 34(5): 830-832, 837. Xiao Jian, Hu Guijun, Du Yang, et al. Design and characteristic analysis of few-mode fiber used for mode division multiplexing[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(5): 830-832, 837.
- [5] 刘业辉, 李进延. 多芯光纤激光器选模特性及其研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 53-60. Liu Yehui, Li Jinyan. Mode properties and progress of multi-core fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 53-60.
- [6] Saitoh K. Multicore fiber technology [J]. J. of Lightwave Technol., 2016, 34(1): 55-64.
- [7] Sasaki Y, Amma Y, Takenaga K, et al. Few-mode multicore fiber with 36 spatial modes (three modes (LP₀₁, LP_{11a}, LP_{11b}) \times 12 Cores)[J]. J. of Lightwave Technol., 2015, 33(5): 964-970.
- [8] Xia Cen, Bai Neng, Ozdur I, et al. Supermodes for optical transmission[J]. Opt. Express, 2011, 19(17): 16653-16664.
- [9] 郑斯文, 林楨, 任国斌, 等. 一种新型多芯-双模-大模场面积光纤的设计和特性分析[J]. 物理学报, 2013, 62(4): 299-306. Zheng Siwen, Lin Zhen, Ren Guobin, et al. Design and analysis of novel multi-core dual-mode large-mode-area optical fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(4): 299-306.
- [10] Zheng S, Ren G, Lin Z, et al. A novel four-air-hole multicore dual-mode large-mode-area fiber: Proposal and design[J]. Optical Fiber Technol., 2013, 19(5): 419-427.
- [11] Jin W, Ren G, Jiang Y, et al. Few-mode and large-mode-

- area fiber with circularly distributed cores [J]. Opt. Commun., 2017, 387: 79-83.
- [12] Baggett J C, Monro T M, Furusawa K. Understanding bending losses in holey optical fibers[J]. Opt. Commun., 2003, 227(4-6): 317-335.
- [13] Schermer R T, Cole J H. Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment[J]. IEEE J. of Quantum Electron., 2007, 43(10): 899-909.
- [14] White T P, Kuhlmeier B T, Mephedran R C, et al. Multipole method for microstructured optical fibers. I. Formulation [J]. J. of the Optical Society of America B, 2003, 19(10): 2322-2330.
- [15] 王 甫, 江 淮, 易小龙, 等. 光纤光栅温度传感器增敏封装特性研究[J]. 半导体光电, 2020, 41(1): 73-76.
- Wang Fu, Jiang Huai, Yi Xiaolong, et al. Sensitivity enhancement and encapsulation of fiber Bragg grating temperature sensors[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(1): 73-76.
- [16] Xu Z, Zhao L. Accurate and ultra-fast estimation of Brillouin frequency shift for distributed fiber sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 303: 111822.
- [17] Masoudi A, Newson T P. High spatial resolution distributed optical fiber dynamic strain sensor with enhanced frequency and strain resolution[J]. Opt. Lett., 2017, 42(2): 290-293.
- [18] 徐志钮, 胡宇航, 赵丽娟, 等. 基于改进二次多项式拟合的布里渊频移快速高精度提取算法[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(3): 842-848.
- Xu Zhiniu, Hu Yuhang, Zhao Lijuan, et al. Fast and highly accurate Brillouin frequency shift extracted algorithm based on modified quadratic polynomial fit[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(3): 842-848.
- [19] 徐志钮, 胡宇航, 赵丽娟, 等. 基于单斜坡法的光电复合海缆温度、应变快速测量方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 202-208.
- Xu Zhiniu, Hu Yuhang, Zhao Lijuan, et al. Rapid temperature and strain measurement method for optic - electric composite submarine cable based on slope-assisted method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 202-208.
- [20] Zhou Y, Yan L S, He H J, et al. Brillouin optical time domain collider for fast dynamic sensing[J]. Opt. Express, 2020, 28(3): 3965-3974.
- [21] 张智娟, 郭文翰, 徐志钮, 等. 基于 φ -OTDR 的光纤传感技术原理及其应用现状[J]. 半导体光电, 2019, 40(1): 9-16.
- Zhang Zhijuan, Guo Wenhao, Xu Zhiniu, et al. Principle of optical fiber sensing technology based on φ -OTDR and its application status[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(1): 9-16.
- [22] 徐福华, 丁凤建, 陈 玲, 等. 高精度纳秒强电磁脉冲集成光学电场传感器性能分析[J]. 半导体光电, 2019, 40(6): 793-795.
- Xu Fuhua, Ding Fengjian, Chen Ling, et al. Performance analysis on integrated optical electric field sensor for high-accuracy nanosecond intense electromagnetic pulse measurement [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(6): 793-795.
- [23] Wang E, Cheng P, Li J, et al. High-sensitivity temperature and magnetic sensor based on magnetic fluid and liquid ethanol filled micro-structured optical fiber[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 55: 102161.
- [24] 梅 甦, 蒋治国, 胡宗福. 谐振式光纤陀螺的误差及噪声分析[J]. 半导体光电, 2020, 41(1): 29-34.
- Mei Su, Jiang Zhiguo, Hu Zongfu. Analysis on error and noise of resonant fiber optic gyros[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(1): 29-34.
- [25] Yuan L. Recent progress of in-fiber integrated interferometers[J]. Photonic Sensors, 2011, 1(1): 1-5.

作者简介:

赵丽娟(1981—),女,博士,副教授,主要研究方向为光纤传感与光纤通信;

徐志钮(1979—),男,博士,副教授,主要研究方向为分布式光纤传感及其在电气设备状态监测和故障诊断中的应用。

(上接第 838 页)

- [10] 沈林勇, 肖 海, 钱晋武, 等. 智能内窥镜的形状重建和可视化方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014(12): 2725-2730.
- Shen Linyong, Xiao Hai, Qian Jinwu, et al. Shape reconstruction and visualization of intelligent endoscope [J]. Chinese J. of Scientific Instrument, 2014(12): 2725-2730.
- [11] Park Y L, Elayaperumal S, Daniel B, et al. Real-time estimation of 3-D needle shape and deflection for MRI-guided interventions[J]. IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 2010, 15(6): 906-915.
- [12] 章亚男, 范 迪, 沈林勇, 等. FBG 细径形状传感器的应变传递和精度实验[J]. 光学精密工程, 2019, 27(7): 1481-1491.
- Zhang Yanan, Fan Di, Shen Linyong, et al. Strain transmission and accuracy experiment on fiber Bragg grating small-diameter shape sensors[J]. Optics and Precision Engin., 2019, 27(7): 1481-1491.
- [13] Abayazid M, Kemp M, Misra S. 3D flexible needle steering in soft-tissue phantoms using fiber Bragg grating sensors [C]// Proc. of 2013 IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), 2013.

作者简介:

张冬伟(1995—),男,河南省洛阳市人,硕士研究生,主要研究方向为先进光学传感与仪器。

光纤研磨纸粒度对侧边研磨塑料 光纤传感器灵敏度的影响

冯利民^{1,2}, 巫涛江^{2,3}, 赵杰³, 吴德操^{2*}

(1. 武汉纺织大学 数学与计算机学院, 武汉 430200; 2. 重庆理工大学 智能光纤感知技术重庆市高校工程研究中心, 重庆市光纤传感与光电检测重点实验室, 重庆 400054; 3. 电梯智能运维重庆市高校工程中心, 重庆 402260)

摘要: 为了提高侧边研磨型(D形)塑料光纤倏逝波传感器的灵敏度,采用不同粒度的光纤研磨纸对塑料裸光纤进行侧边研磨,制备了不同直径及不同表面粗糙度的D形塑料光纤倏逝波传感器。实验观测了D区表面形貌、D区直径与表面粗糙度对传感器光传输性能及灵敏度的影响。实验研究发现:D形敏感区域直径及表面粗糙度对传感器光传输及灵敏度影响显著;传感器灵敏度随着D区直径的减小先增大后减小,当D区直径为1200 μm时,传感器对葡萄糖溶液的响应灵敏度达到最大值: $-0.0032 \text{ (mg/L)}^{-1}$;当采用粒度为9 μm的光纤研磨纸对光纤进行研磨时,传感器的灵敏度将进一步提升至 $-0.0045 \text{ (mg/L)}^{-1}$,是未经研磨塑料光纤传感器灵敏度的11.25倍。

关键词: 塑料光纤; 倏逝波; 传感器; 表面粗糙度; 光传输; 灵敏度

中图分类号: TP212 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0845-05

Influence of The Particle Size of Optical Fiber Grinding Paper on The Sensitivity of Edge-lapping Plastic Optical Fiber Sensor

FENG Limin^{1,2}, WU Taojiang^{2,3}, ZHAO Jie³, WU Dechao²

(1. School of Mathematics and Computer, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, CHN; 2. Chongqing Key Laboratory of Fiber Optic Sensor and Photodetector, Intelligent Fiber Sensing Technology of Chongqing Municipal Engineering Research Center of Institution of Higher Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, CHN; 3. Tielian Operation and Maintenance of Chongqing Municipal Engineering Research Center of Institution of Higher Education, Chongqing 402260, CHN)

Abstract: In order to improve the sensitivity of the edge-lapping (D-shaped) plastic optical fiber (POF) evanescent wave sensor, the optical fiber grinding paper with different particle diameters was used to grind the uncoated POFs to prepare D-shaped POF evanescent wave sensors with different diameters and different surface roughness. The surface morphology of the D-shaped region was checked, and the effects of the diameter and surface roughness of the D-shaped region on the light transmission and sensitivity of the sensors were investigated experimentally. Experimental results indicate that the diameter and surface roughness of the D-shaped sensitive region have a significant effect on the light transmission and sensitivity of the sensor. The sensitivity increases first and then decreases as the diameter of the D-shaped region decreases, and when the diameter is 1200 μm, the sensor's response sensitivity to glucose solution reaches a maximum

of $-0.0032 \text{ (mg/L)}^{-1}$; when the D-shaped region is polished with the fiber optic paper with the particle size of 9 μm, the sensor's sensitivity will be further improved to $-0.0045 \text{ (mg/L)}^{-1}$, which is 11.25 times of that of POF sensor without grinding.

收稿日期: 2020-07-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51876018); 重庆市教委项目(KJQN201905604); 重庆市科技局技术创新与应用发展重点项目(cstc2019jsex-mbdxX0002).

* 通信作者: 吴德操 E-mail: wudecao@163.com

Key words: plastic optical fiber; evanescent wave; sensor; surface roughness; light transmission; sensitivity

0 引言

塑料光纤相比于石英光纤具有成本低、数值孔径大、光收集能力强、弯曲半径小、柔韧性好等优点,已被广泛应用于短距离光纤通信及光纤传感领域^[1-3]。在光纤传感领域,塑料光纤因具有良好的生物相容性、耐腐蚀、抗电磁干扰、易操作等优点,已被应用于化学、生物化学、生命科学和环境等研究方向^[4]。尽管塑料光纤倏逝波传感器具有上述诸多优点,但其灵敏度低^[5]。

为了提高塑料光纤倏逝波传感器的灵敏度,研究者们提出了侧边研磨型(D形)、U形、S形、螺旋形、锥形、双锥形等光纤倏逝波传感器^[6-8]。在这些不同结构类型的光纤倏逝波传感器中,D形传感器制备工艺简单、制备重复性高,而且采用D形传感器可进一步制成U形、S形及螺旋形光纤倏逝波传感器。因此,D形光纤倏逝波传感器成为研究者及仪器厂商最为关注的一种传感器件^[5,9]。

为了提高D形光纤倏逝波传感器的灵敏度,研究者们研究了D形区域直径对传感器光传输性能及灵敏度的影响^[5]。武睿等^[10]研究表明,光纤经过热融、打点、切割、喷砂、研磨或激光等处理后,光纤表面会发生破损,导致侧面发光增强,从而影响光纤的光传输性能。Zhong等^[11-12]采用氢氟酸对石英光纤进行腐蚀,发现光纤表面粗糙度会对传感器光传输性能及灵敏度产生影响,适宜的表面粗糙度将增大传感器的灵敏度。虽然采用湿腐蚀方法能制备出不同直径的圆柱形或锥形石英或塑料光纤,但是腐蚀法难以制备出D形光纤。

为了提高D形塑料光纤倏逝波传感器的灵敏度,本文采用不同粒度的光纤研磨纸对塑料裸光纤进行了侧边研磨,制备了不同直径及不同表面粗糙度的D形塑料光纤倏逝波传感器。实验研究了D区直径对传感器光传输及性能灵敏度的影响,以及采用不同光纤研磨纸研磨后的D形光纤的光传输特性及其对葡萄糖溶液的响应特性。

1 实验材料与系统

1.1 实验材料

塑料光纤由直径为 2 000 μm 的聚甲基丙烯酸

甲酯(PMMA)芯层和直径为 50 μm 的氟塑料包层构成,纤芯折射率为 1.49,光纤工作温度为 $-40 \sim 70\text{ }^\circ\text{C}$ 。为了研究光纤研磨纸粒度对D形塑料光纤传感器灵敏度的影响,实验选取长度为 0.5 m 的塑料光纤,将其中间长度为 3 cm 的光纤保护层剥离,然后利用光纤研磨仪和不同粒度的光纤研磨纸(金刚石磨料)对塑料裸光纤进行侧边研磨,制备了不同D区直径($2000-d$,其中 d 为研磨深度)及不同表面粗糙度的D形塑料光纤倏逝波传感器。D形光纤结构示意图如图1所示。

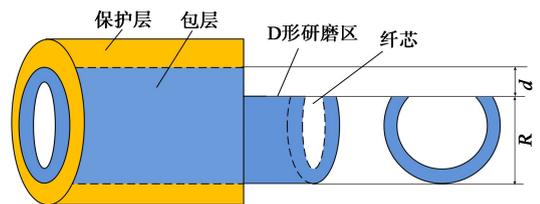


图1 D形塑料光纤结构示意图

1.2 实验系统

传感器实验系统如图2所示,该系统由宽带光源、光纤耦合器、D形塑料光纤传感器、光功率计、光纤光谱仪、样品池等组成。光源为海洋光学 DH-2000 型氙-卤钨灯(氙灯 25 W, 卤钨灯 20 W)宽带光源,光谱范围为 215~2 500 nm。光功率计的光谱探测范围为 200~1 100 nm,探测功率范围为 100 pW~0.2 W,准确度为 1%~4%。QE65 Pro 光谱仪探测光谱范围为 200~1 100 nm。实验过程中,为了表征D形光纤倏逝波传感器的灵敏度,采用葡萄糖溶液作为分析液,葡萄糖溶液浓度范围为 0~12.5 g/100 mL。本文中传感器灵敏度采用传感器输出光强的相对变化量表示: $S = (I_c - I_0)/I_0$, 其中 I_c 和 I_0 分别表示传感器在浓度为 c (g/100 mL) 的葡萄糖溶液和蒸馏水中的输出光强。

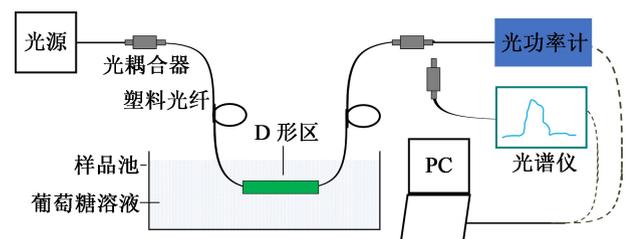


图2 传感器测量系统结构示意图

2 实验结果与讨论

2.1 D区直径对传感器光传输及灵敏度的影响

为了获得高灵敏度的塑料光纤倏逝波D形传感器,首先采用粒度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 的光纤研磨纸对光纤进行了研磨,研磨后光纤传感区域(D形区域)的直径为 $2\ 000\sim 600\ \mu\text{m}$,即研磨深度 d 为 $0\sim 1\ 400\ \mu\text{m}$ 。研磨后的D形光纤在空气中的传输光谱信息如图3所示。

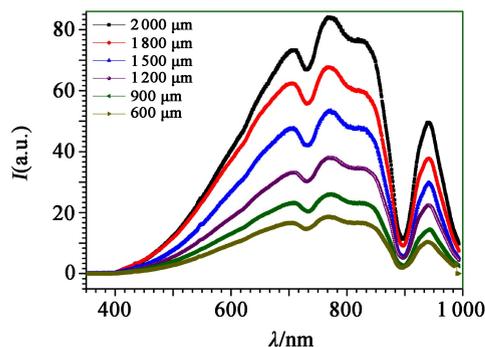


图3 D区直径对传感器光传输性能的影响

从图3中可以看出,随着光纤研磨深度的增加,光纤传输光谱的质量降低。其原因在于,首先,当光纤被研磨为D形后,部分光直接从未经研磨和经过研磨后D形光纤的分界面直接透射进入外界环境;其次,在D形区域,研磨后的光纤表面具有一定粗糙度,从而增加了光束在光纤与外界环境界面的散射损耗,降低了光纤传输光谱的质量。

为了研究光纤研磨深度对传感器灵敏度的影响,实验测试了采用粒度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 的光纤研磨纸制备的D形传感器对葡萄糖溶液的响应特性,其实验结果如图4所示。

从图4中可以看出,传感器灵敏度 S 随着光纤研磨深度的增加呈先增大后减小的趋势,当D形区域直径为 $1\ 200\ \mu\text{m}$ (研磨深度 d 为 $800\ \mu\text{m}$)时,传感器的灵敏度最佳。因为光纤表面辐射光强随着光纤研磨的深度增加而增大(透射光能量降低,如图3所示),光纤表面光强越强,其与分析物作用强度越大,当葡萄糖溶液浓度增加时,光衰减量越大,传感器灵敏度得到提升。当D形区域直径小于 $1\ 200\ \mu\text{m}$ 时,进一步减小D形区域的直径,传感器灵敏度降低,这是因为光纤内部传输的有效光强减弱,导致光纤表面有效的倏逝波强度减弱^[11-12]。当D区直径为 $1\ 200\ \mu\text{m}$ 时,传感器灵敏度 S 与葡萄糖浓度 c 之间的函数关系为: $S = -0.003\ 2c - 0.002\ 7(R^2 =$

$0.989\ 7)$,计算得传感器对葡萄糖溶液的灵敏度达到 $-0.003\ 2\ (\text{mg/L})^{-1}$,是未经研磨塑料光纤的8倍。

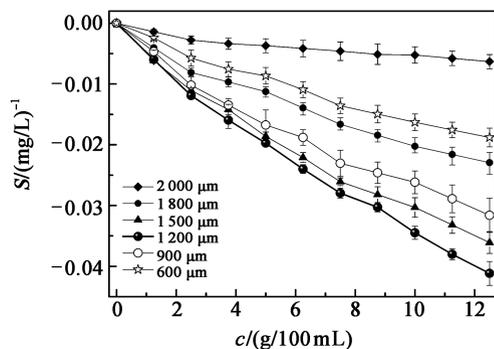


图4 D区直径对传感器灵敏度的影响

2.2 光纤研磨纸粒度对传感器表面形貌、光传输性能及灵敏度的影响

文献[11-12]研究指出,光纤倏逝波传感器的灵敏度受到光纤表面粗糙度的影响,为了研究D形区域光纤表面粗糙度对传感器灵敏度的影响,采用扫描电镜(SEM)对不同粒度光纤研磨纸研磨塑料后的光纤表面形貌进行了分析,实验结果如图5所示。

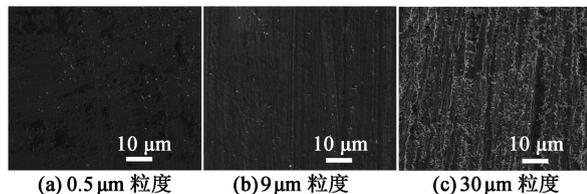


图5 采用不同粒度光纤研磨纸研磨后的D形光纤表面形貌

从图5中可以看出,采用不同粒度光纤研磨纸研磨后的光纤表面具有不同的粗糙度,光纤研磨纸粒度越大,光纤表面粗糙度越大。采用不同粒度光纤研磨纸研磨后的光纤(经研磨后光纤的直径为 $1\ 200\ \mu\text{m}$)在空气中的传输光谱如图6所示。

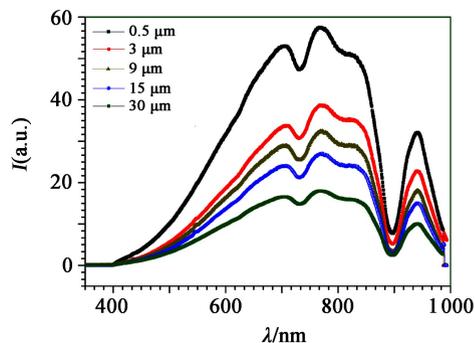


图6 光纤研磨纸粒度对传感器光传输性能的影响

从图 6 中可以看出,在相同直径下,光纤研磨纸粒度越大,光纤传输光谱质量越低。其原因在于光纤研磨纸粒度越大,研磨后的光纤表面粗糙度越大(如图 5 所示),导致光束在光纤与外界环境界面的散射和折射越强,光衰减越强,传输光谱质量降低^[5]。

此外,为了进一步提升 D 形塑料光纤倏逝波传感器的灵敏度(D 区直径为 1 200 μm),实验研究了光纤研磨纸粒度对侧边研磨塑料光纤传感器灵敏度的影响,如图 7 所示。

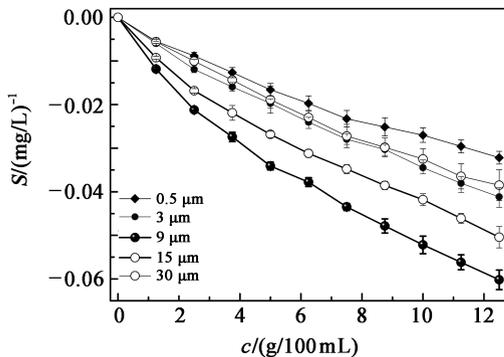


图 7 光纤研磨纸粒度对传感器灵敏度的影响

从图 7 中可以看出,传感器灵敏度随着光纤研磨纸粒度的增大呈先增大后减小的趋势,当光纤研磨纸的粒度为 9 μm 时,传感器的灵敏度最佳。先随着光纤研磨纸的粒度增大而增加,是因为光纤研磨纸的粒度越大,研磨后的光纤表面粗糙度越大,适当的光纤表面粗糙度将有助于提升光纤表面倏逝波的强度及透射深度^[5,11-12],从而提高传感器的灵敏度。然而,当光纤研磨纸的粒度大于 9 μm 时,传感器敏感区的表面粗糙度过大,降低了光纤内部传输的有效光强及光纤表面有效的倏逝场强度^[11-12],从而降低了传感器的灵敏度。当 D 形光纤传感器采用粒度为 9 μm 的光纤研磨纸研磨制备时,传感器的灵敏度达到 $-0.0045(\text{mg/L})^{-1}$,是未经研磨传感器的 11.25 倍,且传感灵敏度 S 与葡萄糖浓度 c 间具有函数关系: $S = -0.0045c - 0.0074(R^2 = 0.9678)$ 。

3 结论

本文采用了不同粒度光纤研磨纸对塑料光纤进行了侧边研磨,制备了不同直径及不同表面粗糙度的 D 形塑料光纤倏逝波传感器。实验观察了 D 形光纤的表面形貌,研究了传感器的光传输特性及其

对葡萄糖溶液响应灵敏度。研究发现:当采用粒度为 9 μm 的光纤研磨纸将光纤 D 区直径研磨至 1 200 μm 时,传感器灵敏度达到最大值: $-0.0045(\text{mg/L})^{-1}$,是未经研磨传感器的 11.25 倍。该研究结果将有助于推动塑料光纤传感器在实际工程中的应用。

参考文献:

- [1] Zhong N, Liao Q, Zhu X, et al. Temperature-independent polymer optical fiber evanescent wave sensor[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 11508-11508.
- [2] 张鹏,王博思. 基于塑料光纤的智能交通移动边缘计算通信系统设计[J]. 半导体光电, 2019, 40(6): 886-890.
Zhang Peng, Wang Bosi. Design of a POF-based communication system for edge computing in intelligent transportation system[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(6): 886-890.
- [3] 孔德鹏,张大明,袁苑,等. 塑料光纤的研究与应用进展[J]. 光子学报, 2019, 48(11): 71-85.
Kong Depeng, Zhang Daming, Yuan Yuan, et al. Progress in research and applications of plastic optical fiber[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(11): 71-85.
- [4] Aitkulov A, Tosi D. Optical fiber sensor based on plastic optical fiber and smartphone for measurement of the breathing rate[J]. IEEE Sensors J., 2019, 19(9): 3282-3287.
- [5] Zhong N, Wang Z, Chen M, et al. Three-layer-structure polymer optical fiber with a rough inter-layer surface as a highly sensitive evanescent wave sensor[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 254: 133-142.
- [6] 刘婷,王文琪,刘志群,等. 基于量子点和倏逝波的汞离子检测光纤传感器[J]. 光学学报, 2018, 38(10): 122-127.
Liu Ting, Wang Wenqi, Liu Zhiqun, et al. Optical fiber sensor for mercury ion detection based on quantum dots and evanescent wave sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 122-127.
- [7] 刘婷,王文琪,刘志群,等. CdSe/ZnS 量子点在倏逝波光纤 pH 传感中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(6): 1944-1948.
Liu Ting, Wang Wenqi, Liu Zhiqun, et al. Applications of CdSe/ZnS quantum dot in optical fiber evanescent-wave pH sensing[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(6): 1944-1948.
- [8] 胡新宇,田霞,赵明富,等. 在线测量 Fe^{3+} 浓度的塑料光纤倏逝波传感系统[J]. 半导体光电, 2017, 38(5): 656-660, 664.
Hu Xinyu, Tian Xia, Zhao Mingfu, et al. On-line measurement of Fe^{3+} concentration of evanescent wave sensing system based on plastic optical fiber biosensor[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(5): 656-660, 664.
- [9] 庄须叶,吴一辉,王淑荣,等. 新结构 D 形光纤消逝场传感器[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10): 1936-1941.
Zhuang Xuyue, Wu Yihui, Wang Shurong, et al. Optical fiber

- evanescent field sensor based on new type D-shaped fiber[J]. Optics and Precision Engin., 2008, 16(10): 1936-1941.
- [10] 武睿, 王金春, 杨斌. 拉伸对光纤侧发光性能的影响[J]. 纺织学报, 2011, 32(7): 8-12.
- Wu Rui, Wang Jinchun, Yang Bin. Influence of extension on side-glowing properties of polymer optical fiber [J]. J. of Textile Research, 2011, 32(7): 8-12.
- [11] Zhong N, Liao Q, Zhu X, et al. High-quality fiber fabrication in buffered hydrofluoric acid solution with ultrasonic agitation[J]. Appl. Opt., 2013, 52(7): 1432-1440.
- [12] Zhong N, Zhu X, Liao Q, et al. Effects of surface roughness on optical properties and sensitivity of fiber-optic evanescent wave sensors[J]. Appl. Opt., 2013, 52(17): 3937-3940.
- 作者简介:**
- 冯利民(1975—),男,湖北武汉人,硕士,讲师,智能光纤感知技术重庆市高校工程研究中心、重庆市光纤传感与光电检测重点实验室访问学者,研究方向为信息处理技术;
- 吴德操(1984—),男,重庆人,博士,特聘副教授,研究方向为光纤传感器。
-
- (上接第 797 页)
- [6] Deng L, Shi H, Meng X, et al. Pure and stable top-emitting white organic light-emitting diodes utilizing heterojunction blue emission layers and wide-angle interference[J]. ACS Appl. Mater. & Interfaces, 2014, 6(7): 5273-5280.
- [7] Park C H, Lee H J, Hwang J H, et al. High-performance hybrid buffer layer using 1, 4, 5, 8, 9, 11-hexaazatriphenylenehexacarbonitrile/molybdenum oxide in inverted top-emitting organic light-emitting diodes[J]. ACS Appl. Mater. & Interfaces, 2015, 7(11): 6047-6053.
- [8] 谢嘉凤, 王振, 陈爱, 等. 以 DCJT B 为颜色转换层的三原色 WOLED 研究[J]. 半导体光电, 2019, 40(5): 620-625.
- Xie Jiafeng, Wang Zhen, Chen Ai, et al. Three primary-colored WOLED adopting DCJT B as color conversion layer[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(5): 620-625.
- [9] Lu M H, Weaver M S, Zhou T X, et al. High-efficiency top-emitting organic light-emitting devices [J]. Appl. Phys. Lett., 2002, 81(21): 3921-3923.
- [10] Chen S, Zhao Z, Jie Z, et al. A green top-emitting organic light-emitting device with improved luminance and efficiency [J]. J. of Physics D: Appl. Phys., 2006, 39(17): 3738-3741.
- [11] Won C H, Young K S, Kim K, et al. Enhancement of hole injection using O₂ plasma-treated Ag anode for top-emitting organic light-emitting diodes[J]. Appl. Phys. Lett., 2005, 86(1): 12104.
- [12] Hung L S, Tang C W, Mason M G, et al. Application of an ultrathin LiF/Al bilayer in organic surface-emitting diodes [J]. Appl. Phys. Lett., 2001, 78(4): 544-546.
- [13] Lim J T, Lee J H, Yeom G Y, et al. Top-emitting organic light-emitting diodes with Ba/Ag/indium tin oxide cathode and built-in potential analyses in these devices [J]. J. of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces and Films, 2008, 26(4): 961-965.
- [14] Chen S, Li X, Huang W. Blue top-emitting organic light-emitting devices using a 2, 9-dimethyl-4, 7-diphenyl-1, 10-phenanthroline outcoupling layer [J]. Organic Electron., 2008, 9(6): 1112-1117.
- [15] Lee C J, Ponde R B, Moon D G, et al. Realization of an efficient top emission organic light-emitting device with novel electrodes[J]. Thin Solid Films, 2004, 467(1): 201-208.
- [16] Park M J, Kim S K, Ponde R, et al. Low absorption semi-transparent cathode for micro-cavity top-emitting organic light emitting diodes[J]. Organic Electron., 2018, 52: 153-158.
- [17] Peng H, Sun J, Zhu X, et al. High-efficiency microcavity top-emitting organic light-emitting diodes using silver anode [J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 88(7): 73517.
- [18] Han S, Huang C, Lu Z. Color tunable metal-cavity organic light-emitting diodes with fullerene layer [J]. J. of Appl. Phys., 2005, 97(9): 93102.
- [19] Wu Y C S, Huang P. Effect of Ni thin film on the reflectivity of ITO/Ag mirrors of GaN light-emitting diodes [J]. Electrochemical and Solid-State Lett., 2008, 11(11): J82.
- [20] Chen S, Xie W, Meng Y, et al. Effect of 2,9-dimethyl-4,7-diphenyl-1, 10-phenanthroline outcoupling layer on electroluminescent performances in top-emitting organic light-emitting devices[J]. J. of Appl. Phys., 2008, 103(5): 54506.
- 作者简介:**
- 王振(1982—),男,博士,副教授,主要研究方向为半导体光电器件。

ITO 薄膜的电阻并联效应研究

王松林^{1*}, 杨崇民¹, 张建付¹, 李缘², 米高园¹, 刘青龙¹

(1. 西安应用光学研究所, 西安 710065; 2. 西安飞机工业(集团)有限责任公司, 西安 710089)

摘要: 采用电子束蒸发镀膜方法在 K9 玻璃基底上分别镀制了 ITO/SiO₂/ITO, ITO/Ti₂O₃/ITO 和 ITO/MgF₂/ITO 结构的多层薄膜, 用四探针方块电阻仪测量薄膜表面的方块电阻, 用原子力显微镜观测样品的表面微观形貌。结果显示, 当 ITO 薄膜的粗糙度较大且介质薄膜的物理厚度小于 100 nm 时, 各层 ITO 薄膜之间通过山峰状的凸起结构相连通, 导致样片表面的方块电阻测量值与各层 ITO 薄膜电阻的并联值相当。这表明, 当 ITO 薄膜的粗糙度较大且介质薄膜厚度较小时, 各层 ITO 薄膜表现出电阻并联效应。利用多层 ITO 薄膜的电阻并联效应设计并制备了 450~1 200 nm 超宽光谱透明导电薄膜, 用四探针方块电阻仪测量了试验样片的表面方块电阻, 用紫外-可见-近红外分光光度计测试了样片的光谱透射率。结果显示, 在相同表面方块电阻条件下, 相比于单层 ITO 薄膜, 利用 ITO 薄膜电阻并联效应所制备的多层透明导电薄膜具有更高的光谱透射率。

关键词: 电子束蒸发; ITO 薄膜; 方块电阻; 超宽光谱

中图分类号: TB383.2 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0850-05

Research on Resistance Parallel Effect of ITO Films

WANG Songlin¹, YANG Chongmin¹, ZHANG Jianfu¹, LI Yuan², MI Gaoyuan¹, LIU Qinglong¹

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, CHN;

2. AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Company Ltd., Xi'an 710089, CHN)

Abstract: Multilayer films with the structures of ITO/SiO₂/ITO, ITO/Ti₂O₃/ITO and ITO/MgF₂/ITO were coated on the K9 glass substrate by electron beam evaporation coating method. The square resistance on the surface of the films was measured by four-probe square resistor and the surface microstructure of the samples was observed by atomic force microscope (AFM). The results show that when the roughness of ITO film is large and the physical thickness of the medium film is less than 100 nm, each layer of ITO films is connected through some bump structures like mountains, resulting in that the measured square resistance of the surface of the sample film is almost the same as the square resistance in parallel of each layer of ITO films. This indicates that when ITO film roughness is large and medium film thickness is small, it will cause the resistance of each ITO film to be in parallel. The 450~1 200 nm ultra-wide spectrum transparent conductive film was designed and prepared by using the square resistance parallel effect of multilayer ITO films. The surface square resistance of the test sample was measured with a four-probe square resistor and the spectrum transmittance of the sample was measured with a spectrophotometer. The results show that the multilayer transparent conductive film prepared by the square parallel resistance effect of ITO films has a higher spectral transmittance than the single layer ITO film under the same surface square resistance.

收稿日期: 2020-04-25.

* 通信作者: 王松林 E-mail: wangsr5527@163.com

Key words: electron beam evaporation; ITO thin films; square resistance; super-wide spectrum

0 引言

氧化铟锡 (Indium Tin Oxide, ITO) 是一种 n 型半导体材料, 是由 In_2O_3 和 SnO_2 组成的复合材料, 具有良好的导电性。ITO 材料在纳米尺寸的薄膜状态时对可见光和近红外光具有较高的透过率^[1-2], 由于 ITO 薄膜具有良好的光学和电学性能, 常常被用于太阳能电池、液晶显示、电磁屏蔽、除冰除霜、雷达隐身等光学窗口器件的关键组成部分^[2-7]。

ITO 透明导电薄膜的制备方式有多种, 常见的有电子束蒸发、磁控溅射、离子束溅射、离子辅助沉积等^[8-14], 不同沉积方式制备的 ITO 薄膜各有特点。根据 Ostwald 规则, 薄膜形成稳定晶相所需要的时间随基底的温度上升而减少, 因为基底能够提供的温度越高, 基底表面上的沉积粒子就越能在短时间内规整到合适的位置。如果规整时间小于猝冷时间, 将形成更理想的晶体, 反之结晶质量将变差, 从而导致各种缺陷增加而使薄膜的损耗更大^[15-17]。因此, 为了获得高质量的 ITO 薄膜, 常采用离子束溅射、磁控溅射或离子辅助沉积等方式制备薄膜。

采用电子束蒸发制备的 ITO 薄膜虽然在光学和电学性能上相比其他方式制备的薄膜较差, 但在实验中发现, 电子束蒸发制备的 ITO/ SiO_2 /ITO, ITO/ Ti_2O_3 /ITO, ITO/ MgF_2 /ITO 等多层薄膜结构, 其中的 ITO 薄膜粗糙度较大, 在 SiO_2 , Ti_2O_3 和 MgF_2 等介质间隔层厚度较小时, 各层 ITO 薄膜之间可以通过表面的山峰状凸起结构相连通。这一现象类似于将多个电阻并联在一起, 使得样片表面的方块电阻可以达到更低值。本文通过实验来解释这一现象, 并且利用这种 ITO 电阻并联效应制备了 450~1 200 nm 的超宽光谱透明导电膜层。

1 实验方法

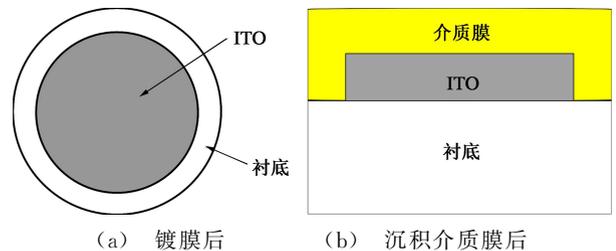
以厚度为 3 mm, 直径为 50 mm 的双面抛光 K9 玻璃片作为基底, 采用北京北仪真空技术有限公司生产的 ZZSX-1100 型真空镀膜机, 配备莱宝真空 10 kV 的 e 型电子枪, 用 INFICON 公司的 IC/5 石英晶控仪控制 ITO 薄膜的蒸发速率, 控制精度为 0.01 nm, 薄膜材料由成都超纯应用材料有限责任公司供应。

首先在 K9 玻璃基片上直接沉积一定厚度的 ITO 薄膜, 然后在该层 ITO 薄膜表面沉积一层 SiO_2 , MgF_2 或 Ti_2O_3 等介质薄膜, 在介质薄膜表面再沉积一层 ITO 薄膜, 如图 1 所示。底层 ITO 薄膜的方块电阻为 R_1 , 外层 ITO 薄膜的方块电阻为 R_2 , 如果中间的介质薄膜完全将两层 ITO 透明导电薄膜隔开, 则 ITO/介质薄膜/ITO 样品表面的方块电阻 $R = R_2$ 。然而, 当两层 ITO 薄膜连通时, 根据并联电阻的计算方法, ITO/介质薄膜/ITO 样品表面的方块电阻应为 $R = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$ 。

实验中, 为了避免两层 ITO 薄膜在边沿处导通, 在沉积底层的 ITO 薄膜时, 采用压圈宽度为 5 mm 的镀膜夹具, 镀膜后的效果如图 2(a) 所示。而在沉积中间介质薄膜时, 采用压圈宽度为 0.5 mm 的镀膜夹具, 这样可以保证介质薄膜能够完全覆盖底层 ITO 薄膜, 如图 2(b) 所示。之后在介质薄膜上沉积 ITO 薄膜, 最终实验样片如图 2(c) 所示。

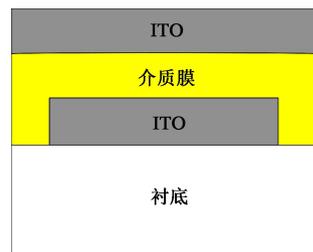


图1 ITO/介质薄膜/ITO实验样品结构示意图



(a) 镀膜后

(b) 沉积介质膜后



(c) 最终效果

图2 实验样品示意图

在制备薄膜样片之前,先对基片进行清洁处理,然后将基片装夹在星型夹具中,抽真空并加热基片。实验中,控制电子枪的发射束流,使 ITO 薄膜的蒸发速率保持在 1.3nm/s 左右,控制氧气和氩气流量、考夫曼辅助离子源参数都保持在稳定状态,基片的烘烤温度为 350 °C 并恒温 3 h,背景真空度约 1.2×10^{-3} Pa,充入氧气和氩气之后,真空室压强维持在 2.0×10^{-2} Pa 左右。镀膜后,用 RTS-1345 型四探针测试系统测量 ITO 薄膜的方块电阻。

表 1 不同实验样品的测试结果

样品	1	2	3	4	5	6	7	8	9
介质薄膜材料	SiO ₂	SiO ₂	SiO ₂	Ti ₂ O ₃	Ti ₂ O ₃	Ti ₂ O ₃	MgF ₂	MgF ₂	MgF ₂
介质薄膜厚度/nm	68	98	206	58	100	210	61	96	203
方块电阻/(Ω/□)	31.5	30.8	63.2	31.4	31.1	62.9	30.8	31.4	62.2

从表 1 中可以看出,对于 SiO₂, Ti₂O₃, MgF₂ 三种介质薄膜材料,当厚度小于或等于 100 nm 时,样品表面的方块电阻测试值明显低于单层 ITO 薄膜的方块电阻,且与两层 ITO 薄膜的并联电阻值相当。而当介质薄膜厚度达到 203 nm 以上时,样品表面的方块电阻等于单层 ITO 薄膜的方块电阻,这时的电阻并联现象消失了。这表明这种 ITO 薄膜的电阻并联现象与介质薄膜间隔层的厚度密切相关。

根据文献[18-19],ITO 薄膜在不同工艺条件下沉积,获得的膜层可能会出现不同的表面粗糙度。实验中采用的是电子束蒸发制备 ITO 薄膜,很可能得到的 ITO 薄膜表面粗糙度较大,有许多凸起的部分,而在沉积中间的 SiO₂, Ti₂O₃, MgF₂ 等介质薄膜时,在薄膜厚度较小的情况下,不能完全将 ITO 薄膜表面凸起的部位覆盖,使得部分凸起的部位裸露出来,并通过这些凸起结构与其他层 ITO 薄膜相连接,这种现象类似于两个电阻之间通过微细的导线相并联。为了验证这种推测,对样片的表面微观形貌进行测试与分析。

2.2 分析与验证

为了便于对比,制备了以下 4 个实验样片:1 号样片是在 K9 基片上采用电子束蒸发镀膜方法沉积了厚度约 200 nm 的单层 ITO 薄膜;2 号样片是在 K9 基片上采用电子束蒸发镀膜方法沉积了厚度约 200 nm 的 ITO 薄膜和 100nm 的 SiO₂ 薄膜;3 号样片是在 K9 基片上采用电子束蒸发镀膜方法沉积了厚度约 200 nm 的 ITO 薄膜和 200 nm 的 SiO₂ 薄膜;4 号样片是在 K9 基片上采用磁控溅射镀膜方法

2 结果与讨论

2.1 实验结果

为了方便分析,两层 ITO 薄膜在相同工艺条件下镀制完成,其物理厚度均为 200 nm 左右,且方块电阻均为 $(62 \pm 2) \Omega/\square$ 。为了避免偶然性,实验中针对不同的介质薄膜材料和厚度,共制备了 9 个样品,镀制完成后,测试样品表面的方块电阻,结果如表 1。

沉积了厚度约 200 nm 的 ITO 薄膜。用原子力显微镜(AFM)对各样品的表面进行测试,结果如下:

从薄膜样片的微观形貌可以看出,采用电子束蒸发镀膜方法制备的 ITO 薄膜表面粗糙度很大,如图 3(1#),整个薄膜表面分布着大量的山峰状凸起结构,最大高度可达 103 nm。而在 ITO 薄膜表面沉积约 100 nm 的 SiO₂ 薄膜之后,样片表面的粗糙度略有改善,如图 3(2#),但表面仍有部分山峰状的凸起结构。而当 SiO₂ 薄膜厚度达到 200 nm 时,样片表面的粗糙度明显得到改善,如图 3(3#)。图 3(4#)是采用磁控溅射镀膜方法制备的 200 nm 厚的单层 ITO 薄膜样片,表面看起来十分光滑,方块电阻约 $57.5 \Omega/\square$ 。这是由于采用磁控溅射镀膜方法沉积 ITO 薄膜时,粒子在基片表面有较高的横向迁移率,制备的薄膜缺陷更少、膜层更加致密、表面光洁度更好。

这表明,采用电子束蒸发镀膜方法制备的 ITO 薄膜具有较大的粗糙度,在 ITO 薄膜表明沉积较薄的介质薄膜不能将 ITO 薄膜表面的山峰状凸起结构完全覆盖,这些山峰状的凸起会有部分裸露在介质薄膜之外。当在介质薄膜上再沉积 ITO 薄膜时,底层的 ITO 薄膜会通过这些裸露在外的凸起与外层 ITO 薄膜相连接,导致样片表面的方块电阻测量值降低,并等同于各层 ITO 薄膜电阻的并联值。

为了更加充分验证以上结论,利用磁控溅射镀膜方法制备了样片 200 nm ITO/80 nm SiO₂/200 nm ITO。测得样片表面方块电阻约为 $58 \Omega/\square$,与磁控溅射沉积的单层 ITO 薄膜电阻值非常接近。这表明,ITO 薄膜电阻的并联现象并未在磁控溅射镀膜

中出现。

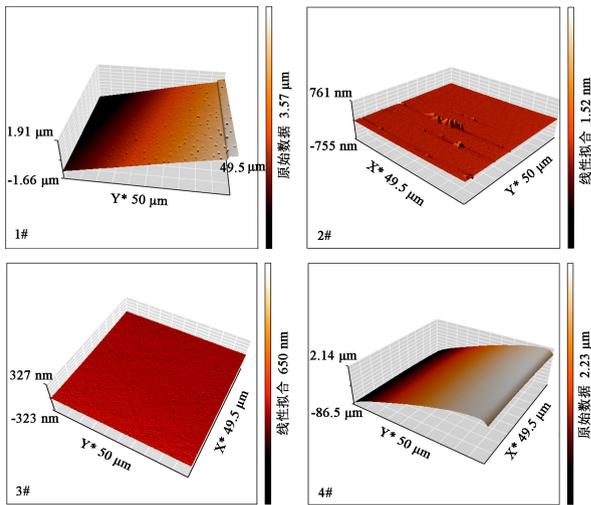
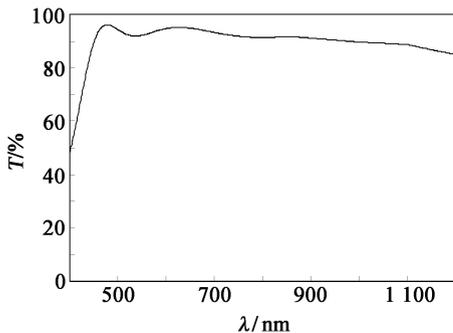


图3 不同薄膜样品的 AFM 图

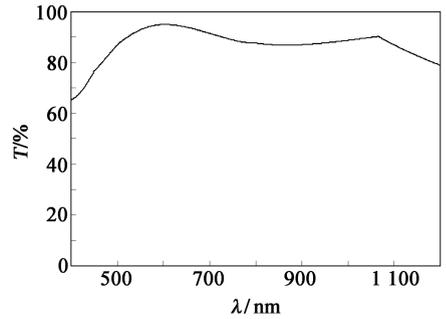
3 应用举例

在研制 450~1 200 nm 的超宽光谱透明导电薄膜时,相比于单层 ITO 薄膜,利用多层 ITO 与介质薄膜相结合可以实现更好的光谱透射性能,而多层 ITO 薄膜之间的电阻并联效应可以使薄膜系统表面呈现更低的方块电阻。

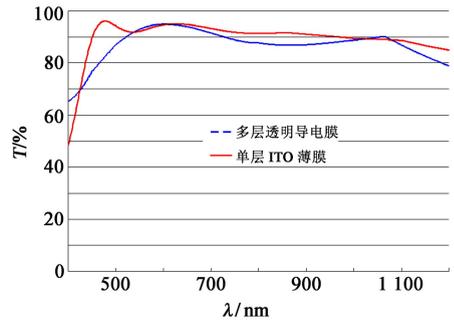
用多层 SiO₂ 和 ITO 薄膜叠加,根据多层光学薄膜干涉原理,在 K9 玻璃基片上设计 450~1 200 nm 超宽光谱透明导电薄膜,膜系结构为:S/36H/41. 3L/36. 2H/31L/28. 6H/77. 6L/43H/36. 2L/A。其中,S代表 K9 基底,H代表 ITO 薄膜材料,L代表 SiO₂ 薄膜材料,数字表示薄膜厚度,单位为 nm,A 为入射介质(空气),其透射光谱如图 4(a)。膜系中的 ITO 薄膜总厚度约 144 nm,与厚度为 144 nm 的单层 ITO 薄膜表面的方块电阻近似,前者为 83.2 Ω/□,后者为 81.9 Ω/□。但二者的光谱透射率光谱却有明显差异,单层 ITO 薄膜的光谱透射率如图 4(b)所示。两个样片背面均镀制相同



(a) 多层薄膜透射率曲线



(b) 单层 ITO 薄膜透射率曲线



(c) 两种结构薄膜透射率对比

图4 两种结构透明导电薄膜透射率曲线对比

的 450~1 200 nm 宽光谱增透膜,薄膜镀制完成后,用 Lambda-900 紫外-可见-近红外分光光度计测试光谱透射率,如图 4(c)。

测试结果显示,单层 ITO 样片在 450~1 200 nm 范围的光谱平均透射率约 87.6%,而多层膜系样片平均透射率约 92.4%,明显高于单层 ITO 薄膜样片。

4 结论

采用电子束蒸发方法镀制了 ITO 与介质薄膜相叠加的多层薄膜,由于制备的 ITO 薄膜具有较大的粗糙度,使得当介质薄膜物理厚度小于 100 nm 时,各层 ITO 薄膜通过表面的山峰状凸起结构相连通,表面的方块电阻测量值为各层 ITO 薄膜方块电阻的并联值。利用 ITO 薄膜的电阻并联效应设计了 450~1 200 nm 超宽光谱透明导电薄膜,测试结果表明,这种电阻并联现象更有利于改善膜系的光谱性能。在研制光电薄膜时,常常将薄膜的表面粗糙度作为评判薄膜质量的重要因素,而 ITO 薄膜表面较大的粗糙度却在设计多层薄膜系统时得以有效利用。

参考文献:

[1] Purica M, Lacomis F, Baban C, et al. Investigation of

- structural properties of ITO thin films deposited on different substrates[J]. *Thin Solid Films*, 2007, 515: 8674-8678.
- [2] Guillen C, Herrero J. Comparison study of ITO thin films deposited by sputtering at room temperature onto polymer and glass substrates[J]. *Thin Solid Films*, 2005, 480: 129-132.
- [3] 张维佳, 王天民, 崔敏, 等. ITO透明导电膜的平面分层介质系统的电磁波性能理论研究[J]. *物理学报*, 2006, 55(3): 1295-1300.
- Zhang Weijia, Wang Tianmin, Cui Min, et al. Electromagnetic performance of plane delamination media with ITO transparent conductive film[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(3): 1295-1300.
- [4] Xu Ying, Gao Jinsong, Xuanming, et al. Deposited indium-tin-oxide (ITO) transparent conductive films by reactive low-voltage ion plating (RLVIP) technique [J]. *J. of Luminescence*, 2007, 122-123: 908-910.
- [5] Sun Kewei, Zhou Wancheng, Tang Xiufeng, et al. Effect of the heat treatment on the infrared emissivity of indium tin oxide(ITO) films[J]. *Appl. Surface Science*, 2011, 257: 9639-9642.
- [6] Baum M, Aexeev I, Latzel M, et al. Determination of the effective refractive index of nanoparticulate ITO layers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22754-22761.
- [7] Amaral A, Brogueira P, Carvalho Nunes de C, et al. Influence of the initial layers on the optical and electrical properties of ITO films[J]. *Optical Materials*, 2001, 17: 291-294.
- [8] Liu Haitao, Zeng Xiaofei, Kong Xianrong, et al. A simple two-step method to fabrication highly transparent ITO/polymer nanocomposite films[J]. *Appl. Surface Science*, 2012, 258: 8564-8569.
- [9] Zhang Keran, Zhu Furong, Huan Cha, et al. Indium tin oxide films prepared by radio frequency magnetron sputtering method at a low processing temperature[J]. *Thin Solid Films*, 2000, 376(1/2): 255-263.
- [10] 徐天宇, 吴惠楨, 张莹莹, 等. In_2O_3 透明薄膜晶体管管的制备及其电学性能的研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(7): 5018-5022.
- Xu Tianyu, Wu Huizhen, Zhang Yingying, et al. Fabrication and performance of indium oxide based transparent thin film transistors[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(7): 5018-5022.
- [11] Kim J S, Bae J W, Kim H J, et al. Effects of oxygen radical on the properties of indium tin oxide thin films deposited at room temperature by oxygen ion beam assisted evaporation [J]. *Thin Solid Films*, 2000, 377: 103-108.
- [12] 喻志农, 相龙锋, 薛唯, 等. 离子辅助反应蒸发技术室温制备ITO薄膜[J]. *北京理工大学学报*, 2007, 27(10): 924-927.
- Yu Zhinong, Xiang Longfeng, Xue Wei, et al. Preparation of ITO films deposited at room temperature by ion beam-assisted reactive evaporation [J]. *Trans. of Beijing Institute of Technol.*, 2007, 27(10): 924-927.
- [13] Kikuo Tominaga, Tetsuya Ueda, Takahiro Ao, et al. ITO films prepared by facing target sputtering system[J]. *Thin Solid Films*, 1996, 281: 194-197.
- [14] 田启祥, 刘胜超. $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$ 薄膜的制备及光谱反射性能研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(1): 541-544.
- Tian Qixiang, Liu Shengchao. Fabrication and spectral reflective properties of $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$ film [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(1): 541-544.
- [15] 杨磊. 红外透明导电氧化物薄膜的制备及光电性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- Yang Lei. Study on The Preparation and Optoelectrical Properties of Infrared Transparent Conductive Oxide Thin Films[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [16] Marqusee J A, Ross A J. Kinetics of phase transitions: Theory of ostwald ripening[J]. *J. Chem. Phys.*, 1983, 79(1): 373-378.
- [17] Amaral A, Brogueira P, Nunes de Carvalho C, et al. Influence of the initial layers on the optical and electrical properties of ITO films[J]. *Optical Materials*, 2001, 17(1/2): 291-294.
- [18] Annika P, Bruce D. Mesoporous indium tin oxide (ITO) films[J]. *Thin Solid Films*, 2006, 515(2): 790-792.
- [19] Villar Del I, Zamarreno C R, Hernaez M, et al. Generation of surface plasmon resonance and lossy mode resonance by thermal treatment of ITO thin-films[J]. *Optics & Laser Technol.*, 2015, 69: 1-7.

作者简介:

王松林(1988—),男,硕士,主要从事先进光学元器件、光学薄膜技术及纳米材料等方向的研究。

三维多孔石墨烯的制备及其电化学性能研究

李建勇¹, 邵庆国^{2*}

(1. 中国广核新能源控股有限公司上海分公司, 上海 200241;

2. 中国石油大学(华东)材料科学与工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 电极材料的孔径结构、尺寸、类型直接影响电极材料的电化学性能。文章利用水热反应与硝酸蒸汽处理两步法制备了三维多孔石墨烯材料,并通过控制硝酸蒸汽处理时间,研究其对电极材料电化学特性的影响。通过扫描电镜、透射电镜、拉曼光谱、X射线衍射等多种测试方法对得到的三维多孔石墨烯进行表征,并利用三电极测试方法,通过循环伏安、恒流充放电和电化学阻抗等电化学测试方法研究其电化学性能。结果表明,所制备的三维多孔石墨烯具有微孔与纳米孔相结合的三维结构,两者的协同作用使得三维多孔石墨烯表现出优异的电化学性能,在1 A/g的电流密度下,比电容最高可达191.5 F/g。

关键词: 石墨烯; 三维多孔; 电化学性能; 超级电容器; 能源材料

中图分类号: TM911.3 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0855-05

Preparation and Electrochemical Properties of Three-dimensional Holey Graphene

LI Jianyong¹, SHAO Qingguo²

(1. CGN New Energy Holdings Co. Ltd (Shanghai), Shanghai 200241, CHN;

2. School of Materials Science and Engineering, China University of Petroleum (EastChina), Qingdao 266580, CHN)

Abstract: The pore structure, size and type of electrode material directly affect its electrochemical properties. In this paper, three-dimensional porous graphene electrode materials were prepared by a two-step method of hydrothermal reaction and nitric acid steam treatment. The three-dimensional porous graphene was characterized by scanning electron microscope, transmission electron microscope, Raman spectrum and X-ray diffraction. And the electrochemical properties of the porous graphene were tested by the three-electrode method and electrochemical methods such as cyclic voltammetry, constant current charge-discharge and electrochemical impedance. The results show that the prepared 3D porous graphene has a combined structure of micropores and nanopores, and their synergistic effect leads to excellent electrochemical properties of 3D porous graphene, realizing a specific capacitance up to 191.5 F/g at the current density of 1 A/g.

Key words: graphene; three-dimensional porosity; electrochemical properties; supercapacitor; energy materials

0 引言

超级电容器具有比传统电容器更高的能量密度

和比电池更大的功率密度,具有集高能量密度、高功率密度、长使用寿命、高安全性能和低成本等优点^[1-10]。决定超级电容器性能的关键是电极材料的设计,因而提高和改善电极材料的储能性质,开发新型电极材料成为该领域研究的热点和重点。对于电极材料,影响其电化学性能的重要参数包括:有效比

收稿日期:2020-09-10.

基金项目:中央高校基本科研业务费专项项目(2018000035, 19CX05001A).

*通信作者:邵庆国

E-mail: qgshao@upc.edu.cn

表面积、电极表面活性位点、电极材料的导电性以及电极材料的孔结构、孔体积、孔径分布等^[11-16]。近年来,研究人员开发了种类丰富的电极材料,其结构与性能的构效关系越来越明晰,然而如何进一步提高电极材料的电化学性能仍是当前研究的热点^[17-18]。

石墨烯是一种由碳原子以 sp^2 杂化轨道组成六角形蜂巢晶格的二维碳纳米材料。它具有优异的电气、光学以及力学特性,在微纳加工、生物医学、能源等多领域具有重要的应用^[19-20]。此外,石墨烯表面积高、化学稳定性好、导电性和导热性优良、柔性高,也是一种非常有潜力的超级电容器电极材料。本文基于氧化石墨烯(GO)原料,在 GO 分散液中加入微量吡咯,通过水热反应制备成三维石墨烯凝胶,并用硝酸蒸汽对其进行一定时间的刻蚀,制备出三维多孔石墨烯,以改进石墨烯电极材料的电化学性能,从而得到电化学性能更优异的三维多孔石墨烯电极材料。

1 材料制备与表征

1.1 三维石墨烯凝胶的制备

配制 35 mL 浓度为 2 mg/mL 的 GO 分散液,再用可调微量移液枪量取 10 μ L 吡咯液体加入分散液,搅拌至均匀;然后将混合液体转移至 50 mL 反应釜的内衬中,将拧紧的反应釜放进真空干燥箱中,在 180 $^{\circ}$ C 下反应 12 h,得到独立支撑的石墨烯水凝胶,标记为 rGO。

1.2 三维多孔石墨烯的制备

将石墨烯水凝胶放在设计好的多孔支撑体上面,将支撑体与石墨烯水凝胶放入水热反应釜中,在反应釜中加入 25 mL 6 mol/L 的硝酸,密封后放入烘箱。设置反应温度分别为 100, 120, 150 $^{\circ}$ C, 时间为 1 h,并将产物分别标记为 rGO-100, rGO-120 和 rGO-150。

1.3 物性表征

采用 JEOL-7600F 场发射扫描电子显微镜(SEM)和 JEOL-2100F 透射电子显微镜(TEM)对得到的产物进行形貌观察;采用荷兰帕纳科公司的 X 射线衍射仪进行物相分析;采用雷尼绍公司的激光拉曼光谱仪进行拉曼光谱测试。

1.4 电化学性能表征

将制得的电极材料与聚偏氟乙烯按照质量比为 9 : 1 混合,用 NMP 作为溶剂,均匀涂抹到泡沫镍集流体上,制成电极片。采用三电极测试方法,用

2 mol/L 的氢氧化钾作为电解液,进行循环伏安测试(CV)、恒流充放电测试(GCD)和电化学阻抗测试(EIS),电压窗口为 $-1.0 \sim -0.2$ V。

2 结果与讨论

2.1 硝酸蒸汽处理装置的设计

硝酸蒸汽打孔实验需要在反应釜中进行刻蚀(硝酸蒸汽刻蚀装置的简单示意图如图 1 所示)。硝酸属于强酸,具有强烈的氧化性,会与绝大多数金属发生化学反应,许多材料都会被硝酸腐蚀,而刻蚀的温度大于等于 100 $^{\circ}$ C,本实验设计及加工了 PTFE 材质的中空管支撑体和带孔圆板(中空管支撑体内径为 20 mm,带孔圆板孔径为 2 mm),实验时将圆板置于中空管上形成一个支撑装置,将石墨烯水凝胶放置在支撑装置上,再放入反应釜中。中空设计使得硝酸蒸汽能够从上到下到达石墨烯水凝胶的表面,易于刻蚀,设计的 PTFE 成品图如图 2 所示。

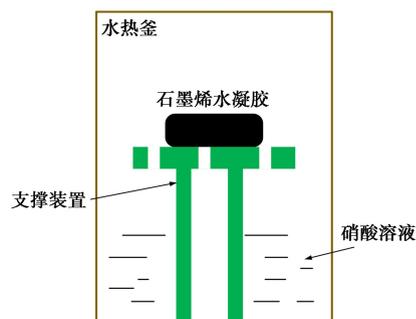


图 1 硝酸蒸汽刻蚀石墨烯凝胶示意图

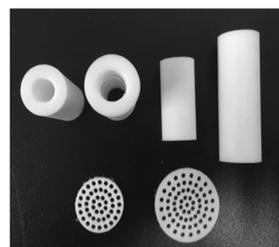


图 2 PTFE 中空管和带孔圆板成品图

2.2 三维多孔石墨烯的形貌表征

图 3(a)和(b)分别是三维石墨烯水凝胶(rGO)和三维多孔石墨烯水凝胶(rGO-120)的 SEM 图。在制备石墨烯水凝胶的过程中,加入了微量的吡咯,利用其疏水特性,增加反应产物中的微孔。从图中可以看出三维石墨烯水凝胶表面粗糙,具有清晰的三维多孔网络结构,孔壁由薄的石墨烯片堆积而成,呈现出卷曲的片状结构,片层之间搭接成三维结构形态。这些微米级孔能够为离子迁移提供快速通

道,加快离子的传输效率,缩短电解质离子的扩散距离。经硝酸处理后的三维多孔石墨烯水凝胶(rGO-120)保持大孔结构(图2(b))的同时,在石墨烯表面也刻蚀出一些小孔,如图2(d)所示。石墨烯片层上存在大量的纳米级孔洞,说明硝酸处理能够刻蚀出纳米孔,这些纳米孔能够极大地提高电极材料的比表面积,提供更多的活性储能位点,进而构建双电层,提高电化学性能。

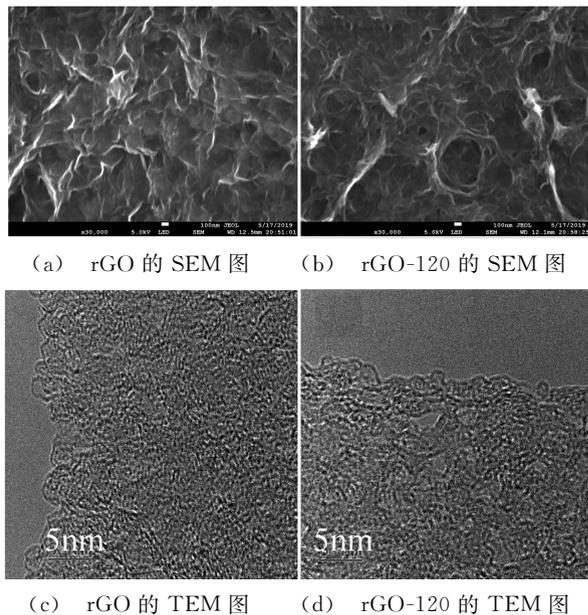


图3 rGO和rGO-120的SEM图和TEM图

2.3 三维多孔石墨烯的结构表征

三维石墨烯水凝胶和经过不同温度硝酸蒸汽处理得到的三维多孔石墨烯样品的Raman结果如图4所示,两个主峰D峰和G峰对应的拉曼位移如表1所示。D峰主要在 1350 cm^{-1} 附近,代表了石墨烯的缺陷情况和部分无序的结构,G峰在 1590 cm^{-1} 附近,主要来源于石墨层内部 sp^2 杂化C的协同面内振动,表征了样品的石墨化程度。Raman图谱结果

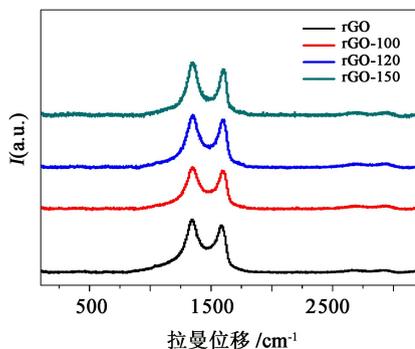


图4 rGO, rGO-100, rGO-120和rGO-150四个样品的Raman图谱

表明四个样品均具有一定的无序化结构和石墨化现象。D峰与G峰强度的比值 I_D/I_G (见表1)反映了碳原子的缺陷程度和石墨化程度, I_D/I_G 比值越大,说明缺陷密度越高,比值越小则石墨化程度越高。由表1可知, I_D/I_G 比值均大于1,但数值相差不大,都在1.1左右,表明四个样品均有较高的无序化程度,缺陷较多,边缘效应较强,石墨化程度相对无序度较低,可能是石墨烯内含氧官能团较多所致,高的缺陷密度能够为石墨烯提供较多的活性位点。

表1 四个样品Raman两个主峰对应的具体的拉曼位移数值及 I_D/I_G 比值

样品	拉曼位移/ cm^{-1}		I_D/I_G
	D峰	G峰	
rGO	1341.77	1585.64	1.13
rGO-100	1351.31	1593.22	1.09
rGO-120	1348.97	1602.37	1.10
rGO-150	1345.89	1603.11	1.14

图5是氧化石墨烯GO与经水热法还原和硝酸刻蚀的四个样品的XRD图谱,表2为XRD图谱特征衍射峰对应的 2θ 值。如图5所示,GO的图谱在 2θ 为 10.2° 的地方有尖锐的特征衍射峰,此为GO特有的(001)晶面。经水热法处理还原后可得到样品rGO, rGO-100, rGO-120和rGO-150,可发现,属于GO的(001)特征衍射峰完全消失,而四个样品均在 2θ 为 25.5° 附近产生了较强的衍射峰,这对应典型的石墨(002)晶面特征衍射峰,表明对GO进行还原后所得的样品具有一定的石墨化程度,这也与Raman表征结果一致,说明GO被还原为石墨烯,且除了(002)特征衍射峰外无其他衍射峰存在,说明石墨的晶体片层的空间排布非常规整。还原后的样品峰变宽而强度减弱的原因是它们由单层石墨烯还原而来,是单层石墨,发生了层间剥离,晶体的完整性有所下降且无序程度增加。

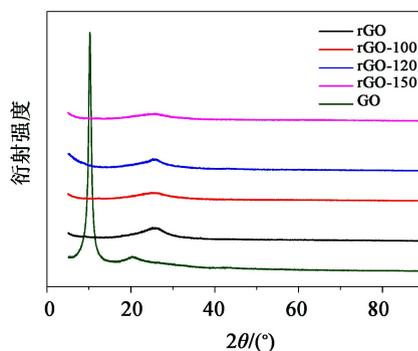


图5 各样品的XRD图谱

表 2 XRD 图谱衍射峰对应的 2θ 值 单位: ($^{\circ}$)

GO	rGO	rGO-100	rGO-120	rGO-150
10.2	—	—	—	—
20.4	25.9	25.5	25.2	25.1

2.4 三维多孔石墨的电化学性能测试

图 6 是四个样品制成的工作电极在 10 mV/s 扫描速度下的 $J-V$ 曲线图,可以看出曲线围成的图形矩形度较高,为典型的电化学双电层电容。 $J-V$ 曲线包围而成的面积能够定性比较电极材料比电容的大小,如图 6 所示, 120°C 下刻蚀出来的 rGO-120 样品 CV 面积最大,因而比电容最高,说明硝酸蒸汽刻蚀处理能够提高比电容。图 7 为 rGO-120 样品在不同扫描速度下的 $J-V$ 图,可看出其 $J-V$ 曲线在扫描速度低于 100 mV/s 时能保持近类似矩形,说明此材料具有较好的倍率性能。

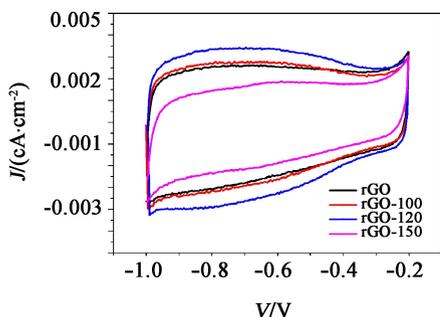
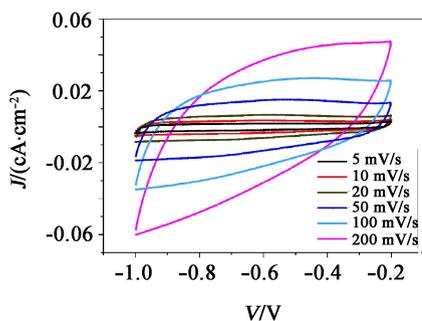
图 6 四个样品工作电极在扫描速度为 10 mV/s 下的 $J-V$ 曲线图图 7 样品 rGO-120 在不同扫描速度下的 $J-V$ 曲线图

图 8 为四个样品制成的工作电极在电流密度为 1 A/g 下的充放电 (GCD) 测试曲线图。经过计算,未经硝酸蒸汽刻蚀处理的 rGO 与经过 $100, 120$ 和 150°C 硝酸蒸汽刻蚀处理后的 rGO-100, rGO-120 和 rGO-150 样品在电流密度为 1 A/g 下的比电容分别为 $123.5, 164.55, 191.5$ 和 84.4 F/g 。经过硝酸蒸汽刻蚀处理后的 rGO-100 和 rGO-120 样品,其电容值均高于未经硝酸蒸汽刻蚀处理的 rGO 样品。此外, rGO-120 样品的电容值最高,这与 $J-V$

曲线结果一致。然而经过 150°C 硝酸蒸汽刻蚀处理后的 rGO-150 样品的电容值最低,这可能是过高的刻蚀温度致使石墨烯片层结构被破坏,比表面积下降所致。另外,图中所有 GCD 曲线均呈现等腰三角形,说明四个样品都具有较好的化学可逆性。图 9 是 rGO-120 样品在不同电流密度下的 GCD 测试曲线图,可以看出,在较高的电流密度下,该样品仍然表现出较高的比电容,显示其具有较高的倍率性能。以上结果表明,采用硝酸蒸汽刻蚀法,能够创造出较多的纳米孔,提供更多的活性位点,进而提高石墨烯电极材料的电化学性能。

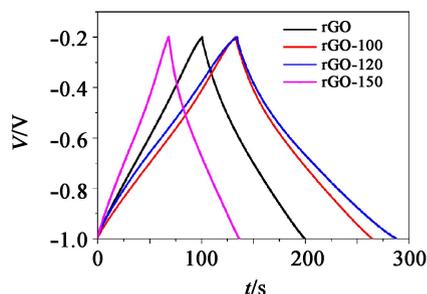
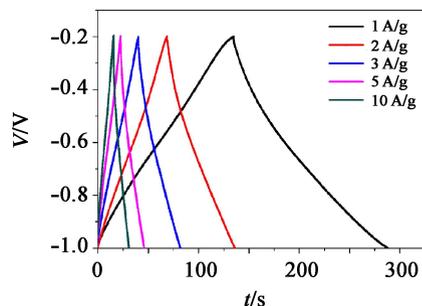
图 8 四个样品工作电极在电流密度为 1 A/g 时的 GCD 曲线图

图 9 样品 rGO-120 在不同电流密度下的 GCD 曲线图

3 结论

本文通过水热反应与硝酸蒸汽刻蚀法,成功制备出了具有优异电化学性能的三维多孔石墨烯电极材料,并通过控制刻蚀温度,研究了不同刻蚀温度对石墨烯形貌结构和电化学性能的影响。结构与性能测试结果表明:刻蚀温度为 120°C 时得到的三维石墨烯孔隙更加均匀、纳米孔数增多、比电容最大、储能性最优越,在电流密度为 1 A/g 下,其比电容高达 191.5 F/g 。另外,过高的刻蚀温度会导致石墨烯片层被破坏,导电性变差,电容性能降低。

参考文献:

- [1] Wei Hong, Wu Qiang, Zhao Jin, et al. Mesoporous NiO/

- Ni composites for high-performance electrochemical energy storage[J]. *Energy Environmental Science*, 2016, 9(6): 2053-2060.
- [2] Ke Qingqing, Wang John. Graphene-based materials for supercapacitor electrodes—A review[J]. *J. of Materiomics*, 2016, 2(1): 37-54.
- [3] Zhang Y, Huang Y, Chen H, et al. Composition and structure control of ultralight graphene foam for high-performance microwave absorption[J]. *Carbon*, 2016, 105(8): 438-447.
- [4] Yang Zhou, Tian Jiarui, Yin Zefang, et al. Carbon nanotube- and graphene-based nanomaterials and applications in high-voltage supercapacitor: A review[J]. *Carbon*, 2019, 141(12): 467-480.
- [5] Liu Xianbin, Zou Shuai, Liu Kaixi, et al. Highly compressible three-dimensional graphene hydrogel for foldable all-solid-state supercapacitor[J]. *J. of Power Sources*, 2018, 384(12): 214-222.
- [6] 陈健. 聚吡咯复合材料的制备及其石墨烯气凝胶电化学性能研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2017: 2-3.
- Chen Jian. Preparation of polypyrrole composites and study on the electrochemical properties of graphene aerogels[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2017: 2-3.
- [7] 史鹏. 三维多孔石墨烯/聚苯胺复合材料的制备及其电化学吸能研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2018: 2.
- Shi Peng. Preparation of three-dimensional porous graphene/polyaniline composites and study on their electrochemical absorption[D]. Shenyang: Shenyang University, 2018: 2.
- [8] Brownson D A C, Banks C E. Graphene Applications[M]// *Outlook and Challenge of Electrochemistry*. London: Springer, 2014: 127-174.
- [9] Bieri M, Treier M, Cai J, et al. Porous graphenes: two-dimensional polymer synthesis with atomic precision[J]. *Chemical Commun.*, 2009, 45(45): 6919.
- [10] Kuilla T, Bhadra S, Yao D, et al. Recent advances in graphene based polymer composites[J]. *Progress in Polymer Science*, 2010, 35(11): 1350-1375.
- [11] 陈英放, 夏永姚. 混合型超级电容器的研究进展[J]. *化学进展*, 2011, 23(z1): 595-604.
- Chen Yingfang, Xia Yongyao. Advances in research on hybrid supercapacitors[J]. *Chemical Progress*, 2011, 23(z1): 595-604.
- [12] 王志勇, 田树仁, 夏国明, 等. 绿色储能元件—超级电容器的探讨[J]. *电器与能效管理技术*, 2011(7): 18-20.
- Wang Zhiyong, Tian Shuren, Xia Guoming, et al. Green energy storage elements—Discussion on supercapacitors[J]. *Electric Appliance and Energy Efficiency Management Technology*, 2011(7): 18-20.
- [13] 胡涵. 石墨烯气凝胶的可控制备、改性及性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014: 2-3.
- Hu Han. Controllable preparation, modification and properties of graphene aerogel[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014: 2-3.
- [14] 石微微, 晏菲, 周国珺. 三维石墨烯材料制备方法的研究进展[J]. *化学通报*, 2013, 76(11): 988-993.
- Shi Weiwei, Yan Fei, Zhou Guojun. Advances in preparation methods of three-dimensional graphene materials[J]. *Chemical Bulletin*, 2013, 76(11): 988-993.
- [15] 刘鑫. 三维石墨烯的水热法制备及其性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 3-5.
- Liu Xin. Hydrothermal preparation of three-dimensional graphene and its properties[D]. Harbin: Harbin Institute of Technol., 2015: 3-5.
- [16] 许永杰. 氧化石墨烯基超级电容器电极材料结构调控与性能研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2016: 23-25.
- Xu Yongjie. Structure regulation and properties of electrode materials for GO supercapacitors[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2016: 23-25.
- [17] 谢小英. 石墨烯基超级电容器: 电极材料制备及储能机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2013: 39-41.
- Xie Xiaoying. Graphene-based supercapacitors: Preparation of electrode materials and study on energy storage mechanism[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013: 39-41.
- [18] 徐丽, 盛鹏, 赵广耀, 等. 基于海藻制备超级电容器用三维多孔石墨烯[J]. *材料科学与工艺*, 2016, 24(5): 54-55.
- Xu Li, Sheng Peng, Zhao Guangyao, et al. Preparation of three-dimensional porous graphene for supercapacitors based on algae[J]. *Materials Science and Technol.*, 2016, 24(5): 54-55.
- [19] 关磊, 张力婧, 张宇航, 等. 三维多孔泡沫石墨烯的制备与应用研究进展[J]. *合成化学*, 2018, 26(5): 384.
- Guan Lei, Zhang Liqiang, Zhang Yuhang, et al. Advances in preparation and application of three-dimensional porous graphene[J]. *Synthetic Chemistry*, 2012, 26(5): 384.
- [20] 徐丽, 刘双宇, 陈新, 等. 三维石墨烯电极材料在锂离子电池中的应用[J]. *智能电网*, 2017, 5(1): 95-96.
- Xu Li, Liu Shuangyu, Chen Xin, et al. Applications of three-dimensional graphene electrode materials in Li-ion batteries[J]. *Smart Grid*, 2017, 5(1): 95-96.

作者简介:

李建勇(1972—),男,河南南阳市人,硕士,高级工程师,主要研究方向为风电、光伏等新能源及储能技术;

邵庆国(1987—),男,山东莒县人,博士,副教授,主要研究方向为先进碳材料及能源转换材料。

两种微型热管传热性能对比研究

魏智康^{1*}, 侯燕¹, 段彦军², 刘斌³

(1. 北京石油化工学院 机械工程学院, 北京 102617; 2. 北京机械设备研究所, 北京 100854;

3. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190)

摘要: 以波形脉动热管和微槽平板热管为研究对象, 基于 Mixture 模型构建了其三维非稳态数学模型, 并对模型可靠性进行了验证。采用该数学模型对比了两种微型热管在相同散热空间和散热热流密度情况下的热阻、平均壁面温度和蒸发段壁面温度均匀性。结果表明: 相对于微槽平板热管, 波形脉动热管热阻更低, 传热性能更好; 波形脉动热管蒸发段稳态平均壁面温度更低, 且随着热流密度的增加该优势更加明显; 波形脉动热管在空间尺度上蒸发段壁面温度均匀性更好, 且这种优势在高热流密度情况下更突出, 但这种均匀性在时间尺度上变化相对剧烈。

关键词: 波形脉动热管; 微槽平板热管; 数值计算; 传热性能; 壁面温度均匀性

中图分类号: TK124 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0860-05

Comparative Study on The Heat Transfer Performance of Two Types of Micro Heat Pipes

WEI Zhikang¹, HOU Yan¹, DUAN Yanjun², LIU Bin³

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, CHN;

2. Beijing Machine and Equipment Institute, Beijing 100854, CHN;

3. Institute of Engineering Thermophysics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, CHN)

Abstract: Taking the pulsating heat pipe with corrugated configuration and the micro-grooved flat heat pipe as the research objects, a three-dimensional unsteady mathematical model was constructed based on the Mixture model, and the reliability of the model was verified. This mathematical model was used to compare the thermal resistance, average wall temperature and the uniformity of the evaporation section wall temperature of the two types of micro heat pipes under the same heat dissipation space and heat flux. The results show that, compared with the micro-grooved flat heat pipe, the pulsating heat pipe with corrugated configuration presents lower thermal resistance and better heat transfer performance; the steady-state average wall temperature of the evaporation section of the pulsating heat pipe with corrugated configuration is lower, and this advantage becomes more obvious as the heat flux increases; the pulsating heat pipe with corrugated configuration has better wall temperature uniformity in the evaporation section on the spatial scale, and this advantage is more prominent in the case of high heat flux, but this uniformity changes relatively drastically on the time scale.

Key words: pulsating heat pipe with corrugated configuration; micro-grooved flat heat pipe; numerical calculation; heat transfer performance; wall temperature uniformity

收稿日期: 2020-10-01.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51606190).

* 通信作者: 魏智康 E-mail: 18341313748@163.com

0 引言

微型热管具有结构紧凑、热导率高和均温性好的优势,在高功率电子设备散热领域备受关注。微型热管主要包括脉动热管(振荡热管)、微槽平板热管、微型环路热管和微型毛细泵回路等类型。相对于其他热管,脉动热管具有散热性能好、毛细管通道便于实现小型化^[1]的优点;微槽平板热管具有接触热阻小、单处工质泄露影响小、抗压强度高^[2]的优点。因此,脉动热管和微槽平板热管更加贴近微小型电子系统冷却的需求^[3],其传热性能研究一直是学者们追踪的热点问题,也是本文拟比较的两种微型热管类型。

为了确定两种微型热管的具体结构形貌,分别对脉动热管和微槽平板热管进行了文献调研。

对于脉动热管的结构形貌,已有工作主要围绕通道形状、尺寸、匝数、附加分支等因素展开^[4-12],多数结论只适用于某种具体脉动热管,适用于多种脉动热管的结论主要有四条:矩形通道相对于圆形通道更优;蒸发段附加分支或波形结构可以提高传热性能;不同冷却温度下的最佳冷凝段长度不同;径向结构可以提高传热性能。综合对比,选取了传热热阻小且运行稳定的波形脉动热管结构^[4]作为基础,再将通道形式改为矩形后的热管结构作为研究对象之一。

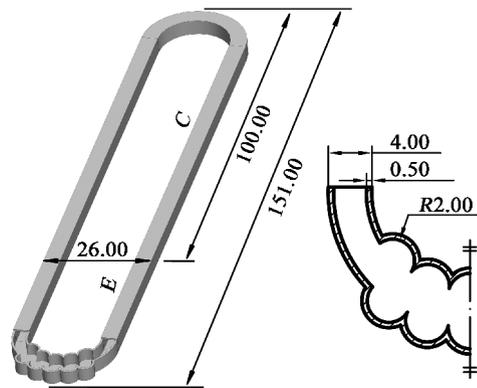
对于微槽平板热管,对比不同微槽形状和尺寸的研究结果^[13-16],得出 Wang 等^[15]提出的新型微槽平板热管热阻最小,该热管结构作为本文的研究对象之一。

综上所述,研究者们研究了多种新型结构的脉动热管和微槽平板热管,然而这些研究均是同种普通微型热管进行比较分析,未见不同种类新型热管之间的比较,因此本文选取调研文献中传热性能好的波形脉动热管^[4]和微槽平板热管^[15]两种结构作为研究对象,基于 Mixture 模型建立了其三维非稳态数学模型。模型中热管工质均为水,考虑了气液能质交换,设定两种热管占用的空间相同,并用实验验证了模型的可靠性。采用该数学模型研究了两种微型热管在相同散热空间和散热热流密度情况下的热阻、平均壁面温度和蒸发段壁面温度均匀性,为微型热管的工程选型提供重要数据。

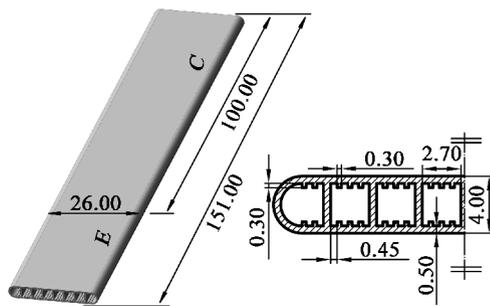
1 模型建立

1.1 几何模型

两种微型热管的几何结构如图 1 所示,尺寸均为 $0.151\text{ m} \times 0.026\text{ m} \times 0.004\text{ m}$ 。壁厚 $5 \times 10^{-4}\text{ m}$,波形脉动热管和微槽平板热管冷凝段长度均为 0.1 m 。两微型热管均未设置绝热段。



(a) 波形脉动热管示意图和波形结构剖视图



(b) 微槽平板热管示意图和横向剖视图

图 1 两种热管几何结构图(图中尺寸单位:mm)

1.2 数学模型

基于 Mixture 模型构建三维非稳态数学模型,考虑了表面张力和气液能质传递过程。模型前提假设为:(1)液相工质不可压缩,气相可压缩;(2)工质的热物性为常数;(3)忽略内部辐射换热;(4)气液流动为湍流。

(1)连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{v}_{dr,v}) + S_M \quad (1)$$

式中, α 为体积分数, ρ 为密度, v 为速度,下标 m, v 和 dr 分别表示混合相、气相和滑移, S_M 为质量源项。

(2)动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p +$$

$$\begin{aligned} & \vec{F}_{cs} + \rho_m \vec{g} + \nabla [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \\ & \nabla \cdot \sum_{i=1}^n (\alpha_i \rho_i \vec{v}_{dr,i} \vec{v}_{dr,i}) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, g 为重力加速度, p 为压力, μ 为粘度, F_{cs} 为连续表面力:

$$F_{cs} = 2\sigma_{lv} \frac{\alpha_l \rho_l \kappa_v \nabla \alpha_v + \alpha_v \rho_v \kappa_l \nabla \alpha_l}{\rho_l + \rho_v} \quad (3)$$

式中, κ 为曲率, σ_{lv} 为表面张力。

(3) 能量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^n (\alpha_i \rho_i E_i) + \nabla \cdot \sum_{i=1}^n [\alpha_i \vec{v}_i (\rho_i E_i + p)] = \\ & \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E \end{aligned} \quad (4)$$

式中, E 为内能, λ 为导热系数, T 为温度, S_E 为能量源项。

(4) 相变模型:

① 蒸发模型 ($T > T_{sat}$)

$$S_M = f \cdot \alpha_l \rho_l \frac{(T - T_{sat})}{T_{sat}} \quad (5)$$

式中, 下标 l 和 sat 分别表示液相和饱和状态。相变速率 f 设定为 $0.1^{[17]}$ 。

② 冷凝模型 ($T < T_{sat}$)

$$S_M = -f \cdot \alpha_v \rho_v \cdot \frac{(T_{sat} - T)}{T_{sat}} \quad (6)$$

$$S_E = h_{LH} S_M \quad (7)$$

式中, h_{LH} 为相变潜热。

1.3 边界条件

根据某半导体产品散热要求, 将蒸发段输入热流密度分别设为 5×10^3 , 1×10^4 和 $1.5 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 冷凝段与 293.15 K 的空气对流换热, 换热系数为 $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。采用标准 k-epsilon 模型模拟湍流, 初始温度和充液率分别为 300 K 和 50% , 时间步长为 $5 \times 10^{-4} \text{ s}$ 。

2 网格独立性和模型验证

模型采用四面体和六面体混合网格。波形脉动热管选取网格数分别为 6.25×10^3 , 2.67×10^4 和 1.19×10^5 的三种网格进行网格无关性验证。当波形脉动热管输入热流密度为 $1 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 不同网格数 N 所对应的热阻 R 如图 2 所示。由图可知, 网格数为 2.67×10^4 情况下计算的热阻与 6.25×10^3 情况下所得结果的相对误差为 17.68% , 与 1.19×10^5 情况下计算结果的相对误差则为 2.48% 。综合考虑计算精度和时间成本, 选择

2.67×10^4 网格作为波形脉动热管的计算网格。微槽平板热管的计算网格采用相同的方法进行了确定, 如图 2 所示, 选取的网格数为 2.52×10^4 。

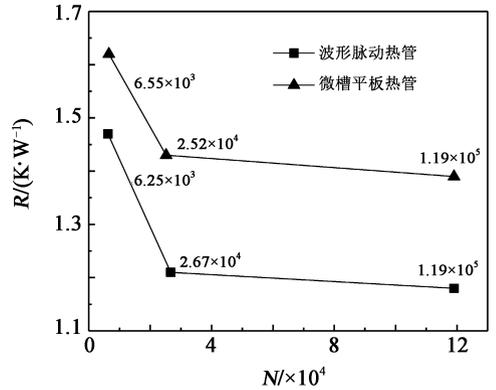


图 2 网格独立性验证

按照脉动热管实验^[18] 工况设定输入功率为 18 W , 充液率为 60% , 模拟得到的热阻与实验对比, 最大误差为 9.52% 。

按照 Supowit 等^[19] 实验工况设定水-铜微槽平板热管输入功率为 15 W , 模拟得到热阻与实验对比, 最大误差为 10.81% 。

3 结果与讨论

3.1 两种热管热阻对比

本文中微型热管的热阻定义如下:

$$R = \frac{T_{e,ave} - T_{c,ave}}{Q} \quad (8)$$

式中, $T_{e,ave}$ 为热管蒸发段平均壁面温度在整个运行时段平均值, $T_{c,ave}$ 为热管冷凝段平均壁面温度在整个运行时段平均值, Q 为输入功率。

输入热流密度分别设为 5×10^3 , 1×10^4 和 $1.5 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。图 3 为不同热流密度 q 下波形脉动热管和微槽平板热管热阻变化曲线。从图中可

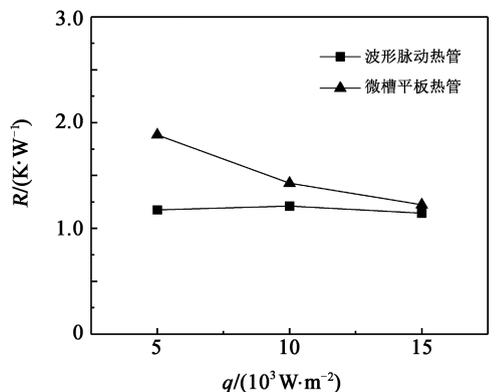


图 3 两种热管热阻随输入热流密度变化曲线

以看到,在相同输入热流密度情况下,波形脉动热管热阻更小,传热性能更佳。然而随着输入热流密度的升高,微槽平板热管的热阻逐渐减小,而波形脉动热管的热阻变化并不明显。因此,随着输入热流密度的增加,波形脉动热管的传热性能优势逐渐减小。

3.2 两种热管蒸发段和冷凝段平均壁面温度对比

本文中平均壁面温度是指特定时刻壁面上所有温度的平均值。图4和图5分别为两种微型热管蒸发段平均壁温 $T_{e,ave}$ 和冷凝段平均壁温 $T_{c,ave}$ 。随着运行时间 t 的变化曲线。从图4中可以看到,波形脉动热管蒸发段和冷凝段平均壁温随运行时间呈波形振荡趋势,30s后振荡频率和幅度趋于稳定。另外,随输入热流密度的减小,振荡幅度呈减小趋势。从图5中可以看到,微槽平板热管蒸发段和冷凝段平均壁温在运行15s后趋于稳定。另外,在热流密度为 $1.5 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 情况下,蒸发段平均壁温在运行初期存在一个明显大于稳态平均壁温的瞬态高温状态,因此在使用微槽平板热管时应考虑该高温状态,以避免电子设备被烧坏。

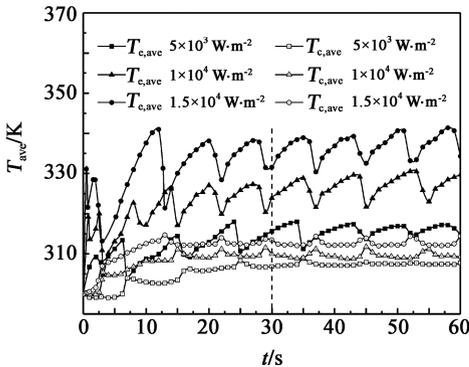


图4 不同输入热流密度下波形脉动热管蒸发段和冷凝段平均壁面温度随运行时间的变化曲线

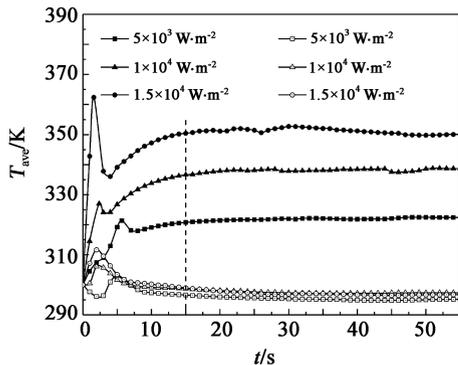


图5 不同输入热流密度下微槽平板热管蒸发段和冷凝段平均壁面温度随运行时间的变化曲线

本文中蒸发段稳态平均壁面温度是指热管稳定运行时间段蒸发段平均壁面温度的平均值,其中波

形脉动热管和微槽平板热管稳定运行时间段分别取30~60s和15~55s。图6为不同热流密度情况下两种热管蒸发段稳态平均壁面温度和稳态时平均壁温最大值曲线。从图中可以看到相同输入热流密度情况下波形脉动热管蒸发段稳态平均壁面温度更低,且随着热流密度的增加该优势更加明显。另外,稳态运行阶段,波形脉动热管最大平均壁温均低于微槽平板热管最小平均壁面温度。因此,相同输入热流密度情况下波形脉动热管可以将被散热电子设备壁面温度控制在更低的温度范围。

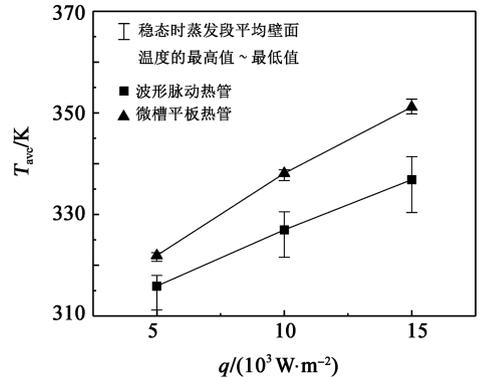


图6 不同输入热流密度下两种热管蒸发段稳态平均壁面温度

3.3 两种热管蒸发段壁面温度均匀性对比

图7为不同输入热流密度情况下,稳定运行状态,两种热管蒸发段壁面最大温差随时间的变化曲线。从图中可以看到,随着输入热流密度的增加,微槽平板热管蒸发段壁面最大温差增大,温度均匀性变差。随着输入热流密度的增加,波形脉动热管蒸发段壁面最大温差总体上增加,但相对于微槽平板热管增加的幅度不明显。另外,随着运行时间的增加,波形脉动热管蒸发段壁面最大温差在高热流密

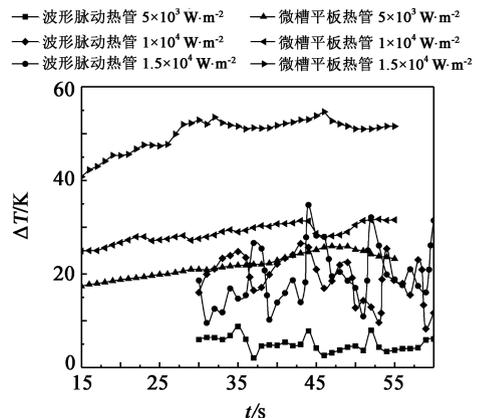


图7 不同输入热流密度情况下,稳定运行状态,两种热管蒸发段壁面最大温差随时间的变化曲线

度情况下变化相对剧烈。此外,相同输入热流密度情况下,波形脉动热管蒸发段壁面最大温差均小于微槽平板热管。因此,模拟工况下,波形脉动热管蒸发段温度均匀性更好,且这种优势在高热流密度情况下更突出,但相对于微槽平板热管这种均匀性在时间尺度上变化剧烈。

4 结论

本文基于 Mixture 模型构建了三维非稳态数学模型。对比了相同散热热流密度和散热空间下,波形脉动热管和微槽平板热管的热阻、平均壁面温度和蒸发段壁面温度均匀性。具体结论如下:

(1)相同输入热流密度情况下,波形脉动热管的热阻更低,传热性能更好,但随着输入热流密度的增加,这种优势逐渐减小。

(2)相同输入热流密度情况下,波形脉动热管蒸发段的平均壁面温度更低,且随着热流密度的增加该优势更加明显。但波形脉动热管蒸发段的平均壁面温度随着运行时间呈波形振荡的趋势,因此相对于微槽平板热管,波形脉动热管在时间尺度上壁面温度均匀性较差,且随着输入热流密度的增加,这种劣势更明显。

(3)高热流密度情况下,微槽平板热管蒸发段的平均壁面温度存在瞬态高温状态,实际应用中应考虑该高温状态以避免电子设备被烧坏。

(4)波形脉动热管蒸发段壁面温度均匀性更好,且这种优势在高热流密度情况下更突出,但这种均匀性在时间尺度上变化相对剧烈。

参考文献:

- [1] Bastakoti D, Zhang H, Li D, et al. An overview on the developing trend of pulsating heat pipe and its performance [J]. Appl. Therm. Eng., 2018, 141: 305-332.
- [2] Tang H, Tang Y, Wan Z, et al. Review of applications and developments of ultra-thin micro heat pipes for electronic cooling[J]. Appl. Energy, 2018, 223: 383-400.
- [3] Somasundaram D, Mani A, Kamaraj M. Experimental investigation of thermal performance of metal foam wicked flat heat pipe[J]. Exp. Therm. & Fluid Sci., 2017, 82: 482-492.
- [4] Wang J, Ma H, Zhu Q, et al. Numerical and experimental investigation of pulsating heat pipes with corrugated configuration[J]. Appl. Therm. Eng., 2016, 102: 158-166.
- [5] Hua C, Wang X, Gao X, et al. Experimental research on the start-up characteristics and heat transfer performance of pulsating heat pipes with rectangular channels [J]. Appl. Therm. Eng., 2017, 126: 1058-1062.
- [6] Jun S, Kim S J. Comparison of the thermal performances and performances and flow characteristics between closed-loop and closed-end micro pulsating heat pipes[J]. Int. J. Heat Mass Transf., 2016, 95: 890-901.
- [7] Kelly B, Hayashi Y, Kim Y J. Novel radial pulsating heat-pipe for high heat-flux thermal spreading [J]. Int. J. Heat Mass Transf., 2018, 121: 97-106.
- [8] Kim J, Kim S J. Experimental investigation on the effect of the condenser length on the thermal performance of a micro pulsating heat pipe[J]. Appl. Therm. Eng., 2018, 130: 439-448.
- [9] Kim W, Kim S J. Effect of reentrant cavities on the thermal performance of a pulsating heat pipe[J]. Appl. Therm. Eng., 2018, 133: 61-69.
- [10] Lee J, Kim S J. Effect of channel geometry on the operating limit of micro pulsating heat pipes [J]. Int. J. Heat Mass Transf., 2017, 107: 204-212.
- [11] Sedighi E, Amarloo A, Shafii M B. Numerical and experimental investigation of flat-plate pulsating heat pipes with extra branches in the evaporator section [J]. Int. J. Heat Mass Transf., 2018, 126: 431-441.
- [12] Sedighi E, Amarloo A, Shafii M B. Experimental investigation of the thermal characteristics of single-turn pulsating heat pipes with an extra branch [J]. Int. J. Therm. Sci., 2018, 134: 258-268.
- [13] Alijani H, Cetin B, Akkus Y, et al. Effect of design and operating parameters on the thermal performance of aluminum flat grooved heat pipes [J]. Appl. Therm. Eng., 2018, 132: 174-187.
- [14] Nagayama G, Gyotoku S, Tsuruta T. Thermal performance of flat micro heat pipe with converging microchannels [J]. Int. J. Heat Mass Transf., 2018, 122: 375-382.
- [15] Wang G, Quan Z, Zhao Y, et al. Performance of a flat-plate micro heat pipe at different filling ratios and working fluids [J]. Appl. Therm. Eng., 2019, 146: 459-468.
- [16] Xin F, Ma T, Wang Q. Thermal performance analysis of flat heat pipe with graded mini-grooves wick [J]. Appl. Energy, 2018, 228: 2129-2139.
- [17] Wu H L, Peng X F, Ye P, et al. Simulation of refrigerant flow boiling in serpentine tubes [J]. Int. J. Heat Mass Transf., 2007, 50(5-6): 1186-1195.
- [18] Saha N, Das P K, Sharma P K. Influence of process variables on the hydrodynamics and performance of a single loop pulsating heat pipe [J]. Int. J. Heat Mass Transf., 2014, 74: 238-250.
- [19] Supowit J, Heflinger T, Stubblebine M, et al. Designer fluid performance and inclination angle effects in a flat grooved heat pipe [J]. Appl. Therm. Eng., 2016, 101: 770-777.

作者简介:

魏智康(1995—),男,山东滨州人,硕士研究生,主要研究方向为强化换热。

基于特征数不变量的插针特征点匹配算法研究

李慧鹏, 李科*

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 针对电连接器插针匹配过程中特征点存在的近似对称以及在不同图像间存在大角度旋转变换的问题,提出了一种基于六点特征数不变量的特征点匹配算法。将特征点分为凸包与内点两部分,利用凸包上的点在射影变换中排列顺序的不变性实现了凸包匹配,利用以凸包特征点为基准的内点特征向量的相似性实现了内点匹配。实验结果证明,提出的算法能够很好地实现对插针特征点的匹配,具有一定的鲁棒性。

关键词: 电连接器; 特征点匹配; 特征数不变量; 凸包

中图分类号: TP391.41 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0865-05

Research on Pin Feature Point Matching Algorithm Based on Characteristic Number Invariant

LI Huipeng, LI Ke

(Dept. of Instrument Science and Opto-electronics Engin., Beihang University, Beijing 100191, CHN)

Abstract: Aiming at the problem of approximate symmetry of the feature points in the pin matching process of the electrical connector and the large-angle rotation transformation between different images, it proposes a feature point matching algorithm based on the invariant of the six-point characteristic number. In this paper, the feature points were divided into two parts of convex hull and interior point. Then the invariance of the order of the points on the convex hull in the projective transformation was used to achieve the convex hull matching, and the similarity of interior point feature vectors based on convex hull feature points was used to achieve the interior point matching. The experimental results prove that the proposed algorithm can achieve the matching of the pin feature points well with certain robustness.

Key words: electrical connector; feature point matching; characteristic number invariant; convex hull

0 引言

电连接器作为航空航天系统中传输信号与能量的关键连接部件,其质量的好坏直接决定了系统的稳定性^[1],而视觉检测作为一种无接触高精度的检测方式,在工业检测领域发挥着重要的作用^[2],在电连接器插针质量检测上也具有很好的应用前景。在所有检测环节中,特征匹配的正确性会影响后续检测结果的准确性,因此有必要对其进行进一步的研究。

图像特征匹配的实质是确定同一个三维特征在不同二维图像之间的位置映射关系,匹配的关键在于构建图像特征的不变性描述。图像的特征一般表现为点特征、线特征、区域特征等几种^[3]。其中,点特征相比其他特征,其提取方式较为简单,匹配方式较为灵活,因此应用更为普遍。

现今最常用的特征点提取与匹配算法为 SURT 算法,其利用了特征点附近的纹理特征作为特征描述子,在图像存在尺度变换与旋转变换时特征描述子保持不变^[4],但是在特征点邻域内存在大量相似的纹理特征时,匹配成功率不高,光照条件改变也可能导致特征点邻域内的纹理变化,影响匹配效果。

收稿日期:2020-06-08.

*通信作者:李科 E-mail: 18819487335@163.com

还有一类利用特征点间的几何特征进行匹配的算法,文献[5]在 Delaunay 三角形约束的基础上,增加一定的错误控制,从而实现对点集的匹配,但算法的鲁棒性较差。文献[6]将图像的纹理特征与几何特征相结合构造特征点的特征描述子,提高了匹配算法的准确性,但是需要借助 SURT 算法确定匹配的基点。结合本文中电连接器插针图像的实际情况,电连接器插针位置的特征点在图像上表现为椭圆形亮斑的中心点,特征点附近的纹理极其相似,使用 SUFT 算法无法保证匹配基点的可靠性。

因此本文针对电连接器插针在不同图像中的特征点存在相似纹理与较大视角变换的情况时的匹配问题进行了研究,提出了一种基于特征数射影不变量^[7]的插针特征点匹配算法,最终实现了不同图像中电连接器插针特征点的匹配。电连接器插针检测流程如图 1 所示。

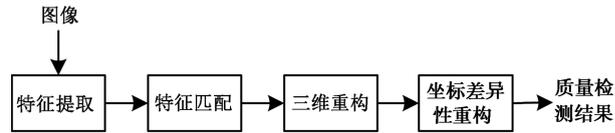


图 1 电连接器插针检测流程图

1 特征数不变量

1.1 特征数定义

如果在射影空间 P^m 上存在 P_1, P_2, \dots, P_r 共 r 个不同的独立点,假设 $P_{r+1} = P_1$,且这些点构成的闭合回路 $P_1P_2 \dots P_rP_{r+1}$ 中每一条线段 P_iP_{i+1} 上都存在着 n 个独立点 $Q_1^{(i)}, Q_2^{(i)}, \dots, Q_n^{(i)}$,则其中每一个点的坐标都可以由端点坐标表示为 $Q_j^{(i)} = a_j^{(i)}P_i + b_j^{(i)}P_{i+1}$,特征数由相关系数 $\frac{a_j^{(i)}}{b_j^{(i)}}$ 的乘积表示:

$$k_n(\{P_i\}_{i=1, \dots, r}, \{Q_j^{(i)}\}_{j=1, \dots, n}^{i=1, \dots, r}) = \prod_{i=1}^r \left(\prod_{j=1}^n \frac{a_j^{(i)}}{b_j^{(i)}} \right) \quad (1)$$

1.2 特征数不变量构造

特征数不变量的构造方法有多种形式,如以平面上五点^[8]或者平面上六点^[9]为基准点构造的三角形特征数,本文选择平面上六点作为基点构造特征数不变量。

如图 2 所示,假设平面上存在两组不共线的三点 (A, B, C) 和 (D, E, F) ,分别相互连接得到 $\triangle ABC$ 与 $\triangle DEF$,因此这两个三角形的三边分别

相交于交点 $Q_1 = AB \cap DE, Q_2 = AB \cap DF, Q_3 = AC \cap DF, Q_4 = AC \cap EF, Q_5 = BC \cap EF, Q_6 = BC \cap DE$ 。因此,将 $\triangle ABC$ 的顶点作为构造特征数的顶点 $P = \{A, B, C\}$,将两个三角形的交点作为构造特征数不变量时每条边上的点 $Q = \{Q_1, Q_2; Q_3, Q_4; Q_5, Q_6\}$,由此可以得到相应的特征数不变量 $CN(A, B, C, D, E, F)$ 。

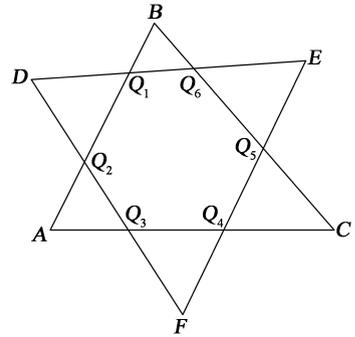


图 2 六点特征数不变量构造方式

将各个点 Q 代入之前的定义中,计算相应的比值 $\frac{b_i}{a_i}$,最终构造的六点特征数为以下形式: $CN(A,$

$$B, C, D, E, F) = \frac{m_{124} m_{346} m_{256}}{m_{236} m_{245} m_{146}}, \text{ 其中 } m_{ijk} =$$

$$\begin{vmatrix} x_i & x_j & x_k \\ y_i & y_j & y_k \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}.$$

1.3 参考点构造

当选取的构造点中存在三点近似共线的情况时, m_{ijk} 的值接近于 0,会对算法的数值稳定性造成影响,从而影响最终的匹配结果。由于在射影变换中点的共线性不会改变,所以在不同的图像中共线点的位置以及点的排列顺序都是相对应的,因此,可以利用六个已知点的位置关系,重新构造出一个参考点 B 来替换近似共线点中的一点,从而达到消除极值、提高数值稳定性的目的,具体构造方式如图 3 所示。

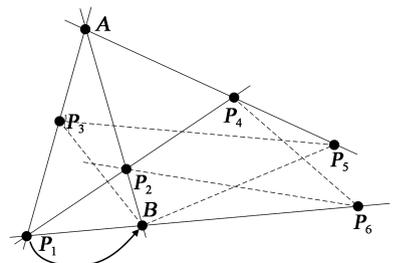


图 3 参考点构造方式示意图

设平面上六点为 $(P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6)$ ，设其中点 (P_1, P_2, P_4) 近似共线，因此可以依次得到 $A = P_1P_3 \cap P_4P_5, B = AP_2 \cap P_1P_6$ ，得到的 B 点即为构造的参考点，将共线点 (P_1, P_3, P_4) 中的 P_1 替换成 B ，即可实现对近似共线情况的消除。

2 插针特征点匹配算法

2.1 基准点选择

在电连接器插针特征点集中，并不存在先验的匹配点对。考虑到电连接器插针阵列分布的特性，特征点存在明显的内外层次结构，因此利用凸包在射影变换下排列顺序的不变性，通过对凸包的匹配即可寻找到适当的匹配基准点，匹配流程如图4所示。具体算法步骤如下：

(1)选取快速凸包检测算法，将特征点集的凸包点集与内部点集进行分离，在凸包点集上选择坐标最小的特征点作为起始点，对凸包上的特征点进行编号；

(2)从起始点开始遍历整个凸包点集，以凸包上相邻的六个点为一组基准点，计算其特征数 CN 的值，将其作为特征向量在该位置所对应的值，计算凸包的特征向量；

(3)选择向量的相对差异作为衡量特征向量之间相似度的量。首先选取其中任意一个特征向量作为匹配的参考向量，然后计算待测向量与参考向量每一个位置对应的特征向量值的相对差异 $\epsilon_r = \frac{CN(i, j) - CN(0)}{CN(0)}$ ，标记相对差异 ϵ_r 小于阈值 T 的位置的个数作为该位置的相似度。对特征向量进行循环移位操作，将首位的元素移动至末尾，重复上述计算过程。最后选取其中最大值所对应的位置作为凸包起始点的匹配位置。由于凸包点集排列顺序

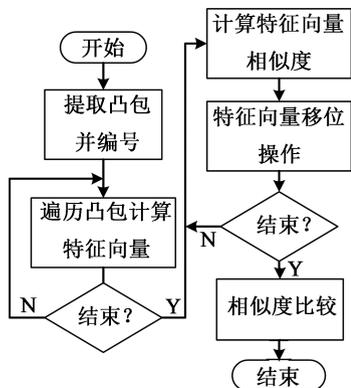


图4 凸包匹配流程图

在射影变换中的不变性，一旦确定了起始点的匹配位置，也就确定了整个凸包的匹配顺序。

2.2 内点匹配

在得到凸包匹配结果后，对内点的匹配算法步骤如下：

(1)从凸包的起始点开始，选取凸包上相邻五点 P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 作为匹配的基准点，选取内点点集中的一点作为构造特征数的第六点 P_6 ，计算对应的特征数不变量 $CN(P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6)$ 的值，作为对应内点在该位置的特征向量值；

(2)顺时针或逆时针遍历凸包，计算在选取不同的基准点时该内点所对应的特征向量的值；

(3)遍历内点点集，对所有的内点重复步骤(1)和(2)，计算所有内点的特征向量；

(4)选取任意一组特征点作为匹配的参考点，计算待匹配点的特征向量与参考点的特征向量在不同向量位置的相对差异 ϵ_r ，在特征向量中标记相对差异 ϵ_r 小于阈值 T 的位置，并对标记位置的个数进行记录，将标记个数最多的位置所对应的参考点与待匹配点作为匹配点。

内点匹配流程如图5所示。

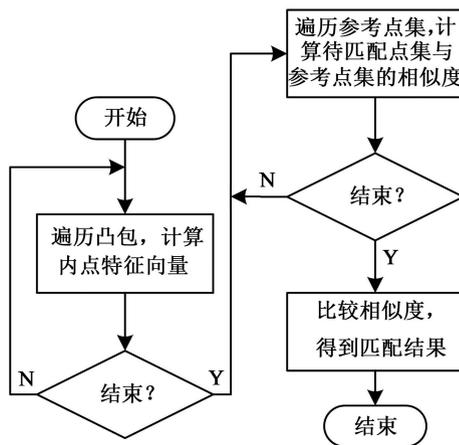


图5 内点匹配流程图

3 实验验证

3.1 模拟数据验证

首先，对算法的正确性进行验证。在三维空间中构造一组由20个三维点组成的三维点集，模拟相机拍摄的过程将三维点投影到不同视角下的二维平面上，得到多组二维点的集合，如图6所示。

对二维点集求凸包，然后以第一幅图的凸包为基准求凸包的相似度，结果如图7所示。

然后以第一幅图像为基准对内点进行匹配,其中一幅图中的相似度如图 8 所示。

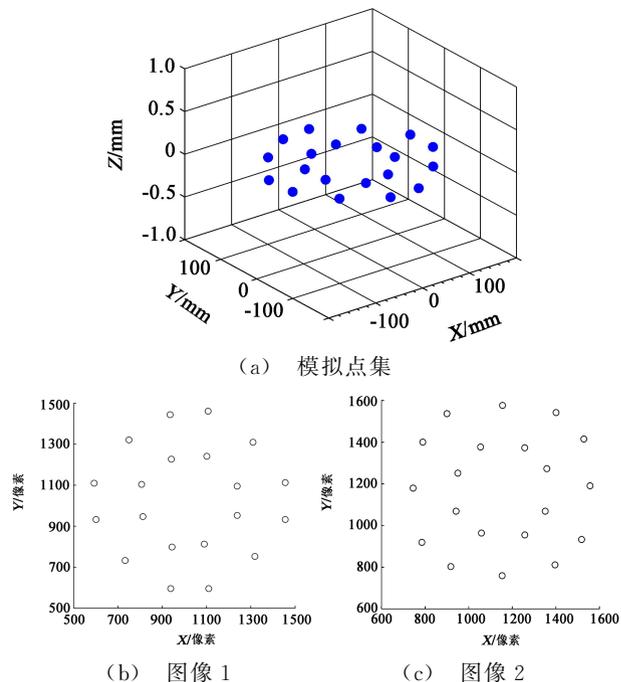


图 6 模拟点集示意图

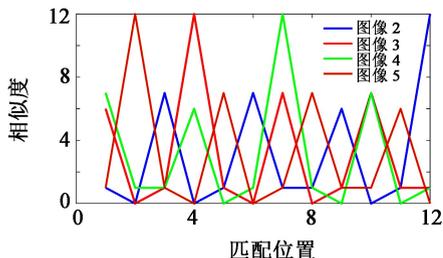


图 7 凸包匹配相似度

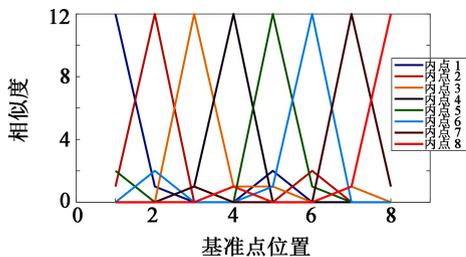


图 8 内点特征向量相似度

实验结果证明,利用特征数不变量进行特征点匹配的算法是可行的。

在模拟数据上分别增加标准差为 0.1, 0.5, 1.0, 2.0 和 5.0 个像素单位的随机噪声误差,在每种误差数据下进行 50 次重复实验,记录每种误差下成功匹配的次数,具体实验结果如表 1~2 所示。

从实验结果中可以看出,上述特征点匹配的算

法在噪声较小时能很好地保证匹配结果的可靠性,在较大的噪声环境下,仍具有一定的匹配成功率。

表 1 不同噪声下的凸包匹配成功率

噪声标准差	图像 2	图像 3	图像 4	图像 5
0.1	100%	100%	100%	100%
0.5	100%	100%	100%	100%
1.0	100%	100%	100%	100%
2.0	98%	98%	96%	100%
5.0	46%	62%	50%	62%

表 2 不同噪声下的内点匹配成功率

噪声标准差	图像 2	图像 3	图像 4	图像 5
0.1	100%	100%	100%	100%
0.5	100%	100%	100%	100%
1.0	100%	100%	100%	100%
2.0	100%	100%	100%	100%
5.0	93.8%	95.3%	91%	99.5%
10.0	71.8%	71.5%	65.5%	63.8%

3.2 实际图像验证

选取不同视角下拍摄的电连接器的插针图像,如图 9 所示,从图像上可以看出,插针邻域的背景纹理的相似度很高。插针在图像上表现为一椭圆形的亮斑,提取椭圆的中心作为表征插针位置的特征点,从每幅图中均提取 55 个特征点。然后提取特征点集的凸包,每幅图像中的点集凸包均由 18 个特征点组成,凸包如图 10 所示。从图中可以看出,凸包点集具有一定的旋转对称性。



图 9 多角度电连接器插针图像

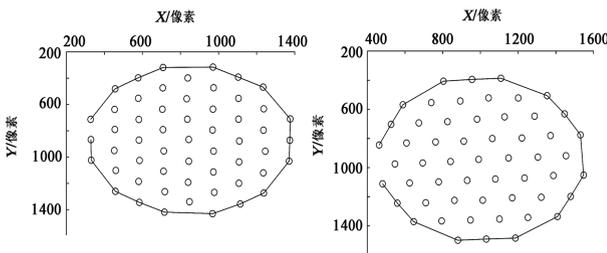


图 10 插针特征点凸包示意图

在实际的插针特征点凸包数据上,分别额外添加标准差为 0.1, 0.5, 1.0 和 2.0 个像素单位的随机噪声误差,在每一种误差数据下,均重复实验 50 次,统计匹配的成功率如表 3 所示。

在得到凸包匹配结果后,对剩余的 37 个内点进行

行匹配实验。在采集到的插针特征点上额外增加标准差分别为0.1,0.5,1.0,2.0和5.0个像素单位的随机噪声误差,选取阈值 $T=0.125$,以图像1为匹配基准,在每一种噪声环境下进行50次重复试验,统计各图像上特征点的平均匹配成功率,结果如表4所示。

表3 真实数据上添加噪声后凸包匹配成功率

噪声标准差	图像2	图像3	图像4	图像5	图像6	图像7	图像8
0.1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.5	100%	90%	100%	98%	96%	100%	100%
1.0	84%	80%	98%	98%	68%	86%	90%
2.0	56%	56%	76%	64%	42%	62%	74%

表4 真实数据上添加噪声后内点匹配成功率

噪声标准差	图像2	图像3	图像4	图像5	图像6	图像7	图像8
0.1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.5	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
1.0	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2.0	99.8%	99.5%	99.8%	99.8%	97.3%	99.7%	98.8%
5.0	83.6%	81.5%	81.4%	84.1%	89.7%	88.2%	85.4%

从实验结果可以看出,本文提出的基于特征点匹配算法在添加较小随机噪声的情况下,能保持很高的匹配成功率,在随机噪声较大时,仍能保持一定的匹配成功率。因此在实际的匹配过程中,如果在特征点采集的过程中存在较大的误差,为了保证匹配结果的正确性,可以对同一图像进行多次匹配,将匹配结果中出现次数最多的匹配结果作为最终的匹配结果。

4 结论

本文针对实际电连接器插针图像中存在的重复纹理以及大角度变换的问题,提出了一种基于特征数不变量的插针特征点匹配算法,利用点集凸包在射影变换中排列顺序的不变性,解决了匹配基准点的选取问题,并通过构造参考点的方式提高了匹配算法的数值稳定性,利用相对误差降低了特征向量不同位置的数值差距对匹配结果的影响。实验结果表明,在不同图像的特征点之间存在大角度变换、相似纹理以及特征点点集近似中心对称的情况下,本文提出的算法仍能保证较高的匹配成功率,同时,在实际的电连接器插针图像上的实验也证明了该算法能满足实际检测的需求。

参考文献:

- [1] 杨奋为. 航天电连接器组件的常见故障检验[J]. 机电元件, 2005, 25(3): 40-45, 52.
Yang Fengwei. Inspection on common defaults of space

electrical connector[J]. Electromechanical Components, 2005, 25(3): 40-45, 52.

- [2] 孙双花. 视觉测量关键技术及在自动检测中的应用[D]. 天津: 天津大学, 2007.
Sun Shuanghua. Key technologies of visual measurement and applications in automatic detection [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [3] 赵键. 点模式匹配算法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
Zhao Jian. Research on point pattern matching algorithm[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [4] Bay H, Tuytelaars T, Van G L. SURF: Speeded up robust features[C]// Proc. of European Conf. on Computer Vision, 2006: 404-417.
- [5] 吴飞, 蔡胜洲, 郭同强, 等. 三角形约束下的图像特征点匹配方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(3): 503-510.
Wu Fei, Cai Shengyuan, Guo Tongqiang, et al. Image feature points matching approach with triangle constraint[J]. J. of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2010, 22(3): 503-510.
- [6] 贾棋, 高新凯, 罗钟铨, 等. 基于几何关系约束的特征点匹配算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(8): 1388-1397.
Jia Qi, Gao Xinkai, Luo Zhongxuan, et al. Feature points matching based on geometric constraints[J]. J. of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(8): 1388-1397.
- [7] Luo Zhongxuan, Zhou Xinchun, Gu Xianeng. From a projective invariant to some new properties of algebraic hypersurfaces[J]. Science China: Mathematics, 2014, 57(11): 2273-2284.
- [8] Jia Qi, Fan Xin, Liu Yu, et al. Hierarchical projective invariant contexts for shape recognition [J]. Pattern Recognition, 2016, 52: 358-374.
- [9] 胡文玉, 张荣, 赵惠妍, 等. 一种基于平面六点的射影不变量构造方法[J]. 赣南师范大学学报, 2016, 37(6): 17-22.
Hu Wenyu, Zhang Rong, Zhao Huiyan, et al. The construction of projective invariants on six planar points[J]. J. of Gannan Teachers' College, 2016, 37(6): 17-22.

作者简介:

李慧鹏(1975—),男,博士,副教授,主要研究方向为传感器技术与先进光学仪器技术;

李科(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为机器立体视觉与三维重构。

基于多尺度分析的快速相位立体匹配

蔡超^{1,2,3}, 刘文波^{1,2}, 郑祥爱^{1,2}, 孟繁昌³, 张滋黎^{3,4*}, 周维虎^{3,4}, 李亚杰⁵

- (1. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 211100;
2. 高速载运设施的无损检测监控技术工业和信息化部重点实验室, 南京 211100;
3. 中国科学院微电子研究所, 北京 100029; 4. 中国科学院大学, 北京 100049;
5. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

摘要: 基于相位的立体匹配是双目投影光栅相位法中的重要步骤,但传统的相位匹配方法在处理高分辨率图像时因存储空间大大增加,难以达到匹配速度与精度的平衡。文章提出了一种基于多尺度分析的快速相位立体匹配算法,采用分层匹配的策略,对预处理后的左右绝对相位图进行降采样以生成图像金字塔,利用低分辨率的视差匹配结果以预测下一层视差,以此降低下层高分辨率图像的视差搜索范围,达到匹配速度与精度的平衡。实验结果表明,所提算法在保证精度的情况下能有效提升相位立体匹配速度,实现高分辨率相位图快速准确的立体匹配。

关键词: 投影光栅相位法; 相位立体匹配; 高分辨率; 多尺度分析; 三维重建

中图分类号: TP391.4 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0870-05

Fast Phase-based Stereo Matching Based on Multi-scale Analysis

CAI Chao^{1,2,3}, LIU Wenbo^{1,2}, ZHENG Xiangai^{1,2},
MENG Fanchang³, ZHANG Zili^{3,4}, ZHOU Weihu^{3,4}, LI Yajie⁵

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, CHN;

2. Non-Destructive Testing and Monitoring Technology for High-Speed Transport Facilities, Key Laboratory of the Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, Nanjing 211100, CHN; 3. Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, CHN; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN; 5. School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, CHN)

Abstract: Phase-based stereo matching (PSM) is a vital step in binocular structured light measurement, but the traditional PSM method is difficult to strike a balance between speed and accuracy due to the greatly increased storage space when processing high-resolution images. In this paper, an image pyramid model is introduced and a phase-based stereo matching algorithm based on multi-scale analysis is proposed. With a layered matching strategy, the preprocessed left and right absolute phase maps are down-sampled to generate an image pyramid and high-resolution disparity maps are predicted by up-sampling low-resolution disparity maps to narrow the disparity range. Experimental results indicate that the proposed algorithm can greatly improve the phase-based stereo matching speed while ensuring the accuracy and can achieve fast and accurate stereo matching of high-resolution images.

Key words: fringe projection profilometry; phase-based stereo matching; high resolution; multi-scale analysis; 3D reconstruction

收稿日期: 2020-06-07.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB2006700, 2018YFB2003304); 国家自然科学基金项目(61871218); 北京信息科技大学 2019 年度“实培计划”项目.

* 通信作者: 张滋黎 E-mail: zhangzili@ime.ac.cn

0 引言

随着非接触式光电测量技术的发展,光学三维形貌测量技术被广泛应用于智能制造、虚拟现实、缺陷检测、文化遗产保护等诸多领域^[1]。投影光栅相位法^[2]是结构光测量法的一个重要分支,其通过在被测物体表面投射编码条纹的方式添加额外的特征信息,以实现高精度三维形貌测量。当前工业上多采用双目光栅测量系统^[3-4],它不仅解决了双目视觉中特征稀疏的问题,还解决了单目光栅测量系统^[5-6]需要标定投影仪带来的系统复杂问题。双目光栅测量系统通过相位解算将光栅信息转换为相位信息,左右图像中等相位点的寻找是影响其测量速度与精度的主要因素。

随着高分辨率相位立体匹配的计算量大大增加,人们对匹配的精度与速度也提出了更高的要求^[7-8]。姜宏志等^[9]通过对相位图执行极线校正、降低搜索维度来提高匹配速度。肖志涛等^[10]在极线约束的基础上,利用拟合二次曲面求最小值的方法实现亚像素立体匹配,提高了匹配精度,但增加了时间消耗。王鹏等^[11]利用条纹级次约束缩小匹配范围,提高了匹配速度。Zhang等^[12]提出固定窗口聚合的AD-Census算法,考虑到了周围像素的影响但匹配速度有所降低。以上方法在低分辨率的情况下匹配效果良好,但是在高分辨率下,由于绝对相位图的双精度数据类型,其计算时间与占用内存将极大增加,很难在匹配速度和精度间取得平衡。

本文提出了一种高效的立体匹配方法,利用多尺度分析实现快速高精度的相位立体匹配。首先对极线校正后的绝对相位图进行下采样以生成图像金字塔对,使左右对应点纵坐标相同。再利用低分辨率层的视差来对高分辨层进行视差预测,以此缩小各层的视差搜索范围,逐层匹配直至视差图分辨率与输入图像相等,最后进行亚像素级视差优化。相比传统方法,本文所提方法效率更高,可实现快速高精度的相位立体匹配。

1 多尺度相位立体匹配算法

1.1 双目光栅投影系统测量原理

双目光栅投影系统主要由DLP(Digital Light Procession)投影仪和左右相机组成,其工作机制如图1所示。投影仪将12幅编码条纹图案打在待测物体表面,连续投射时同步触发左右相机的拍摄功

能,将变形条纹图案记录下来。

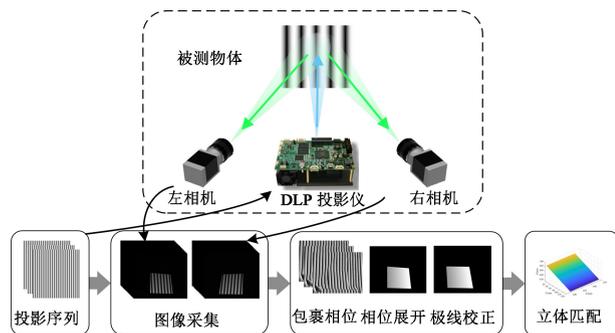


图1 双目光栅投影系统工作机制

对于变形后的条纹图案,其光强分布情况可描述如下:

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\theta(x, y)] \quad (1)$$

式中, $A(x, y)$ 为背景光强, $B(x, y)$ 为物体表面的反射率, $B(x, y)/A(x, y)$ 为条纹对比度,一般为1, $\theta(x, y)$ 为光栅相位分布。

相位解算采用三频四步相移法^[13],即同一种频率的光栅需要经过四次相移,分别将每帧图像的相移量记为 I_1, I_2, I_3 和 I_4 ,可得图中各点的包裹相位为

$$\varphi(x, y) = \arctan\left(\frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3}\right) \quad (2)$$

式(2)中求解的包裹相位范围在 $[-\pi, \pi]$,还需通过三频外差法进行展开,得到各点的唯一相位值:

$$\phi(x, y) = \varphi(x, y) + 2m_0\pi \quad (3)$$

式中, m_0 为包裹相位对应的条纹级次。

绝对相位图上各点相位值唯一,通过立体匹配寻找出极线校正后^[9]左右图像上相位相同的对应点即可获得各点视差值,再将相机标定参数代入计算,根据三角测量原理即可计算出各点的三维坐标。

1.2 多尺度分析原理

图像金字塔^[14]属于图像多尺度分析范畴,是来源于同一张图像的不同分辨率降采样后的图像集合,其包含了图像的多尺度信息。

其中高分辨率图像尺度较大,弱纹理区域范围较大,小窗口内信息量较小,适合纹理丰富区域的精确匹配。低分辨率图像尺度较小,弱纹理区域被有效压缩,小窗口内信息量增大有利于提高弱纹理区域的匹配精度。因此,可先将图像降采样至低分辨率进行快速的匹配以获得初始视差,再对高分辨率层的视差进行预测,缩小搜索范围,获得更精细的视差图。

1.3 多尺度相位立体匹配

Scharstein 等^[15]提出传统的立体匹配方法在代价计算时需要构建一个 $W \times H \times D \times F$ 的代价体 (其中, $W \times H$ 表示图像分辨率, D 表示视差范围, F 表示特征通道数)。随着图像分辨率的提高以及视差的增大, 匹配算法的内存需求和运行时间会呈立方速度增长。

因此, 本文将多尺度金字塔模型引入相位立体匹配, 利用低分辨率层的视差匹配结果对高分辨率层的视差进行预测, 缩小视差搜索范围, 逐层计算视差直至视差图分辨率与输入图像相等, 最后执行亚像素视差优化来获得高分辨率视差图。

1.3.1 图像金字塔生成

设立体匹配的初始输入左右相位图分别为 I_L 和 I_R , 对其进行 N 次降采样后变换至顶层图像分辨率为 15 万像素左右, 得到左右图像金字塔 G_L 和 G_R , 每个金字塔共 N 层, 由底至顶分别为 $G_L^{(1)}$, $G_L^{(2)}, \dots, G_L^{(N)}$ 和 $G_R^{(1)}, G_R^{(2)}, \dots, G_R^{(N)}$, 即:

$$\begin{cases} G_L^{(1)} = I_L \\ G_R^{(1)} = I_R \\ G^{(l)}(i, j) = G^{(l-1)}(2i + 1, 2j + 1) \end{cases} \quad (4)$$

式中, l 为左右金字塔的第 l 层, $1 \leq l \leq N, 0 \leq i \leq r^{(l)}, 0 \leq j \leq c^{(l)}$, $r^{(l)}$ 和 $c^{(l)}$ 分别为第 l 层图像的行数和列数。

经过降采样后, 设底层原始图像的高为 $H^{(1)}$, 宽为 $W^{(1)}$, 最小视差为 $\text{MinDisp}^{(1)}$, 最大视差为 $\text{MaxDisp}^{(1)}$, 视差范围为 $D^{(1)}$, 则第 N 层图像的高为 $H^{(N)} = H^{(1)} / 2^{N-1}$, 宽为 $W^{(N)} = W^{(1)} / 2^{N-1}$, 最小视差为 $\text{MinDisp}^{(N)} = \text{MinDisp}^{(1)} / 2^{N-1}$, 最大视差为 $\text{MaxDisp}^{(N)} = \text{MaxDisp}^{(1)} / 2^{N-1}$, 视差范围为 $D^{(N)} = D^{(1)} / 2^{N-1}$ 。

1.3.2 视差图初始化

视差初始化即选取金字塔顶层的图像 $G_L^{(N)}$ 和 $G_R^{(N)}$ 进行立体匹配, 计算出第 N 层的视差图 DispMap_N 。以第 N 层的视差为初始参考视差, 通过对其插值放大来对下一层的视差进行预测。低分辨率层的匹配结果为粗匹配, 因此匹配代价可选用单点相位差的绝对值 (Absolute Differences, AD), 构建大小为 $W^{(N)} \times H^{(N)} \times D^{(N)}$ 的 3D 代价体 C_N , 即:

$$C_N(x, y, d) = |G_L^{(N)}(x, y) - G_R^{(N)}(x - d, y)| \quad (5)$$

式中, $C_N(x, y, d)$ 为点 (x, y) 在视差为 d 时的匹配代价, 其中 $1 \leq x \leq W^{(N)}, 1 \leq y \leq H^{(N)}, \text{MinDisp}^{(N)} \leq d \leq \text{MaxDisp}^{(N)}$ 。

通过计算出代价体中各像素点的最小代价值位置, 可得到各点的视差值索引 d , 再加上起始视差 $\text{MinDisp}^{(N)}$, 即可得到初始视差图 DispMap_N , 即:

$$\text{DispMap}_N(x, y) = \text{MinDisp}^{(N)} + \underset{d}{\operatorname{argmin}} C_N(x, y, d) \quad (6)$$

1.3.3 高分辨率层视差预测

视差预测即对分辨率较低的视差图进行插值放大, 获得下一层大尺度图像中各点的大致视差。考虑到视差预测只需要获得大致的视差, 双线性插值法或双立方插值等方法插值的精度高, 但是大大增加了计算量, 最近邻插值法速度快且能满足初始视差的精度要求。因此, 本文选用最近邻插值法对低分辨率层的视差图进行上采样, 来实现对下一层的视差预测。

设图 2 中 D_0 点为需要插值的点, $D_{00}, D_{01}, D_{10}, D_{11}$ 是 D_0 点周围 4 个已知视差值的像素点, D_{00} 与 D_0 的欧氏距离最近, 因此 D_0 点视差与 D_{00} 点相等。

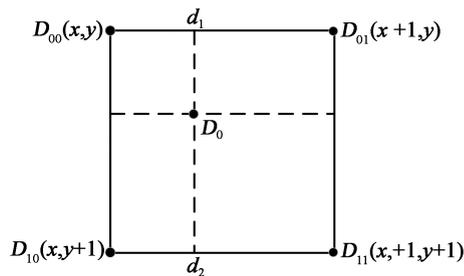


图 2 最近邻插值示意图

利用第 N 层的视差图对 $N-1$ 层进行视差预测, 将图像大小扩大一倍。因为构建金字塔时降采样导致视差缩小了一倍, 所以还需对预测视差的值乘 2 进行转换, 得到第 $N-1$ 层的预测视差图 $\text{DispMap}_{N-1}^{\text{pre}}$ 。

1.3.4 高分辨率层立体匹配

以预测视差图为指导, 缩小第 $N-1$ 层各像素点的视差搜索区间到预测值的前后十个点内, 即:

$$D_{N-1}(i, j) = \{ \text{DispMap}_{N-1}^{\text{pre}}(i, j) + k \mid -10 \leq k \leq 10 \} \quad (7)$$

式中, $D_{N-1}(i, j)$ 为第 $N-1$ 层上点 (i, j) 的视差搜索候选点集, $\text{DispMap}_{N-1}^{\text{pre}}(i, j)$ 为点 (i, j) 的预测视差值。

此时只需要构建大小为 $W^{(N-1)} \times H^{(N-1)} \times 2l$ 的3D代价体 C_{N-1} ，由公式即可得到第 $N-1$ 层视差图 DispMap_{N-1} 。

逐层执行 1.3.3 和 1.3.4 的视差预测和计算过程，直到计算出第一层的高分辨率视差图，如图 3 所示。

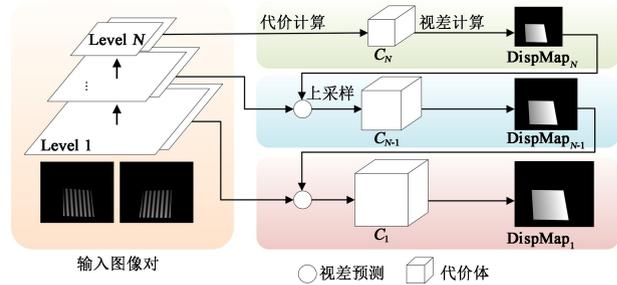


图3 逐层匹配示意图

1.3.5 亚像素求精

经逐层立体匹配后，得到的第一层视差图为整数，而实际情况下的视差值不会以整数形式存在，因此需要对视差进行亚像素求精以提高精度。根据第一层的匹配代价体 C_1 ，利用整数视差前后相邻的代价值进行二次曲线拟合，将整像素的视差数据转化为亚像素的视差数据：

$$d_{\text{sub}} = d_{\text{int}} - \frac{C_1(x, y, d+1) - C_1(x, y, d-1)}{2(C_1(x, y, d+1) + C_1(x, y, d-1) - 2C_1(x, y, d))} \quad (8)$$

式中， d_{sub} 为亚像素视差值， d_{int} 为整像素视差值， $C_1(x, y, d)$ 为点 (x, y) 在视差 d 下的匹配代价值。

1.3.6 本文算法流程图

图 4 为基于多尺度分析的相位立体匹配算法流程图。

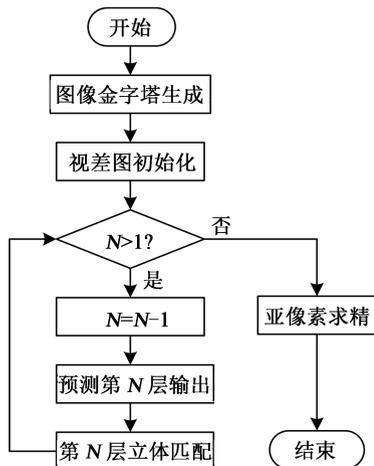


图4 多尺度相位立体匹配算法流程图

2 实验与分析

2.1 实验装置

本文所用实验装置由左右两个高分辨率相机和DLP投影仪组成。DLP投影仪的分辨率为 $912 \text{ pixel} \times 1140 \text{ pixel}$ ，两台相机的型号相同(Basler acA2440-75 μm)，分辨率均为 $2448 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ 。

实验中被测物体与实验装置的距离约为 700 mm ，左右相机拍摄的公共区域约为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。在实验过程中依序投射频率为 $50, 49, 40$ 的3组12幅编码条纹图案，并分别采用传统点基元算法^[9]与本文算法进行立体匹配，分析比较实验结果。在实验过程中，本文算法共构建三层金字塔，对应的图像大小分别为输入图像的 $1, 1/4$ 和 $1/16$ 倍。

2.2 相位立体匹配精度验证

本节实验旨在比较不同算法单点相位匹配的情况，为了方便提取单点特征，选用如图 5(a)所示带有黑底白点的圆点平面靶标进行实验，其中红色虚线框内的35个圆点的圆心为参考点，通过比对参考点和匹配点的相位偏差可反映出各算法的匹配准确度。立体匹配过程的输入为经过极线校正预处理后的左右相位图，分别如图 5(b)和(c)所示。

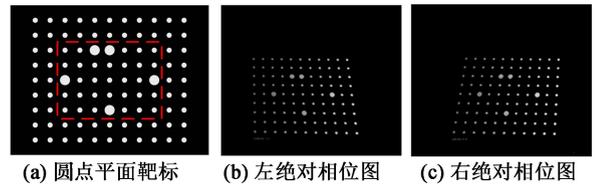


图5 单点相位匹配实验

利用两种算法计算出的参考点在左右图像中的相位差值分布如图 6 所示，可以看出本文所提方法使用了亚像素优化后的相位偏差分布在 $-0.01^\circ \sim 0.01^\circ$ ，其匹配精度要略优于传统方法。

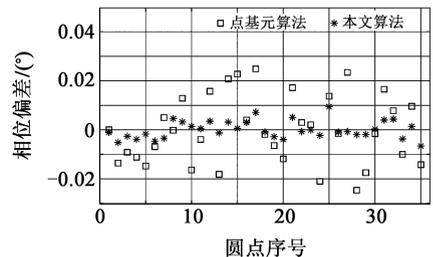


图6 圆心点相位匹配偏差对比图

2.3 三维重建实验

选取一块面积为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 、标称偏差

为 0.001 mm 的标准平面靶标进行三维重建实验,比较不同算法的重建效果。传统点基元算法与本文所提算法得到的平面重建点云,分别如图 7(a),(b)所示,可以看出传统方法的点云边缘处有较多的离群点。利用 Geomagic 软件分别对两组点云进行最佳平面拟合,其局部偏差分布分别如图 7(c),(d)所示。

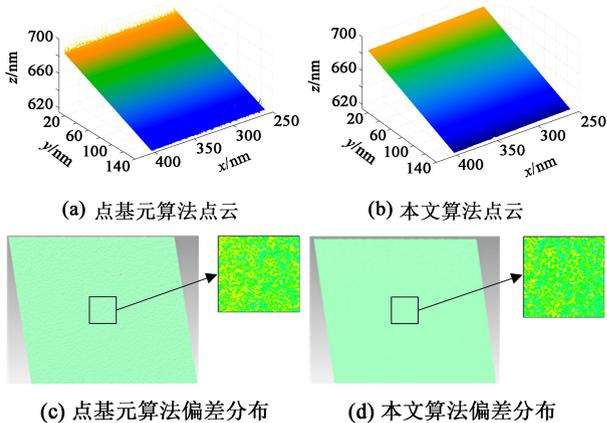


图 7 平面靶标三维重建结果

不同算法下的平面靶标重建精度对比如表 1 所示,参与拟合平面的点数为 90 万左右。从表 1 可以看出,本文所提算法相较于传统点基元算法的平面拟合误差有所降低,均方根误差(RMSE)可控制在 0.02 mm 内,满足高精度三维测量的要求。

表 1 平面靶标重建精度对比 单位:mm

匹配算法	最大偏差	平均偏差	RMSE
点基元算法	+0.101 4/-0.142 2	0.000 4	0.023 5
本文算法	+0.101 1/-0.130 5	0.000 4	0.019 8

本文算法与传统相位匹配算法在时间消耗方面的对比如表 2 所示,表中运行时间指相位匹配过程耗时,代码运行平台为 matlab2017a。本文所提算法采用分层匹配的策略,可大大减小代价体的空间占用率,可在 2 s 左右完成 500 万像素图像的立体匹配,相较于传统相位匹配算法速度提升了 63.9%。

表 2 不同算法的运行时间

匹配算法	图像分辨率/pixel	运行时间/s
点基元算法	2 448×2 048	5.881
本文算法	2 448×2 048	2.125

3 结论

本文提出了一种基于多尺度分析的相位立体匹配方法。利用极线校正后的相位图构建图像金字

塔,通过低分辨率层的视差对高分辨率层进行视差预测,缩小了各点视差的搜索区间,在保证精度的情况下大大提高了相位立体匹配速度。该方法较传统的点基元相位匹配方法速度更快,精度更高,对内存空间的占用率更低。实验结果表明该方法对标准平面的三维重建效果良好,在输入图像分辨率为 500 万像素的情况下,可在 2 s 左右完成立体匹配,测量精度在 0.02 mm 以内,测量速度较传统方法提升 63.9%,可以实现对物体三维形貌的快速高精度测量要求。

参考文献:

- [1] 左超,张晓磊,胡岩,等. 3D 真的来了吗?——三维结构光传感器漫谈[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 9-53.
Zuo Chao, Zhang Xiaolei, Hu Yan, et al. Has 3D finally come of age?——An introduction to 3D structured-light sensor[J]. Infrared and Laser Engin., 2020, 49(3): 9-53.
- [2] 毛翠丽,卢荣胜,董敬涛,等. 相移条纹投影三维形貌测量技术综述[J]. 计量学报, 2018, 39(5): 628-640.
Mao Cuili, Lu Rrongsheng, Dong Jingtao, et al. Overview of the 3D profilometry of phase shifting fringe projection[J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(5): 628-640.
- [3] 殷永凯,张宗华,刘晓利,等. 条纹投影轮廓术系统模型与标定综述[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 127-144.
Yin Yongkai, Zhang Zonghua, Liu Xiaoli, et al. Review of the system model and calibration for fringe projection profilometry [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 127-144.
- [4] Dai M, Yang F, Liu C, et al. A dual-frequency fringe projection three-dimensional shape measurement system using a DLP 3D projector[J]. Opt. Commun., 2017, 382: 294-301.
- [5] 王建华,杨延西. 基于彩色编码光栅投影的双 N 步相移轮廓术[J]. 中国光学, 2019, 12(3): 616-627.
Wang Jianhua, Yang Yanxi. Double N-step phase-shifting profilometry using color-encoded grating projection[J]. Chinese Optics, 2019, 12(3): 616-627.
- [6] 张旭,邵双运,祝祥,等. 光学三维扫描仪光强传递函数的测量和校正[J]. 中国光学, 2018, 11(1): 123-130.
Zhang Xu, Shao Shuangyun, Zhu Xiang, et al. Measurement and calibration of the intensity transform function of the optical 3D profilometry system[J]. Chinese Opt., 2018, 11(1): 123-130.
- [7] Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: A review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 106: 119-131.
- [8] Der J S V, Dirckx J J. Real-time structured light profilometry: a review [J]. Optics and Lasers in Engin., 2016, 87: 18-31.

(下转第 878 页)

基于自适应筛选 Harris 角点检测的快速图像配准算法

蔡欣展, 刘艳艳*

(南开大学 电子信息与光学工程学院 天津市光电子薄膜器件与技术重点实验室, 天津 300350)

摘要: 针对传统 Harris 角点检测算法的图像配准过程计算量大、速度慢等问题, 提出一种快速预筛选 Harris 角点检测算法。首先通过 FAST 算法快速排除大量非特征点, 再通过抑制半径解决 FAST 角点聚簇现象, 然后在 FAST 角点邻域内筛选出 Harris 角点, 最后采用 Brute-Force 匹配方式得到精准匹配。实验结果表明: 所提改进算法不仅提高了角点检测速度而且减少了冗余角点数量, 在图像配准过程中有效提高了配准速度与精度, 配准效果良好。

关键词: Harris 角点; FAST 算法; 抑制半径; Brute-Force 匹配

中图分类号: TP391.41 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0875-04

Fast Image Registration Algorithm Based on Adaptive Screening Harris Corner Detection

CAI Xinzhan, LIU Yanyan

(Key Laboratory of Photoelectronic Thin Film Devices and Technology of Tianjin, School of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, CHN)

Abstract: Aiming at the problems of large amount of calculation and slow speed in the process of image registration for traditional Harris corner detection algorithm, in this paper, a fast pre-screening Harris corner detection algorithm was proposed. Firstly, a large number of non-feature points were quickly eliminated with the FAST algorithm, and then the clustering of FAST corners was solved by suppressing the radius. Secondly, Harris corners in the neighborhood of FAST corners were selected, and finally Brute-Force matching was used to realize accurate matching. Experimental results show that the proposed algorithm not only improves the corner detection speed but also reduces the number of redundant corners, and it effectively improves the registration speed and accuracy, realizing a good registration effect.

Key words: Harris corner; FAST algorithm; suppression radius; Brute-Force match

0 引言

图像配准, 即快速并精准地匹配出两幅不同视角图像中的相似之处, 是许多图像应用的前提, 在许多领域有着广泛的应用, 如目标追踪与识别、医学图像诊断、遥感图像处理等。图像配准按照配准方法, 可以分为三种: 基于灰度图像的配准、基于变换域的图像配准和基于特征点的图像配准, 其中基于特征点的配准方法提取相对容易、快速, 并且具有尺度旋

转性以及良好的鲁棒性^[1-2]等优点。文献[3]提出一种改进 Harris 算法, 根据分割图像后每个子图的对比如去自适应设置阈值来提高后期图像配准的正确率。文献[4]提出一种通过引入高斯尺度空间使得 Harris 算子获得尺度不变性的方法, 从而提高定位及配准精度。

Harris 角点检测算法通过自相关矩阵计算出图像上灰度像素信号具有明显变换的点, 需要遍历图像中每个像素点来计算自相关矩阵的特征值, 从而得到角点, 这大大影响了图像配准的速度, 同时由于其阈值选取的不确定性, 导致角点会出现聚簇和伪角点现象。为此本文提出一种改进方法, 首先进

收稿日期: 2020-08-13.

* 通信作者: 刘艳艳

E-mail: lytianjin@nankai.edu.cn

行 FAST 角点快速检测,排除大量的非特征点,然后引入自适应抑制半径排除强干扰点,使得角点分布更加均匀。本文所提算法计算量较小,鲁棒性强,提升了配准速度与正确率。

1 Harris 角点检测原理

Harris 算子是 Harris 和 Stephens 提出的一种基于 Moravec 算法改进的特征点提取算子^[5-7]。Moravec 算子只考虑了每隔 45°方向的 8 个固定的方向。Harris 算子可以通过 Taylor 展开变形而获得任意方向,从而计算任意方向上的像素值变化^[8]。对于局部微小移动量 $[u, v]$,近似表达式为

$$E(u, v) = \sum_{x, y} \omega(x, y) [I(x + u, y + v) - I(x, y)]^2 \tag{1}$$

式(1)经过 Taylor 展开后产生一个自相关矩阵:

$$M_h = \sum_{x, y} \omega(x, y) \otimes \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中, I_x, I_y 分别是图像函数 x, y 方向的偏导函数,其中 $\omega(x, y)$ 代表高斯滤波函数:

$$\omega(x, y) = \exp \frac{-(x^2 + y^2)}{2\delta^2} \tag{3}$$

通过矩阵 M_h 产生两个特征值,这两个特征值代表了每个像素点变换的激烈程度,在实际计算过程中通过响应函数(4)来获得每个角点的响应值,称 L 为特征点的响应值,若设定的阈值 T 小于响应值 L ,则该像素点是图像中的角点,否则,该像素点为非角点。

$$L = \det M - K (\text{trace } M)^2 \tag{4}$$

式中, $\det M$ 是矩阵 M 特征值的积, $\text{trace } M$ 为矩阵 M 特征值的和。

2 基于快速预筛选的 Harris 角点检测算法

本文采用预筛选的方式来解决 Harris 算法运算量大、速度慢、易产生角点聚簇现象等问题,整体算法流程如图 1 所示。

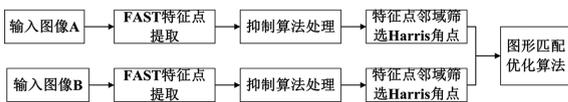


图 1 整体算法流程图

2.1 FAST 特征点检测算法

一幅图像中并不是所有像素点都是特征点,但

是由于 Harris 算法需要遍历整幅图像的每个像素点,计算量大大增加。本文首先利用 FAST 特征点检测算法快速筛选出初始角点,在 FAST 检测算法中,一般选择半径为 3 的离散 Bresenham 圆作为模板^[9-10],如图 2 所示。

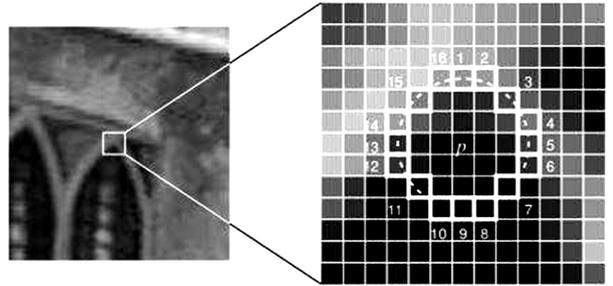


图 2 FAST 角点检测模板

设 p 处的强度值为 I_p ,阈值为 t , i 个连续点的强度值分别为 $P_i, i=1, 2, \dots, 16$ 。如果有

$$P_i > I_p + t \text{ 或 } P_i < I_p - t \tag{5}$$

则认为 p 是一个特征点。通过角点响应函数 N 来判断每个角点的强度:

$$N = \sum_{x \in \text{circle}(p)} |I(x) - I(p)| > \alpha_d \tag{6}$$

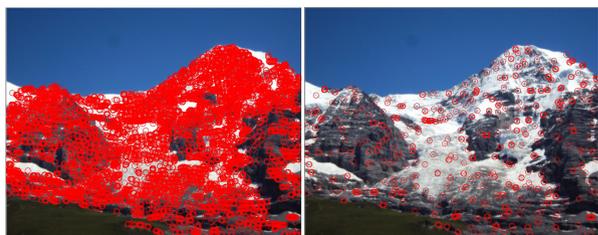
2.2 FAST 角点抑制半径

由于 FAST 算法检测出的角点个数由式(6)中的阈值 α_d 决定,同时由于阈值 α_d 选取的不确定性,会导致检测出的角点相对集中在特征丰富的区域,形成角点聚簇的现象,不能均匀地分布在图像的区域,同时增大了后续 Harris 角点检测的计算量,影响配准精度以及配准速度。

为有效解决上述问题,本文提出了一种抑制半径处理方法,就是为每个特征点确定一个抑制半径 R ,在其抑制半径内只保留该特征点本身,其他特征点则会被抑制。以特征点 a_1 为例,将 a_1 的响应值 N_1 与其余所有特征点的响应值 N_i 进行比较,挑选出所有响应值比 N_1 大的点,然后在选出的点中找出与 a_1 的欧氏距离最近的特征点。 a_1 与该点的欧氏距离便作为其抑制半径 R_1 ,据此求出所有特征点对应的抑制半径 R 。按照抑制半径由大到小排序,选出所需数量的特征点。这样可以有效解决角点聚簇的现象,使得特征点分布更加均匀,同时有效减少计算量。

改进后的 FAST 角点提取效果图如图 3 所示,图 3(a)为传统 FAST 算法提取的特征点结果,图 3(b)为本文改进 FAST 算法提取的特征点结果。通过比较可以看出,本文算法稳定性更高,可提取出

量更好的特征角点。



(a) 传统 FAST 算法 (b) 改进 FAST 算法

图 3 FAST 算法特征提取结果对比

3 特征点优化匹配

本文算法通过改进 FAST 算法快速筛选出一批特征点,为了保证特征点的稳定性与准确性,同时选取以 FAST 角点为中心、半径为 r 内的像素点可能成为 Harris 角点,半径 r 的计算公式为

$$r = \frac{7\delta\sqrt{2}}{3} \quad (7)$$

式中, δ 根据图像大小决定,本文所有图片计算取值为 1。

将后续通过 Harris 提取的每个特征点进行特征描述,构成一个特征向量,通过暴力匹配 (Brute-Force) 的方式进行图像配准。Brute-Force 是计算出两幅图像的特征向量的欧氏距离,认为若两幅图像中特征点越相似,则它们所对应的特征向量之间的欧氏距离越小。采用文献[14]的匹配思想,计算两幅图片中最小的欧氏距离与次近邻距离之比,即:

$$P = \frac{d_0}{d_1} \quad (8)$$

其中, d_0 为最小欧氏距离, d_1 为次近邻距离。若 P 小于阈值,则认为两个角点互为匹配点对。

4 实验结果及分析

为了验证本文所提算法在配准正确率以及配准速度上的改进效果,进行验证实验。实验硬件环境如下:CPU Intel(R)Core(TM) i5-2450M;内存为 8 GB,64 位 Windows 10 操作系统;软件实施平台为 MATLAB 2018a。

为了验证本文算法在特征点提取以及配准正确率和配准速度上的优势,分别采用传统 Harris 算法与 Shi-Tomasi 算法^[11]以及文献[12]的算法对图 4 所示测试图像(677×449)进行对比实验,实验结果如图 5~6,结果对比如表 1 所示。

从表 1 与图 5 可以得出:改进算法采用预筛选

的方式排除大量非特征点,从而不需要完整计算整幅图像每一个像素点的响应函数,相较于传统 Harris 算法,其图像配准所需计算量大幅降低,同时角点分布更加均匀,匹配正确率也有一定提升。



图 4 测试图像

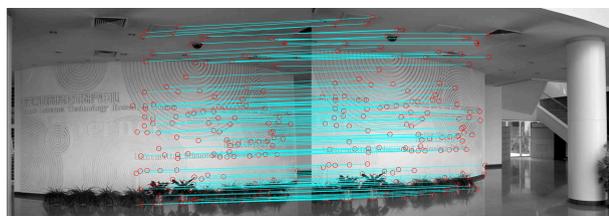


图 5 本文算法配准结果

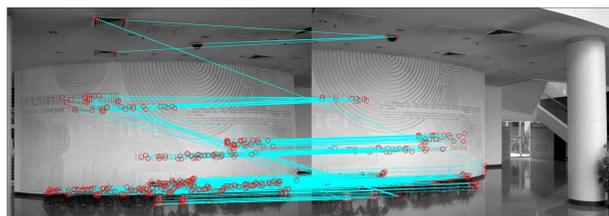


图 6 传统 Harris 算法配准结果

表 1 实验结果对比

匹配算法	特征点数 (左/右)	粗匹配 点对	正确匹 配点对	正确率/%	总耗时/s
Shi-Tomasi	397/303	51	31	60.78	4.553
文献[12]	164/166	42	29	69.05	2.118
Harris	349/321	349	236	67.62	2.625
本文	400/400	116	113	97.41	1.867

5 结论

针对传统 Harris 算法用于图像配准中计算量大、正确率低,会出现角点聚簇现象等问题,本文提出了一种将改进的 Harris 算法和 Brute-Force 匹配相结合的快速图像配准算法。通过预处理将非特征点进行过滤,同时利用抑制半径改善角点分布,有效地解决角点聚簇现象,使得角点在整幅图像中分布更加合理。实验结果表明,本文所提算法可以有效提高特征点匹配的准确率和匹配速度。

参考文献:

- [1] Liu Z, Guo Y, Feng Z, et al. Improved rectangle template matching based feature point matching algorithm[C]// Proc.

- of 2019 Chinese Control and Decision Conf. (CCDC), 2019.
- [2] Liu J, Bu F. Improved RANSAC features image-matching method based on SURF[J]. The J. of Engin. , 2019(23): 9118-9122.
- [3] 张见双, 张红民, 罗永涛, 等. 一种改进的 Harris 角点检测的图像配准方法[J]. 激光与红外, 2017, 47(2): 230-233.
Zhang Jianshuang, Zhang Hongmin, Luo Yongtao, et al. An improved image registration method for Harris corner detection [J]. Laser and Infrared, 2017, 47(2): 230-233.
- [4] 刘军泉, 刘晓华, 黄小仙. 改进的 Harris 算法在海洋遥感图像处理中的应用[J]. 现代电子技术, 2019, 42(18): 95-102.
Liu Junquan, Liu Xiaohua, Huang Xiaoxian. Application of improved Harris algorithm in ocean remote sensing image processing[J]. Modern Electronic Technol. , 2019, 42(18): 95-102.
- [5] Yang Zhuoqian, Liu Xinang, Yang Yang. Harris feature and coherent point drift based remote sensing image registration [C]// Proc. of IEEE Inter. Conf. on Electronic Measurement & Instruments, 2017: 554-558.
- [6] Sun L, Wang S Q, Xing J C. An improved Harris corner detection algorithm for low contrast image[C]// Proc. of IEEE The 26th Chinese Control and Decision Conf. , 2014.
- [7] Zou W, Li Z. Extraction of interest points by Harris interest operator for synthetic aperture radar image coregistration[J]. IET Image Proc. , 2013, 7(5): 500-513.
- [8] Manoranjitham R, Deepa P. Novel interest point detector using bilateral-Harris corner method[C]// Proc. of IEEE Inter. Conf. on Advanced Computing & Communication Systems, 2017: 1-4.
- [9] Yao Jinjin, Zhang Pengchao, Wang Yan, et al. An adaptive uniform distribution ORB based on improved quadtree[J]. IEEE Access, 2019, PP(99): 1-1.
- [10] Lowe D G. Distinctive image features from scale invariant keypoints[J]. Inter. J. of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [11] Juraneck L, Stastny J, Skorpil V. Effect of low-pass filters as a Shi-Tomasi corner detector's window functions[C]// Proc. of Inter. Conf. on Telecommun. & Signal Proc. , 2018.
- [12] 黄远征, 尹春丽, 刘 波, 等. 基于改进的快速 Shi-Tomasi 特征点检测算法的图像拼接算法[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(4): 70-73.
Huang Yuanzheng, Yin Chunli, Liu Bo, et al. Image mosaic algorithm based on improved fast Shi-Tomasi feature point detection algorithm [J]. Mechanical Design and Research, 2018, 34(4): 70-73.
- 作者简介:**
蔡欣展(1997—),男,陕西省渭南市人,硕士研究生,主要从事数字图像处理、FPGA 方面的研究;
刘艳艳(1978—),女,博士,高级实验师,主要从事集成电路设计、数字信号处理与模式识别方面的研究。
-
- (上接第 874 页)
- [9] 姜宏志, 赵慧洁, 梁宵月, 等. 基于极线校正的快速相位立体匹配[J]. 光学精密工程, 2011, 19(10): 2520-2525.
Jiang Hongzhi, Zhao Huijie, Liang Xiaoyue, et al. Phase-based stereo matching using epipolar line rectification[J]. Optics and Precision Engin. , 2011, 19(10): 2520-2525.
- [10] 肖志涛, 卢晓方, 耿 磊, 等. 基于极线校正的亚像素相位立体匹配方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(S1): 225-230.
Xiao Zhitao, Lu Xiaofang, Geng Lei, et al. Sub-pixel matching method based on epipolar line rectification [J]. Infrared and Laser Engin. , 2014, 43(S1): 225-230.
- [11] 王 鹏, 张宇倩, 孙长库, 等. 极线和级次双约束的光栅投影测量方法[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(4): 144-150.
Wang Peng, Zhang Yuqian, Sun Changku, et al. Fringe projection measurement method based on polar line and fringe order double constraint[J]. Infrared and Laser Engin. , 2020, 49(4): 144-150.
- [12] Zhang S, Wu M, Wu Y, et al. Fixed window aggregation AD-census algorithm for phase-based stereo matching[J]. Appl. Opt. , 2019, 58(32): 8950-8958.
- [13] Zuo C, Feng S J, Huang L, et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review[J]. Optics and Lasers in Engin. , 2018, 109: 23-59.
- [14] Thevenaz P, Ruttimann U E, Unser M. A pyramid approach to subpixel registration based on intensity[J]. IEEE Trans. on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 1998, 7(1): 27-41.
- [15] Scharstein D, Szeliski R, Zabih R, et al. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms[J]. Inter. J. of Computer Vision, 2001, 47(1): 7-42..
- 作者简介:**
蔡 超(1995—),男,浙江杭州人,硕士,主要研究方向为图像处理、机器视觉;
张滋黎(1983—),女,山西朔州人,博士,副研究员,主要研究方向为机器视觉及光电测试技术。

卫星激光通信中一种基于矩阵扩展的RC-LDPC码构造方法

袁建国^{*}, 袁雅琴, 刘议靖

(重庆邮电大学 光通信与网络重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 为降低卫星激光通信系统中的硬件资源,结合斐波那契数列的性质,基于矩阵扩展的方法提出了一种码率兼容低密度奇偶校验(Rate-Compatible Low-Density Parity-Check, RC-LDPC)码的构造方法。用该方法所构造的RC-LDPC码围长为6且具有准循环特性,所需存储元素少,降低了计算复杂度,利于硬件实现,更适合在卫星激光系统中传输。仿真结果表明:利用该方法构造的RC-LDPC码在较大码率范围内均具有良好的译码性能,且在相同条件下,当误码率(BER)为 10^{-6} 时,所构造的RC-LDPC码与同码率、同码长的其他码型相比较,其净编码增益均有一定提高。

关键词: 卫星激光通信; 码率兼容低密度奇偶校验码; 斐波那契数列; 矩阵扩展; 低复杂度
中图分类号: TN929.11 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0879-05

A Construction Method of RC-LDPC Codes Based on The Matrix Extension for Satellite Laser Communications

YUAN Jianguo, YUAN Yaqin, LIU Yijing

(Key Laboratory of Optical Communication and Networks, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN)

Abstract: A novel construction method of rate-compatible low-density parity-check (RC-LDPC) codes based on the matrix extension and combined with the properties of Fibonacci sequences is proposed in order to reduce the hardware resource in satellite laser communication systems. The RC-LDPC code with girth-6 and quasi-cyclic characteristics can be constructed by this construction method, which can save the storage elements and reduce the computational complexity. Its hardware implementation was more easily realized and the RC-LDPC code is more suitable for satellite laser communication systems. The simulation results show that the RC-LDPC code constructed by this method can realize a better decoding performance in a wider code-rate range. Under the same parameters, the net coding gain of the constructed RC-LDPC code is more than those of other codes with the same code-rate and code-length at the bit error rate (BER) of 10^{-6} .

Key words: satellite laser communications; RC-LDPC codes; Fibonacci sequence; matrix extension; low complexity

收稿日期: 2020-05-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61971079, 61671091).

^{*} 通信作者: 袁建国

E-mail: yyyjg@126.com

0 引言

在卫星激光通信系统中,卫星信道具有时变性,受多径衰落、多普勒、阴影效应及各种外界干扰因素的影响,接收到的信号会发生大幅度变化,所以针对卫星信道的信道编码不仅需要较强的纠错能力,而且还要根据信道的当前状态动态地调整发送码字的码率^[1-2]。以前为了动态调整发送码字的码率,需要采用处理不同码率的编译码器,虽然实现了多码率的传输,但是大大浪费了资源^[3-4]。而码率兼容技术让高码率码字嵌套在低码率码字中,可以根据估计的信道状态调整发送码字的码率,信道质量好时采用高码率传输码字,信道质量差时采用低码率传输码字^[5-6],这样既可以保证通信的可靠性,又可以最大化地提高信息的传输速率,节约资源。所以对码字的码率兼容技术研究具有现实意义。

信道编译码模块是通信系统中至关重要的一环。低密度奇偶校验(Low-Density Parity-Check, LDPC)码是一种性能十分逼近香农限的线性分组码,它构造灵活、译码简单,适合于硬件实现,被认为是迄今为止纠错性能最好的码之一。LDPC 码的构造方法大致分为随机构造和结构化构造两类^[7]。随机构造码纠错性能优异,但是由于没有确定的形式而导致编译码复杂度较高。而结构化构造码具有准循环特性,利用简单的移位寄存即可实现编码,大大降低了编译码复杂度^[8-9],成为研究热点。

卫星激光通信系统传输距离远,硬件资源有限,针对这一特点,本文通过对码率兼容低密度奇偶校验(Rate-Compatible Low-Density Parity-Check, RC-LDPC)码的构造方法进行研究,结合斐波那契数列(Fibonacci Sequence)的性质,提出了一种基于矩阵扩展的低复杂度 RC-LDPC 码构造方法。

1 码率兼容 LDPC 码

打孔和扩展是实现码率兼容的两种经典方法^[10]。其中矩阵扩展通过同时扩展校验矩阵的行和列,来保持码字信息位数不变,从而实现多码率的变换。其构造灵活,具有较好的性能,适合于实际应用和硬件实现。该方法构造的 RC-LDPC 码的校验矩阵 H_i 可以用如下公式表示:

$$H_i = \begin{bmatrix} H_{i-1} & 0 \\ H_s & H_{ext} \end{bmatrix} \quad (1)$$

RC-LDPC 码分为四个部分,等式右边的 H_{i-1}

为上一次扩展得到的校验矩阵; H_0 则表示母码矩阵,大小为 $M_0 \times N_0$,为了保持母码的特性,矩阵中的右上部分为 0,保持信息位长度不变,在母码的基础上,每次扩展都添加 M 行和 M 列; H_s 是每次扩展时添加的一个稀疏矩阵,在这个矩阵中要确保每行至少有一个校验信息,以便建立母码和新校验位之间的依赖关系; H_{ext} 是一个大小为 $M \times M$ 的扩展方阵。第 i 次扩展后码字的码率 R_i 可用式(2)计算:

$$R_i = \frac{N_0 - M_0}{N_0 + i \times M} \quad (2)$$

本文采用扩展校验位的方法得到一组信息位长度相同、码率不同的 RC-LDPC 码,根据式(1)将码字构造分为以下三个步骤:

(1)首先构造一个高码率母码矩阵 H_0 ;

(2)在母码矩阵的基础上进行矩阵扩展,扩展过程中有两部分需要进行构造,扩展方阵 H_{ext} 和稀疏矩阵 H_s ,由于右上角填充的零元素,为了均衡码重,构造 H_{ext} 时使其列重不小于 3;

(3)构造稀疏矩阵 H_s 。为了建立与母码的依赖性,本文采用的方法是将两个 $M \times M$ 的单位矩阵进行特殊排列,其余位置用零元素补全,具体排列方式见图 1,第一次扩展时两个单位矩阵是并排的,第二次及之后的两个单位矩阵之间存在相同的间隔,且呈斜对角线排列。除了第一次扩展的两个并排单位矩阵可能会与母码产生四环之外,余下的排列方式可以巧妙地避免四环的产生,设计好母码可以消除掉全部的四环。

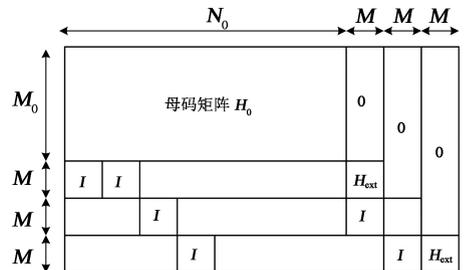


图 1 RC-LDPC 码校验矩阵结构图

2 本文 RC-LDPC 码的构造方法

2.1 QC-LDPC 码

QC-LDPC 码是一类编译码复杂度很低的结构化 LDPC 码,其校验矩阵由移位矩阵确定,用零矩阵、单位矩阵和循环置换矩阵对移位矩阵进行扩展即可得到最终的校验矩阵。QC-LDPC 码的校验矩

阵和移位矩阵可表示为式(3)~(4):

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{(p_{1,1})} & \mathbf{I}_{(p_{1,2})} & \cdots & \mathbf{I}_{(p_{1,L})} \\ \mathbf{I}_{(p_{2,1})} & \mathbf{I}_{(p_{2,2})} & \cdots & \mathbf{I}_{(p_{2,L})} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{I}_{(p_{J,1})} & \mathbf{I}_{(p_{J,2})} & \cdots & \mathbf{I}_{(p_{J,L})} \end{bmatrix}_{Jp \times Lp} \quad (3)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \cdots & p_{1,L} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \cdots & p_{2,L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{J,1} & p_{J,2} & \cdots & p_{J,L} \end{bmatrix}_{J \times L} \quad (4)$$

其中, J 和 L 分别表示移位矩阵的行数和列数, p 为扩展因子, $\mathbf{I}_{(p_{i,j})}$ ($1 \leq i \leq J, 1 \leq j \leq L$)表示 $p \times p$ 的循环置换矩阵, $p_{i,j} \in \{-1, 0, \dots, p-1\}$ 为每个置换矩阵的移位值,当 $p_{i,j} = -1$ 时, $\mathbf{I}_{(p_{i,j})}$ 表示一个 $p \times p$ 的零矩阵,当 $p_{i,j} = 0$ 时, $\mathbf{I}_{(p_{i,j})}$ 表示一个 $p \times p$ 的单位矩阵。

在移位矩阵 \mathbf{P} 中,若干个元素可能会构成一个环,扩展成校验矩阵之后依然存在同样大小的环,环的长度会影响LDPC码的译码性能,短环的存在甚至会使LDPC码在译码时不能收敛,所以在构造LDPC码时,至少要保证其校验矩阵中不存在四环。对于移位矩阵中的移位值序列,在校验矩阵中存在长度为 $2k$ 的环时,满足定理1^[11]。

定理1 ($a_1, a_2, \dots, a_{2k-1}, a_{2k}$)是移位矩阵 \mathbf{P} 中的序列,其中 a_i 和 a_{i+1} 在同一行或同一列, a_i 和 a_{i+2} 在不同行且不同列,则序列($a_1, a_2, \dots, a_{2k-1}, a_{2k}$)构成校验矩阵 \mathbf{H} 中存在长度为 $2k$ 的环的充要条件为

$$\mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ F(2 \times 2 + 1) + 1 & F(2 \times 2 + 2) + 2 & F(2 \times 2 + 3) + 3 & \cdots & F(2 \times 2 + L) + L \\ F(2 \times 3 + 1) + 1 & F(2 \times 3 + 2) + 2 & F(2 \times 3 + 3) + 3 & \cdots & F(2 \times 3 + L) + L \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F(2 \times J + 1) + 1 & F(2 \times J + 2) + 2 & F(2 \times J + 3) + 3 & \cdots & F(2 \times J + L) + L \end{bmatrix}_{J \times L} \quad (7)$$

从式(7)中可以看出除第一行元素之外,其余每行都是递增数列,每一列也是递增数列,由定理1和2可知,经过扩展之后得到的校验矩阵围长为6,不存在四环。确定了移位矩阵的行数和列数之后,即可对其进行填充操作,0元素用 $p \times p$ 的单位矩阵替换,其余元素用 $p \times p$ 的单位矩阵向右循环移位相应位数的置换矩阵替换,最终得到 $Jp \times Lp$ 的校验矩阵,其中 p 取值要大于移位矩阵中元素的最大值。

$$\sum_{i=1}^{2k} (-1)^i a_i \equiv 0 \pmod{p} \quad (5)$$

其中, p 是扩展维数。定理1可作为检测校验矩阵中是否存在短环的依据,通过巧妙的设计移位矩阵,可以构造译码性能较好的大围长LDPC码校验矩阵。本文将根据QC-LDPC码的构造原理来设计母码矩阵 \mathbf{H}_0 和扩展方阵 \mathbf{H}_{ext} 。

2.2 \mathbf{H}_0 的构造方法

定义1:对于一个数列 $F(n)$, n 为非负整数,如果 $F(n) = F(n-1) + F(n-2)$ ($n \geq 2$); $F(0) = 1$, $F(1) = 1$,则满足以上条件的数列称为斐波那契数列。斐波那契数列完全是由自然数组成的数列,其前后项比值趋近于黄金比值0.618,又称为黄金分割数列,典型的斐波那契数列表示如下:1,1,2,3,5,8,13,21,34,...

定理2:对于一个斐波那契数列,若 $n > m$,且 $n, m, k \in Z^+$,则有

$$F(n+k) - F(n) > F(m+k) - F(m) \quad (6)$$

定理2表示斐波那契数列中序号差相等的斐波那契数的差值组成的新数列是一个单调递增数列,鉴于斐波那契数列的优异性质,可用其构造纠错性能良好的LDPC码。

构造一个高码率的校验矩阵 \mathbf{H}_0 。作为RC-LDPC码的母码矩阵,利用斐波那契数列设计其移位矩阵 \mathbf{P}_0 ,构造方法为:第一行元素取0,令 $2 \leq i \leq J, 1 \leq j \leq L$,从第二行开始,移位矩阵中的元素表示为 $\mathbf{P}_0(i, j) = F(2i+j) + j$,所得矩阵如式(7):

2.3 \mathbf{H}_{ext} 的构造方法

在上一次扩展之后的矩阵基础上添加 M 行和 M 列,得到更低码率的码字,添加的扩展方阵 \mathbf{H}_{ext} 可以补充高码率和低码率码字之间的依赖性。采用与母码矩阵类似的构造方法,首先根据斐波那契数列构造一个 $J \times J$ 的矩阵 \mathbf{P}_{ext} ,令 $1 \leq i \leq J, 1 \leq j \leq J$,矩阵中的元素用 $F(i+2j)$ 表示,所得矩阵如式(8):

$$\mathbf{P}_{\text{ext}} = \begin{bmatrix} F(1+2 \times 1) & F(1+2 \times 2) & F(1+2 \times 3) & \cdots & F(1+2 \times J) \\ F(2+2 \times 1) & F(2+2 \times 2) & F(2+2 \times 3) & \cdots & F(2+2 \times J) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F(J+2 \times 1) & F(J+2 \times 2) & F(J+2 \times 3) & \cdots & F(J+2 \times J) \end{bmatrix}_{J \times J} \quad (8)$$

该矩阵每行和每列元素均是递增的,同理可知扩展次数 $z > F(J+2 \times J)$ 时,此方法构造的校验矩阵不存在四环,选择合适的 J 值和扩展次数 z ,用零矩阵、单位矩阵和循环置换矩阵进行填充,得到大小为 $M \times M$ 的 \mathbf{H}_{ext} 。

按照图 1 的方式将母码矩阵、扩展方阵以及稀疏矩阵组合起来,每增加 M 行和 M 列,可得一系列由高码率到低码率的 RC-LDPC 码。母码矩阵和扩展方阵中均不存在四环,由此可知组合之后得到的校验矩阵亦不存在四环,最终构造的 RC-LDPC 码围长为 6。

3 仿真分析

根据上述构造方法构造 (3,9) 母码移位矩阵,如式 (9) 所示,取 $p=390, M=390$,得到信息位长度为 2340,码长为 3510 的母码,之后进行矩阵扩展,得到码率集合为 $\{2/3, 3/5, 6/11, 1/2, 6/13\}$ 的 RC-LDPC 码。

$$\mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 7 & 11 & 17 & 26 & 40 & 62 & 97 & 153 \\ 9 & 15 & 24 & 38 & 60 & 95 & 151 & 241 & 386 \end{bmatrix} \quad (9)$$

为了验证本文所提出的构造码型的译码性能,对其进行仿真实验。仿真环境:信道为加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN) 信道,调制方式采用二进制相移键控 (Binary Phase Shift Keying, BPSK) 调制,译码方式为置信传播 (Belief Propagation, BP) 算法,迭代次数为 50 次。对各个码率的码字进行仿真分析,图 2 给出了码率集合中码字的误码性能,从图 2 中可以看出,码率集合中每个码率的码字都具有较好的瀑布区性能且没有出现明显的错误平台。

为了验证 RC-LDPC 码单个码率的码字性能,将码率为 0.67 的 RC-LDPC 码在相同条件下与同码长同码率的利用渐进边增长 (Progressive Edge Growth, PEG) 算法构造的 PEG-LDPC (3510, 2340) 码和文献 [11] 中利用大衍数列 (Dayan Sequence, DY) 及原模图 (Protograph) 构造的多码率 P-DY-QC-LDPC (3510, 2340) 码进行仿真对比,如图 3 所

示,本文构造的 RC-LDPC 码有更好的瀑布区性能,且当误码率为 10^{-6} 时,本文构造的 RC-LDPC 码的净编码增益比 PEG-LDPC (3510, 2340) 码和 P-DY-QC-LDPC (3510, 2340) 码分别提高了约 0.03 和 0.29 dB。

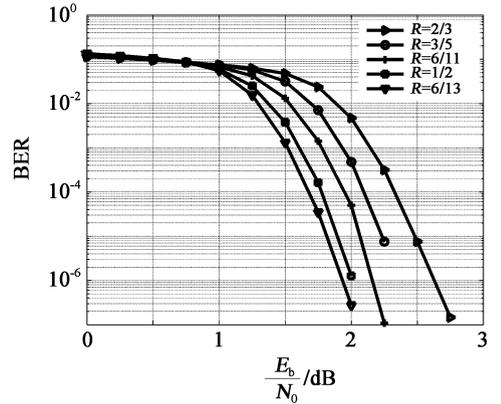


图 2 不同码率下信息位长 2340 的 RC-LDPC 码仿真图

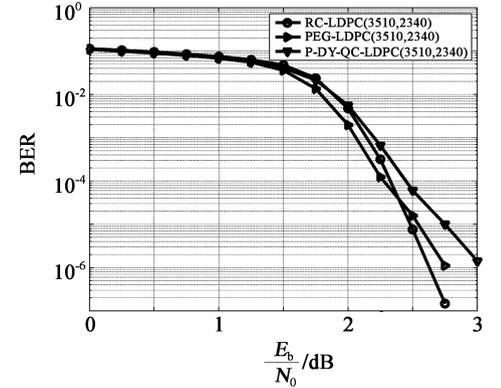


图 3 码率为 0.67 的 RC-LDPC 码与其他码仿真对比图

为了验证 RC-LDPC 码在其他码率的译码性能,将码率为 0.5 的 RC-LDPC 码与文献 [11] 中直接利用大衍数列构造的 DY-QC-LDPC (4680, 2340) 码和文献 [10] 中利用卢卡斯数列 (Lucas Sequence, LS) 构造的 LS-QC-LDPC (4680, 2340) 码进行对比,由图 4 可以看出,在误码率为 10^{-6} 时,RC-LDPC 码比同码长同码率的 DY-QC-LDPC (4680, 2340) 码和 LS-QC-LDPC (4680, 2340) 码分别有 0.29 和 1.73 dB 的净编码增益。

需要说明的是,进一步分析本文构造方法可知,本文构造方法构造简单,只需储存扩展因子和数列的前两个元素,其余元素的值通过简单的四则运算

便可得到,在很大程度上节省了系统的存储空间,从而节约其硬件资源,因而本文构造方法比较适用于卫星激光通信系统。

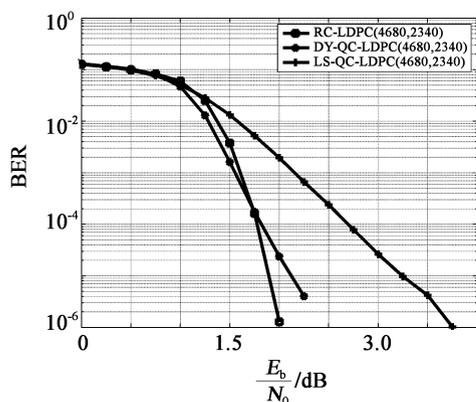


图4 码率为0.5的RC-LDPC码与其他码字仿真对比图

4 结束语

本文利用斐波那契数列的特性并基于矩阵扩展,提出了一种适用于卫星激光通信系统中RC-LDPC码的新颖构造方法。仿真结果表明:在同等条件下,本文所构造的RC-LDPC码纠错性能在同等码长码率下优于所对比其他码型,并且在较大码率范围内均具有良好的纠错性能。另外,本构造方法能在很大程度上降低计算复杂度,节省系统的存储空间,从而节约其硬件资源,更适用于卫星激光通信系统。对后续卫星激光通信系统的信道编码研究具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Wu X, Jiang M, Zhao C, et al. Low-rate PBRL-LDPC codes for URLLC in 5G[J]. IEEE Wireless Commun. Lett., 2018, 7(5): 800-803.
- [2] Ten Brink S, Kramer G, Ashikhmin A. Design of low-density parity-check codes for modulation and detection[J]. IEEE Trans. on Commun., 2004, 52(4): 670-678.
- [3] Zhang K, Ma X, Zhao S, et al. A new ensemble of rate-

compatible LDPC codes[C]//Proc. of IEEE. Inter. Symp. on Information Theory, 2012: 2536-2540.

- [4] Chen T Y, Vakilinia K, Divsalar D. Protograph-based raptor-like LDPC codes[J]. IEEE Trans. on Commun., 2015, 63(5): 1522-1532.
- [5] Wang B, Chen P, Fang Y, et al. The design of vertical RS-CRC and LDPC code for ship-based satellite communications on-the-move[J]. IEEE Access, 2019: 44977-44986.
- [6] Nguyen T V, Nosratinia A, Divsalar D. Rate compatible short length protograph LDPC codes [J]. IEEE Commun. Lett., 2013, 17(5): 948-951.
- [7] Huang J, Zhou W, Zhou S. Structured nonbinary rate-compatible low-density parity-check codes [J]. IEEE Commun. Lett., 2011, 15(9): 998-1000.
- [8] 黄胜, 庞晓磊, 贾雪婷, 等. 基于卢卡斯数列的大围长QC-LDPC码构造方法[J]. 电子科技大学学报, 2016, 45(2): 174-178, 184.
Huang Sheng, Pang Xiaolei, Jia Xueting, et al. Construction method of large girth QC-LDPC codes based on Lucas sequences [J]. J. of University of Electronic Science and Technol. of China, 2016, 45(2): 174-178, 184.
- [9] 袁建国, 郑德猛, 蹇红. 一种利用大衍数列构造多码率原模图QC-LDPC码的方法[J]. 半导体光电, 2018, 39(3): 389-393.
Yuan Jianguo, Zheng Demeng, Jian Hong. A construction method of multi-code-rate protograph QC-LDPC codes using Dayan sequence[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2018, 39(3): 389-393.
- [10] Mu X, Shen C, Bai B. A combined algebraic- and graph-based method for constructing structured RC-LDPC codes [J]. IEEE Commun. Lett., 2016, 20(7): 1273-1276.
- [11] Zhang Y, Yang F F. The performance analysis of QC-LDPC codes constructed by Dayan sequence for coded cooperative relay[C]// Proc. of IEEE Computers, Communications and IT Applications Conf., 2014: 84-88.

作者简介:

袁建国(1968—),男,重庆人,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为光通信系统中LDPC编译码技术与OFDM技术。

空间激光通信高速多制式光调制技术

兰 枫*, 韩 婷, 郭精忠
(西安空间无线电技术研究所, 西安 710100)

摘 要: 空间激光通信调制技术以幅度调制和相位调制为主,单一通信终端只能适应特定的调制格式,灵活性较差,存在星间链路组网应用的局限性。文章基于数字处理的光调制技术,采用LiNbO₃晶体正交相位调制器,结合闭环偏压控制算法,实现了光调制格式、调制速率可变的星载光调制器,并针对空间应用对幅度调制和相位调制方式进行了优化,最大化光纤放大器效率。该技术硬件实现了625 Mb/s~5 Gb/s通信速率分档可调,OOK, BPSK和QPSK调制格式可变,发射EVM优于9%,实际引入灵敏度损耗小于1 dB。该调制器已经完成所有空间环境试验,可广泛适用于各种体制的激光通信终端,进行星地、星间激光通信建链。同时,该调制器具备模拟调制的功能,可实现星间微波光子信号的透明转发。

关键词: 空间激光通信; 多调制格式; 多速率

中图分类号: TN929.11 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0884-05

Multi-format Optical Modulation Technique with High Bit Rate for Space Laser Communication

LAN Feng, HAN Ting, GUO Jingzhong
(Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, CHN)

Abstract: The amplitude modulation and phase modulation are the key techniques in laser communication systems, but there is a limitation in satellite network with inter-satellite links as single laser terminal can only have a specific modulation format. In this paper, an optical modulation technique which is compatible with multi-modulation formats and bit rates based on digital processing was described. A LiNbO₃ quadrature modulator combined with closed-loop bias control algorithm was applied to implement amplitude modulation (OOK modulation), phase modulation (BPSK modulation) and multilevel phase modulation (QPSK modulation) in a signal modulator. The modulation bit rate can be tuned from 625 Mb/s to 5 Gb/s according to different modulation formats of OOK, BPSK and QPSK. The transmission EVM is less than 9% with coding and scrambling functions and the inducted loss for the receiving sensitivity is less than 1 dB. This modulator has been verified in all environment experiments such as vibration test, thermal vacuum circle test and radiation test and could be used in various laser communication terminals. The modulator realizes the function of analog modulation, so it is expected to be used as a transparent transponder for microwave photonic signal.

Key words: space laser communication; multi-modulation formats; multi-bit rates

0 引言

对地观测数据等业务的迅速发展,需要更高速

率的对地数传。空间激光通信,尤其是相干通信,由于其发散角小、数传速率高、安全性高,越来越受到各国的重视。由ESA和DLR支持、德国TeSat研制的新一代数据中继系统(EDRS)^[1]中的高轨卫星

收稿日期:2020-07-02.

*通信作者:兰 枫 E-mail: 3201581996@163.com

AlphaSat 和低轨卫星 Sentinel-1 在 2014 年底实现了双向在轨通信验证^[2],其信息速率为 300 Mb/s~1.8 Gb/s,采用 BPSK 相干探测。NASA 也公布了其高轨激光通信演示计划(LCRD)^[3],拟采用 DPSK 调制,速率为 2.4 Gb/s。日本对高速空间相干通信也进行了大量研究,在实验室实现了 2.5 Gb/s 的 BPSK 信号传输^[4]。国内也逐步开始进行高速空间激光通信实验。

随着天地一体化网络的发展,天基骨干网和天基接入网的接入激光终端根据应用场景不同,通信体制也不尽相同。如果针对 OOK/BPSK/DPSK/QPSK 设计不同的调制器,则需要设计三种不同的接收组件,严重降低了发射组件的批产能力,同时也限制了星间链路组网的应用。本文提出基于数字处理软件的多格式调制技术,可完全兼容 OOK/BPSK/DPSK/QPSK 调制格式,可满足高轨对高轨、高轨对低轨、地轨对地轨,以及卫星对地面站等不同距离下,多种调制格式、多种速率信号的自适应调制发射。同时,可以实现模拟调制,进行微波光子信号的透明转发。该调制器可实现 625 Mb/s, 1.25 Gb/s 和 2.5 Gb/s 的 BPSK/OOK 调制,2.5 Gb/s 和 5 Gb/s 的 QPSK 调制,EVM 小于 9%,实际引入灵敏度损耗小于 1 dB,具备编码、加扰等功能,工作温度适应 0~50 ℃,波长稳定性优于 0.03 nm,线宽优于 150 kHz,功耗小于 28 W。

1 多制式光调制技术分析

空间激光通信调制技术多采用幅度调制和相位调制,相应使用强度调制器和相位调制器,在面对多体制卫星间组网应用时,显得灵活性不足。采用马赫-曾德尔调制器(MZM),可以兼容幅度调制和相位调制,适用于多种应用场景。

如图 1 所示,正交相位调制器(Quadrature Modulator)可以看做由两个马赫-曾德尔调制器(MZM)嵌入一个马赫-曾德尔干涉仪(MZI),其中两个 MZM 调制器各有一个直流偏置电极 V_B 和射

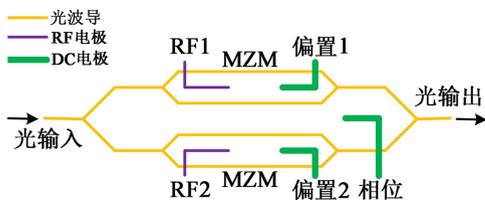


图 1 正交相位调制器构成

频信号输入电极 $V_{RF}(t)$,MZI 有一个相位调整电极,用来调整两路调制器输出光的相位差 $\Delta\phi_{IQ}$ 。

1.1 偏压控制算法

单路 MZM 调制器输出功率表达式为^[6]

$$P_I(t) = \frac{kP_i}{4} \left[1 + \cos\left(\pi \frac{V_{RFI}(t) + V_{BI}}{V_\pi}\right) \right] \quad (1)$$

$$P_Q(t) = \frac{kP_i}{4} \left[1 + \cos\left(\pi \frac{V_{RFQ}(t) + V_{BQ}}{V_\pi}\right) \right] \quad (2)$$

式中, P_i 为信号光输入功率, k 为调制器插入损耗, $V_{RFI}(t)$ 和 $V_{RFQ}(t)$ 分别为 I 路和 Q 路的射频信号输入, V_{BI} 和 V_{BQ} 分别为 I 路和 Q 路的直流偏置电压, V_π 为调制器产生附加相位为 π 时的电压,对应整个光波相位周期的一半,也称半波电压。

MZM 调制器输出功率对直流偏置电压的响应曲线如图 2 所示,存在输出功率最大点($2V_\pi$)、最小点(V_π)和中间点($V_\pi/2$)。

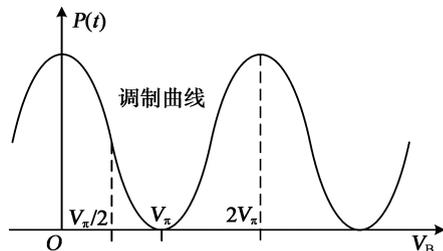


图 2 平均输出功率响应曲线

1.1.1 OOK 调制偏压控制算法

如图 3 所示,对于 OOK 调制,MZM 直流偏置点应该工作在输出功率中间点,同时射频信号电压峰值 V_{pp} 应小于 V_π ,以保证 MZM 调制器工作在线性区。当直流偏置点稳定工作在中间点时,射频信号峰值越接近于 V_π ,输出功率振幅越大,消光比最佳,光放大器的效率最高。这里选择 V_{pp} 等于 V_π ,即

$$V_{RFI}(t) = \begin{cases} \frac{V_\pi}{2}, & \text{符号为“1”} \\ -\frac{V_\pi}{2}, & \text{符号为“0”} \end{cases} \quad (3)$$

由式(1)可得,输出功率振幅 P_{pp} 为

$$P_{pp} = \left| \frac{kP_i}{4} \left[1 + \cos\left(\pi \frac{\frac{V_\pi}{2} + V_{BI}}{V_\pi}\right) \right] - \frac{kP_i}{4} \left[1 + \cos\left(\pi \frac{-\frac{V_\pi}{2} + V_{BI}}{V_\pi}\right) \right] \right| =$$

$$\left| \frac{kP_i}{2} \sin \frac{\pi V_{BI}}{V_\pi} \right| \quad (4)$$

因此,当 $V_{BI} = mV_\pi/2 (m = \pm 1, \pm 2, \dots)$ 时,输出功率的振幅为最大。OOK 调制格式下,偏压控制算法的核心就是保证输出功率的振幅最大。对于 Q 路信号来说,在 OOK 调制格式下,可以将 Q 路光功率输出设为零点。

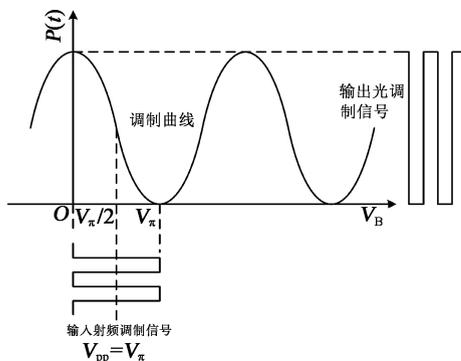


图 3 OOK 调制平均输出功率响应曲线

1.1.2 BPSK 调制偏压控制算法

对于相位调制, MZM 直流偏置点应该工作在零值点 $V_B = \pm V_\pi, \pm 3V_\pi, \dots$, 射频电压信号峰峰值小于 $2V_\pi$, 输入输出传递曲线如图 4 所示, 输出光功率大小与射频信号电压峰峰值相关, 当峰峰值等于 $2V_\pi$ 时, 输出信号光功率最大, 更适合空间激光通信传输。

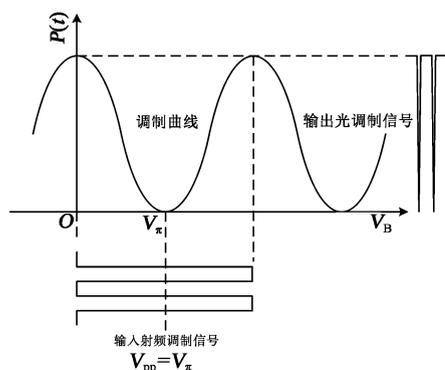


图 4 BPSK 调制平均输出功率响应曲线

零值点是图 2 所示传递曲线的最小点, 必要条件是一阶导数为 0, 因此对公式(1)的 V_B 求导数:

$$\frac{\partial(P_1(t))}{\partial V_{BI}} = -\frac{kP_i}{4} \frac{\pi}{V_\pi} \sin\left(\pi \frac{V_{RF1}(t) + V_{BI}}{V_\pi}\right) = 0 \quad (5)$$

展开三角函数为

$$\sin \frac{\pi V_{RF1}(t)}{V_\pi} \cos \frac{\pi V_{BI}}{V_\pi} + \cos \frac{\pi V_{RF1}(t)}{V_\pi} \sin \frac{\pi V_{BI}}{V_\pi} = 0 \quad (6)$$

式中, $V_{RF1}(t)$ 为射频输入调制信号, 峰峰值小于 $2V_\pi$, 且符号“1”和符号“0”电平关于直流偏置点对称, 因此 $\sin \frac{\pi V_{RF1}(t)}{V_\pi}$ 在一段时间内积分值为 0。满足公式(5)成立的条件为 $V_{BI} = m\pi (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 。

显然, 当直流偏置点位于最大点和最小点时均能满足一阶导数为 0, 需要对输出功率 $P_1(t)$ 对偏置电压 V_{BI} 求二阶导数来判断直流偏置点是最小点还是最大点:

$$\frac{\partial^2(P_1(t))}{\partial V_{BI}^2} = -\frac{kP_i}{4} \left(\frac{\pi}{V_\pi}\right)^2 \cos\left(\pi \frac{V_{RF1}(t) + V_{BI}}{V_\pi}\right) \quad (7)$$

直流偏置点为最大值 $P_1(t)_{max}$ 成立的条件为 V_{BI} 二阶导数小于 0, 即

$$\frac{\partial^2(P_1(t))}{\partial V_{BI}^2} < 0 \rightarrow \cos\left(\pi \frac{V_{RF1}(t) + V_{BI}}{V_\pi}\right) < 0 \quad (8)$$

当

$$\begin{cases} V_{BI} = m\pi (m = \pm 1, \pm 3, \dots) \text{ 且 } V_\pi < V_{pp} \leq 2V_\pi, \\ V_{BI} = m\pi (m = 0, \pm 2, \dots) \text{ 且 } 0 < V_{pp} < V_\pi \end{cases},$$

$P_1(t)_{max}$ 成立。

直流偏置点为最小值 $P_1(t)_{min}$ 成立的条件为 V_{BI} 二阶导数大 0, 即

$$\frac{\partial^2(P_1(t))}{\partial V_{BI}^2} > 0 \rightarrow \cos\left(\pi \frac{V_{RF1}(t) + V_{BI}}{V_\pi}\right) > 0 \quad (9)$$

$$\begin{cases} V_{BI} = m\pi (m = 0, \pm 2, \dots) \text{ 且 } V_\pi < V_{pp} \leq 2V_\pi, \\ V_{BI} = m\pi (m = \pm 1, \pm 3, \dots) \text{ 且 } 0 < V_{pp} < V_\pi \end{cases},$$

$P_1(t)_{min}$ 成立。

MZM 进行相位调制时, 直流偏置点需要工作在零值点, 即 $V_{BI} = m\pi (m = \pm 1, \pm 3, \dots)$, 且为保证足够的输出功率, 应满足 $V_\pi < V_{pp} \leq 2V_\pi$, 因此在 BPSK 调制格式下, 偏压控制算法的核心是保证平均输出功率最大。对于 Q 路信号, 需要将其输出设为零点。

1.1.3 QPSK 调制偏压控制算法

对于正交相位调制, I 和 Q 路 MZM 直流偏置点均工作在零值点, 控制算法与 BPSK 调制格式相同, 考虑到外接探测器仅能够对 QM 调制器输出功率进行反馈, I 和 Q 两路 MZM 直流偏置点和 MZI 相位偏置点电压需要分时进行调整。

IQ 两路 BPSK 信号的相位差 $\Delta\phi_{IQ}$ 由 MZI 干涉仪的偏置电压决定, 当 $\Delta\phi_{IQ} = \frac{\pi}{2}$ 时, I 和 Q 两路

正交,信号互不相关。

I和Q路信号光的光场可表达为^[7]

$$E_I = A_I e^{j(\omega t + \phi_I)} \quad (10)$$

$$E_Q = A_Q e^{j(\omega t + \phi_Q)} \quad (11)$$

其中, A 为光场振幅, ω 为光载波的角速度, ϕ 为光载波的初始相位。光功率与光场振幅成正比, $2P_I = A_I^2$, QM调制器为单端输出,反相的另一端未输出, QM的单端输出功率可表达为

$$P_{\text{out}} = \frac{kP_i}{2} [1 \pm \cos(\Delta\phi_{IQ})] = \begin{cases} \frac{kP_i}{2} [1 + \cos(\Delta\phi_{IQ})], & \text{当 I 路和 Q 路信号符号相同} \\ \frac{kP_i}{2} [1 - \cos(\Delta\phi_{IQ})], & \text{当 I 路和 Q 路信号符号相反} \end{cases}$$

在实际通信过程中, I路和Q路信号不相关,相同符号和相反符号将交替出现,若 $\cos(\Delta\phi_{IQ}) \neq 0.5\pi$,会导致功率起伏,产生交流信号。因此,要控制相位偏置电压为 0.5π ,就要将输出功率的交流流量控制到最小。对于正交相位调制,需要采用闭环控制算法来调整3个偏压,分别为 V_{BI} , V_{BQ} 和 $\Delta\phi_{IQ}$ 。 V_{BI} 和 V_{BQ} 算法是基于输出平均功率最大, $\Delta\phi_{IQ}$ 的算法是基于输出功率交流流量最小。由于共用一个光电探测器进行功率反馈,3个偏压调整是分步进行的。

1.2 多制式光调制器设计

多制式光调制器系统功能如图5所示,主要包含供电、FPGA及其外围电路、调制器驱动、本振激光器、光IQ调制器、光耦合器、光电探测器以及相应的模数、数模转换电路等。供电可实现一次电转至二次电;FPGA实现与其他数据源的基带数据传输、激光器/调制器/调制器驱动等的控制,实现调制格式的闭环控制和切换,产生高速基带信号用于光调制;本振激光器作为高稳光源, IQ调制器实现光调制。

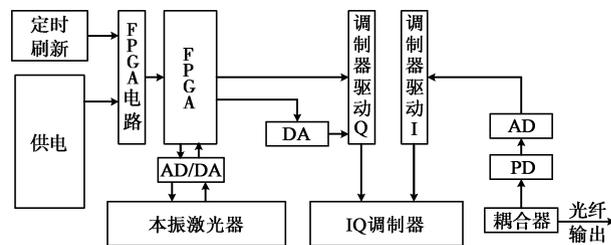


图5 空间激光调制器功能框图

QM调制器作为调制器的核心部分,调制格式控制及切换采用了闭环控制算法,在IQ调制器输出进行分路,10%的信号接入光电探测器进行反馈,

$$P_{\text{out}} = \frac{|E_I + E_Q|^2}{2} = \frac{kP_i}{4} \left\{ 1 - \frac{\cos \frac{\pi V_I}{V_\pi}}{2} - \frac{\cos \frac{\pi V_Q}{V_\pi}}{2} \pm 2 \sin \frac{\pi V_I}{2V_\pi} \sin \frac{\pi V_Q}{2V_\pi} \cos(\Delta\phi_{IQ}) \right\} \quad (12)$$

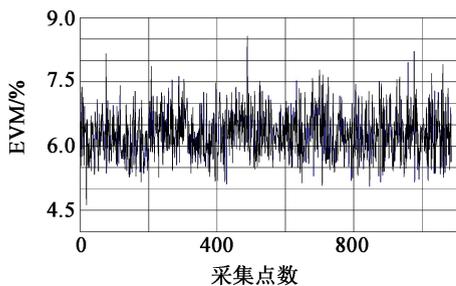
式中, $V_{RFI}(t)$ 和 $V_{RFQ}(t)$ 的 $V_{pp} = 2\pi$, 即符号“1”为 $+\pi$, 符号“0”为 $-\pi$, 输出功率可简化为

FPGA对反馈信号进行处理,并通过DA输出至IQ调制器的三个偏压控制端口。

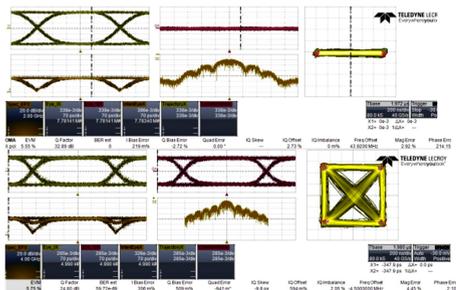
2 系统性能试验

为了验证信号光调制器的性能,首先对调制器EVM性能进行了测试。测试时调制器输出为5Gb/s QPSK信号,数据源为调制器本身产生的15阶伪随机码,使用力科示波器配合Coherent Solution公司的OMA设备进行。图6所示为EVM性能测试统计结果,测试时采用电脑采集示波器数据进行统计,采集间隔为10s,共采集约1100个点(3h),满足实际工作条件。从统计结果可以看出,平均EVM为6.3%,最大不超过9%。

为了验证调制器在系统中的性能,将调制器与激光通信系统进行了联试。联试框图如图7所示,光调制器与光放大器连接并接入激光终端A进行发射,光放大器输出功率为5W。出射光通过衰减,在静态条件下,由激光终端B进行跟踪对准,并耦合至单模保偏光纤。光纤输出接入光低噪放,再接入光矢量信号分析仪OMA进行测试。图8所示为灵敏度S测试结果,接收光功率是在低噪放前端进行测试。5Gb/s QPSK在 -50.9 和 -47.6 dBm下分别进行测试,估计的误码率(BER)分别为 1×10^{-4} 和 5×10^{-8} 。由于调制器可以进行编码,在考虑编码条件下,接收机可以实现 1×10^{-3} 误码纠错至 1×10^{-7} 以上,因此系统实际灵敏度可达 -50.9 dBm,对应光子数为13每比特。该灵敏度与理论灵敏度^[5]相差3dB左右。考虑到低噪放噪声系数(4dB),OMA采集处理误差,实际调制引入的损失小于1dB。



(a)



(b)

图6 发射 EVM 性能测试(3 h)

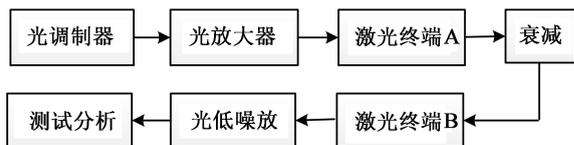


图7 系统测试框图

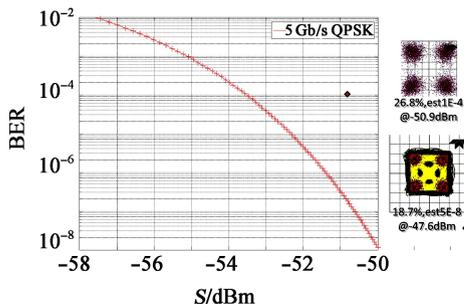


图8 5 Gb/s 相干接收灵敏度测试结果

3 总结

本文提出了一种空间激光通信应用的多制式光调制器实现方法,采用正交相位调制器,分析了OOK, BPSK, QPSK调制格式的闭环控制算法,实

现了最高速率 5 Gb/s、多种调制格式可切换的一体化光调制器。实验测试结果表明该调制器的长期 EVM 小于 9%,实际调制引入损失小于 1 dB,可为空间激光通信提供灵活的高速光信号源。限于实验条件,后续将开展基于模拟信号的幅度调制实验,验证其作为微波光子信号透明转发的功能。

参考文献:

- [1] Knut Bohmer, Gregory M, Heine F, et al. Laser communication terminals for the European data relay system [J]. Proc. of SPIE, 2012, 8246: 8.
- [2] Seel S, Troendle D, Heine F, et al. Alphasat laser terminal commissioning status aiming to demonstrate geo-relay for sentinel SAR and optical sensor data [C]// IGARSS IEEE Inter. Geoscience and Remote Sensing Symp., 2014.
- [3] Caplan D O, Bedrosian P S, Wang J P. Expansion of multi-rate capabilities for agile DPSK lasercom transceivers [C]// Free-Space Laser Communications XXXI. 2019: 1091010.
- [4] Toshiyuki Ando, Eisuke Haraguchi, Kenichi Tajima, et al. Homodyne BPSK receiver with Doppler shift compensation for inter satellite optical communication [C]// IEEE Inter. Conf. on Space Optical Systems & Applications, 2011: 279-285.
- [5] Kikuchi K, Tsukamoto S. Evaluation of sensitivity of the digital coherent receiver [J]. J. of Lightwave Technol., 2008, 26(13): 1817-1822.
- [6] Cho P S, Khurgin J B, Shpantzer I. Closed-loop bias control of optical quadrature modulator [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2006, 18(21): 2209-2211.
- [7] Kawakami H, Yoshida E, Miyamoto Y. Auto bias control technique based on asymmetric bias dithering for optical QPSK modulation [J]. J. of Lightwave Technol., 2012, 30(7): 962-968.
- [8] 李向华. 大动态范围微波光子链路的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015: 21-22.
- Li Xianghua. Research on the high dynamic range microwave photonic links [D]. Nanjing: Southeast University, 2015: 21-22.

作者简介:

兰 枫(1984—),男,硕士,工程师,主要从事空间激光通信载荷研究。

螺旋布设光纤光栅的软体操作器形状传感方法

朱伟涛¹, 孙广开^{1,2*}, 何彦霖¹, 孟凡勇¹

(北京信息科技大学 1. 北京市光电测试技术重点实验室; 2. 光电测试技术及仪器教育部重点实验室, 北京 100192)

摘要: 为实现微创手术软体操作器弯曲伸缩运动时的形状测量,提出一种螺旋布设光纤光栅形状传感方法。不同于传统的直线形布设方法,螺旋形布设方法可以防止软体操作器弯曲伸缩运动时,光纤光栅的折断、脱胶现象发生。理论分析了螺旋布设光纤光栅的传感原理及弯曲变形的重构算法;制备了光纤光栅沿螺旋形布设在软体操作器表面的试样;搭建了软体操作器弯曲变形的实验系统;实验分析了软体操作器在不同弯曲状态下,螺旋布设光纤光栅中心波长漂移量与弯曲角度间的变化规律,并重构出软体操作器的变形形状。实验结果表明:螺旋布设光纤光栅在软体操作器中不同位置的灵敏度最大为 $7.1 \text{ pm}/(^{\circ})$,软体操作器弯曲角度实际测量值与理论重构值间的最大误差不足 4.29% 。螺旋形光纤传感方法可用于软体操作器形状传感与重构。

关键词: 软体操作器;螺旋布设;光纤光栅;形状传感

中图分类号: TN253 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0889-07

Shape Sensing Method of Soft Manipulator Based on Fiber Grating with Spiral Layout

ZHU Weitao¹, SUN Guangkai^{1,2}, HE Yanlin¹, MENG Fanyong¹

(1. Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Measurement Technology; 2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, CHN)

Abstract: In order to measure the shape of a minimally invasive surgical soft manipulator when it is flexing and stretching, a shape sensing method based on spirally arranged fiber grating is proposed. Unlike the traditional linear layout method, the spiral layout method can prevent the fiber grating from breaking and degumming when the soft manipulator flexes. The sensing principal of spirally arranged fiber grating and the reconstruction algorithm of bending deformation are analyzed theoretically. The sample of fiber grating placed on the surface of the soft manipulator along the spiral is prepared, and the experimental system for bending deformation of the soft manipulator is established. The variation of the center wavelength drift and bending angle of spirally arranged fiber grating under different bending conditions is analyzed experimentally, and the deformation shape of the soft manipulator is reconstructed. The experimental results show that the maximum sensitivity of the spirally arranged fiber grating in different positions of the soft manipulator is $7.1 \text{ pm}/(^{\circ})$, and the maximum error between the actual measured value of the bending angle of the soft manipulator and the theoretical reconstruction value is less than 4.29% . The helical optical fiber sensing method can be used for the shape sensing and reconstruction of soft manipulators.

收稿日期:2020-08-12.

基金项目:国家自然科学基金项目(61903041);高等学校学科创新引智计划项目(D17021).

*通信作者:孙广开

E-mail: guangkai.sun@buaa.edu.cn

Key words: soft manipulator; spiral layout; fiber grating; shape sensing

0 引言

软体机器人是指由软体材料和柔顺、灵活、兼容的驱动方式构成,能够在非结构化的环境中更安全地交互,并处理不确定的、动态的任务,实现对未知对象的抓取和操作等动作的机器人^[1]。与传统的刚性机器人不同,软体机器人可以通过简单的控制方法主动和被动地改变其形状,从而实现安全、稳健和有效的交互。同时,因其固有的合规性,易于制造和实现的特点、简单的输入和复杂的输出,使软体机器人很受欢迎^[2]。基于上述特点,软体机器人在复杂、不可预测、具有挑战性的环境中具有很大的应用潜力,如医学、工业、救援及灾难应对等^[3]。

目前,软体机器人形状变形的测量方法主要包括:条纹投影测量法^[4]、传感贴片测量法^[5]、视觉测量方法^[6]等。相较于常规的测量方法,光纤传感测量方法有明显的特点和优势:1)光纤光栅结构简单、体积小、易加工、成本低、灵敏度高,更适用于软体机器人传感领域;2)柔性、灵活性,光纤光栅的形状可以随意改变,适用于软体机器人形状变形的测量;3)光纤光栅易于波分复用,从而易于实现多点传感测量^[7-9]。

国内外学者在光纤形状传感方面已经开展了一定的研究工作。Noh等^[10]设计了柔性机械手三轴力传感器,采用环形中空结构允许机械手各臂段之间的光纤连接,在流体腔室的周围布设光纤光栅,易于实现柔性机械手的弯曲变形传感。该方法主要针对刚性结构的形状监测,不适用于软体材料形状传感方面的研究。Ge等^[11]提出一种基于偏心嵌入式光纤光栅的双向软硅曲率传感器,能够区分弯曲曲率和弯曲方向。双向软硅曲率传感器的灵敏度高达 1.64 pm/m^{-1} ,其曲率测量范围最大为 $\pm 80 \text{ m}^{-1}$ 。Duncan等^[12]利用光纤光栅传感阵列,建立了能够重构三维形状的测量系统,其测量误差不大于 1.2% 。曲道明等^[13]根据贴敷在机翼表面的柔性蒙皮中光纤光栅传感器测量的曲率信息,重构出机翼的三维形状,其柔性蒙皮样品灵敏度为 28.7 pm/m^{-1} ,测量曲率范围不小于 25 m^{-1} 。钱晋武等^[14]利用光纤光栅阵列组成应变测量传感器,根据采集的中心波长漂移量、应变信息,实现渐进式内窥镜变形形状的监测与重建。娄小平等^[15]利用光纤光栅传感阵列构建传感器网络,提出了具有温度补偿功能的非正交光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)

的柔杆空间形状传感测量方法。2018年本课题组的高东等^[16]提出了植入式光纤光栅的柔性传感方法,将光纤光栅沿直线植入软体操作器中,利用3次样条插值等算法实现了软体操作器的变形形状重建。但该布设方法的光纤光栅不适宜承受较大的弯曲伸缩运动,且易出现折断、脱胶现象。

基于以上存在的问题,本文提出了一种螺旋布设光纤光栅的软体操作器形状传感方法,并验证其可行性。在软体操作器模型表面以螺旋方式布设光纤光栅,分析并验证光纤光栅的反射光谱特征及其变化规律,并根据软体操作器在不同弯曲角度下的波长漂移量与曲率信息,重构出其三维形状。

1 螺旋布设光纤光栅传感重构算法

1.1 弯曲变形传感模型

所采用的传感器为FBG传感器,根据模式耦合理论,当宽带光在FBG中传输时,满足布拉格波长条件的波被反射,反射光的中心波长 λ_B 满足如下公式:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \cdot \Lambda \quad (1)$$

式中, λ_B 为布拉格光栅的中心波长, n_{eff} 为光纤的有效折射率, Λ 为光栅周期。当光纤光栅所处环境中的应变、温度发生变化时,光纤光栅的有效折射率 n_{eff} 和光栅周期 Λ 也会改变,从而导致FBG的中心波长 λ_B 发生变化。关系式对应如下:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \cdot \Lambda = 2n_{\text{eff}}(\epsilon, T) \cdot \Lambda(\epsilon, T) \quad (2)$$

在忽略温度变化的影响下,FBG波长漂移只受应变的影响。FBG在拉伸或压缩作用下,即只受轴向应变 ϵ 时,光栅周期 Λ 随之发生变化,有效折射率 n_{eff} 受轴向应变 ϵ 的影响较小,此时中心波长 λ_B 会产生漂移,漂移量为 $\Delta\lambda_B$,可以用如下关系式表示:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\epsilon \quad (3)$$

式中, P_e 为光纤的有效弹光系数,约为 0.216 , $\Delta\lambda_B$ 为光纤光栅中心波长漂移量。

本文提出了一种螺旋布设FBG的方法,将光纤沿着一定倾角,并以螺旋缠绕的方式布设在软体操作器的表面,在忽略扭转的情况下,其弯曲变形传感模型如图1所示,软体操作器模型上红色标出的4个部分为螺旋布设的FBG传感器。

假设软体操作器模型的初始长度为 H ,底面半径为 r ,光纤的缠绕圈数为 n ,则将光纤展开,可以得到一个直角三角形,其底边为 $n2\pi r$,高为 H ,设

光纤的总长度为 L ，则由勾股定理可以得：

$$L = \sqrt{(n2\pi r)^2 + H^2} \quad (4)$$

软体操作器发生弯曲变形时，认为各点的曲率变化一致，其底端固定，力作用点在其顶端。高度方向的变化量为 h ，光纤展开后的倾斜角为 θ_1 ，则光纤变化后的长度 L_ϵ 可以表示为

$$L_\epsilon = \frac{H-h}{\sin \theta_1} \quad (5)$$

高边的长度 $L_{DE} = H-h$ ，可以由弯曲角度 θ 来计算，公式为

$$\frac{H-h}{\sin \theta} \cdot \frac{\pi \theta}{180} = H \quad (6)$$

即：

$$H-h = \frac{180H \sin \theta}{\pi \theta} \quad (7)$$

联立并整理式(5)和(7)，可以得出光纤栅区受到的应变与弯曲角度之间的关系为

$$\epsilon = \frac{L_\epsilon - L}{L} = \frac{\frac{180H \sin \theta}{\pi \theta \sin \theta_1} - L}{L} \quad (8)$$

即：

$$\epsilon = \frac{180H \sin \theta}{L \pi \theta \sin \theta_1} - 1 \quad (9)$$

从式(9)可以得出，光纤的应变与光纤的长度、试样的长度、光纤展开后的倾斜角和弯曲角度有关。而由式(3)可知，FBG传感器的中心波长漂移量与应变之间成线性关系，那么则有：

$$\Delta \lambda \propto \frac{180H \sin \theta}{L \pi \theta \sin \theta_1} - 1 \quad (10)$$

由式(10)分析可知，在一定的角度范围内，螺旋布设FBG传感器的中心波长漂移量与弯曲角度呈正增长关系，且随着弯曲角度的增大，螺旋布设FBG传感器的中心波长漂移量也逐渐增大。

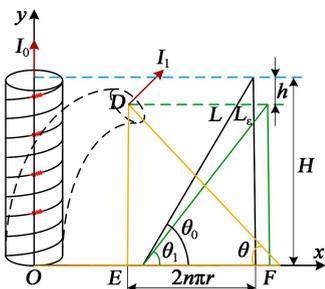


图1 螺旋布设光纤光栅传感原理

1.2 弯曲变形重构算法

重构算法是依据FBG对空间曲率的传感测量，

并建立弯曲变形重构的数学模型。在该模型中，得到的曲率值可以用于计算测量点的坐标，通过插值运算，由多个点可以拟合成一条曲线^[17]。弯曲变形重构原理如图2所示。

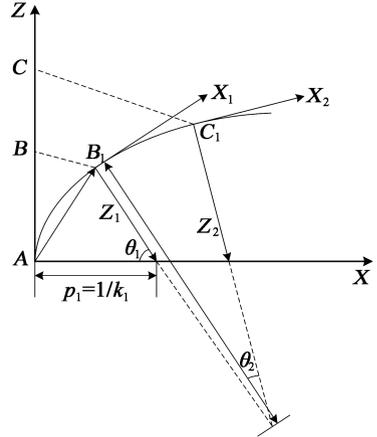


图2 弯曲变形重构原理示意图

如图2，建立XAZ运动坐标系，Z轴方向为初始方向，软体操作器原始状态用直线AC表示。假设软体操作器弯曲变形后，沿曲线 AB_1C_1 的方向以自由的姿态进行弯曲，点 B_1, C_1 分别由点 B, C 平移旋转得到。根据微分学的概念，将曲线 AB_1C_1 分成若干段，每段长度均为 S ，即 $AB_1=B_1C_1=S$ 。在各段圆弧长度相等的情况下，分别以点 B_1 和 C_1 为原点，在其切线方向下建立 $X_1B_1Z_1$ 坐标系和 $X_2C_1Z_2$ 坐标系。根据数学公式计算，可以由曲率 k_1, k_2 求得旋转角 θ_1, θ_2 。然后再根据几何关系，在XAZ坐标系中可以求出 B_1 的坐标 $((1 - \cos \theta_1)/k_1, \sin \theta_1/k_1)$ ，然后将坐标系沿向量 AB_1 平移旋转至坐标系 $X_1B_1Z_1$ ，在坐标系 $X_1B_1Z_1$ 中求出点 C_1 的坐标 $(\sin \theta_2/k_2, (1 - \cos \theta_2)/k_2)$ ，以此类推。坐标平移旋转矩阵公式为

$$N = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & (1 - \cos \theta)t_x + t_y \sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta & (1 - \cos \theta)t_y + t_x \sin \theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中， t_x, t_y 为坐标平移时横纵坐标的平移量，平移旋转后的坐标值公式为

$$\begin{bmatrix} x^* \\ y^* \\ 1 \end{bmatrix} = N \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

由以上公式可知，根据离散的曲率点信息，通过平移旋转矩阵公式求出其余点的坐标，再利用插值

函数对这些离散的坐标点进行插值运算,重建软体操作器模型,即可实现软体操作器的可视化。

2 实验装置与试样

2.1 弯曲变形传感实验装置

图3为软体操作器弯曲变形实验系统原理图,其中包括光纤传感部分、软体操作器模型、光纤解调部分、模型重构部分。该系统主要包括4个螺旋布设FBG传感器、1个宽带光源、1个耦合器、1台光谱仪和1台装有重构软件的上位机。

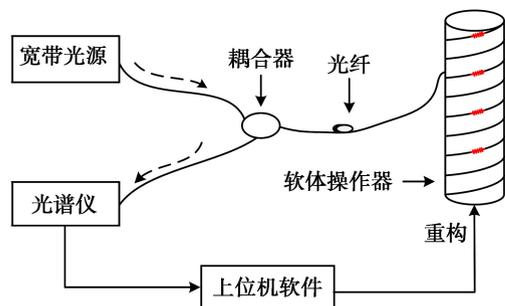


图3 实验原理图

由宽带光源发出的光信号经过耦合器入射到FBG传感器内,位移平台推动软体操作器使其发生弯曲变形,根据FBG的波长选择通过性,满足布拉格条件的波长被反射回到光谱仪中,记录光谱仪中的反射光谱数据。

FBG采用紫外曝光技术的刻写方式,在同一根光纤上刻写4个波长不同的光栅,栅区长度为10 mm。同时,确保FBG的中心波长可避免波长漂移后波峰交叉、重叠,导致反射谱无法解调的问题。4个FBG的初始中心波长分别为:1 531.025 0, 1 534.756 3, 1 538.675 0和1 542.368 8 nm。

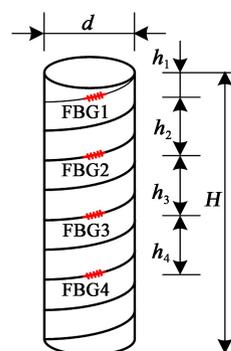
光谱仪型号为YOKOGAWAAQ6370C,解调范围为600~1 700 nm,最高波长分辨率可达20 pm,功率测量最低范围为-90 dBm。

2.2 软体操作器试样

软体操作器模型的制造流程可分为以下4步:(1)利用3D打印技术完成模具制作。模具1内表面为螺旋形,内径为25 mm,螺纹深度为1 mm;模具2为内表面没有螺纹的圆筒形模具,即是光纤封装模具,内径为28 mm;(2)采用Ecoflex-0050硅胶按照1:1的比例将A,B溶液倒入烧杯中,并沿同一个方向搅拌均匀,防止溶液产生气泡。将搅拌后的溶液倒入密封好的模具1中,室温下固化24 h后

开模;(3)沿着螺旋形表面布设FBG传感器,并将光纤两端用6800强力速干胶固定;(4)将螺旋布设FBG传感器后的模型放置于模具2中,在其表面覆盖与软体操作器模型同样材质的硅胶溶液,并在室温下再次固化24 h,形成FBG传感器的保护层,即封装。

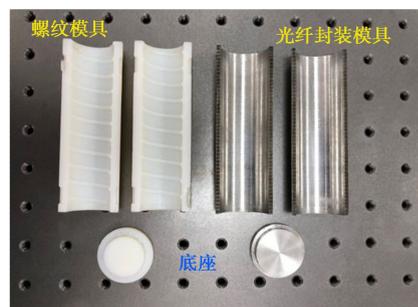
这种方法可避免传统的胶水封装,可以更好地保护光纤光栅传感器的性能。同时,该粘接剂与光纤光栅的耦合性比较高,不仅可以增加传感器的寿命,还可以抑制传感器的零点漂移特性。螺旋布设FBG的软体操作器试样如图4所示。



(a) 螺旋布设FBG示意图



(b) 软体操作器试样实物图



(c) 模具实物图

图4 软体操作器模型

由图4(a)可知,软体操作器试样的长度为 $H=100$ mm,直径 $d=28$ mm,FBG传感器的编号从上至下依次为FBG1,FBG2,FBG3,FBG4,其中 $h_1=10$ mm, $h_2=30$ mm, $h_3=50$ mm, $h_4=70$ mm,其中红色部分即代表螺旋布设光纤光栅在软体操作器中的位置。

3 实验分析与讨论

3.1 弯曲角度测量方法

弯曲角度的测量原理如图5所示：假设软体操作器水平放置，将操作器的中心线记为 x 轴，垂直于操作器中心线的方向记为 y 轴，建立直角坐标系 xOy 。当操作器发生弯曲时，取其不同状态下的顶点 M_0, M_1, M_2 和 M_3 ，并作切线 I_0, I_1, I_2 和 I_3 ，过顶点 M_1, M_2 和 M_3 作垂线交 y 轴于点 N_1, N_2 和 N_3 ，将不同弯曲状态下的角度记为 β_1, β_2 和 β_3 ，以此方法计算弯曲角度^[16]。根据摄像机拍摄的图片，计算软体操作器在不同弯曲状态下的角度值。

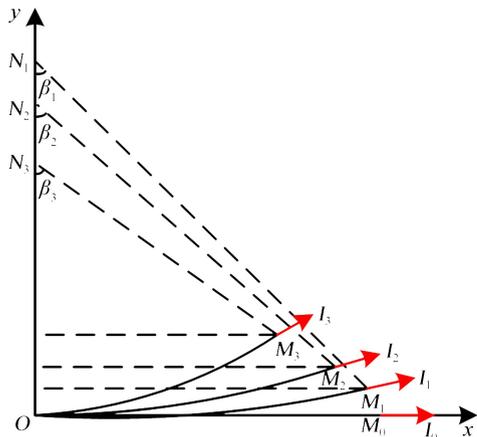


图5 弯曲角度测量原理示意图

3.2 弯曲变形传感实验

所采用的实验系统如图6所示，软体操作器的底端固定在位移平台的工装夹具上。同时，保证在实验过程中，软体操作器内的FBG传感器位于弯曲变形时的外侧，即离位移平台近的一侧。在实验时，位移平台推动软体操作器移动，导致其弯曲变形，进而造成FBG传感器中心波长的漂移，并利用摄像机记录软体操作器的弯曲状态，以便后续分析其弯曲角度。为了减小操作中造成的随机误差，需进行多次重复性实验，以确保实验数据的可靠性。为了验

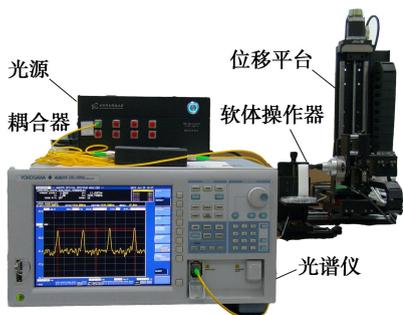
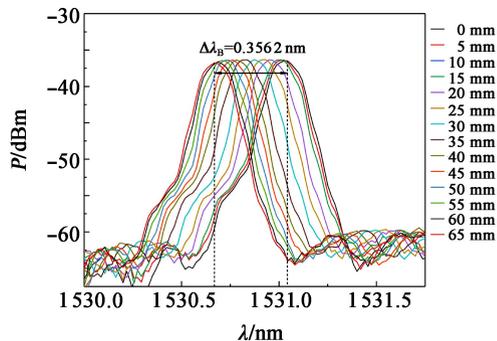


图6 实验装置实物图

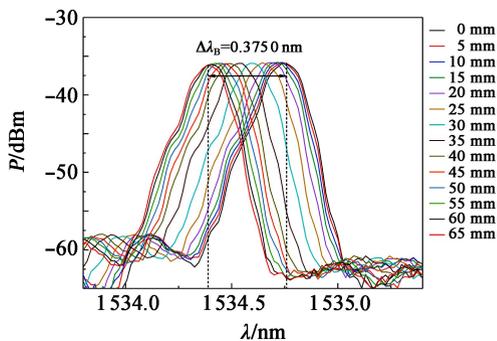
证螺旋布设FBG可以应用于软体操作器的形状感知，测量了软体操作器不同弯曲状态下的螺旋布设FBG的反射谱特性。

在实验过程中，利用光谱仪采集FBG传感器反射谱数据，将四个反射峰在各自的波长范围内提取出来，并绘制成光谱图。4个螺旋布设FBG在不同位移下的波长漂移光谱图如图7所示。

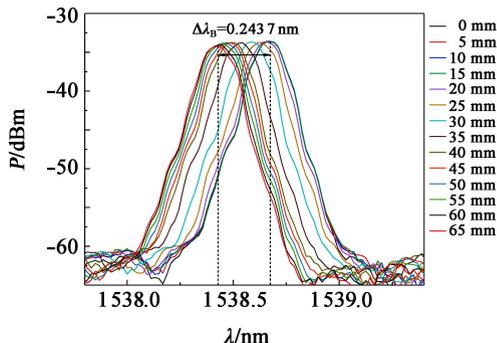
由图7可知，FBG传感器的中心波长随着位移平台的位移增大向着波长减小的方向漂移。由此可以推断，FBG传感器在软体操作器弯曲过程中处于压缩的状态，设FBG传感器中心波长减小的方向为正方向。记录4个FBG在不同弯曲状态下的峰值，计算其波长漂移量，并将4个FBG中心波长漂移情况记录在一起，对比4个FBG在软体操作器中不同位置的灵敏度。



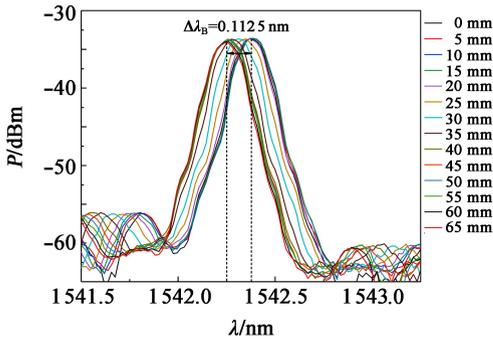
(a) FBG1 波长漂移



(b) FBG2 波长漂移



(c) FBG3 波长漂移



(d) FBG4 波长漂移

图7 4个FBG在不同位移下的波长漂移

图8所示为螺旋布设光纤光栅的中心波长漂移量与弯曲角度之间的变化关系。由分析可知,螺旋布设FBG的中心波长漂移量随着弯曲角度的增大而增大,其中FBG1,FBG2,FBG3的曲线增势大致相同,呈近似线性增长。但是,螺旋布设FBG在软体操作器中不同位置的灵敏度不同。由实验数据分析可得,4个螺旋布设FBG对应的灵敏度分别为6.8,7.1,5.2和4.4 pm/(°),其中FBG2的灵敏度最大。由分析可知,软体操作器中上部位置的弯曲变形量较大,适合FBG传感器的布设。当软体操作器弯曲角度大于26°之后,螺旋布设FBG的中心波长漂移量增大趋势变缓。其中,当FBG4在软体操作器弯曲角度大于37°之后,其中心波长漂移量不再变化,曲线呈水平状态,这是因为软体操作器底端固定,限制了软体操作器下半部分的弯曲变形。这表明螺旋布设FBG的灵敏度大小与传感位置有着密切关系。

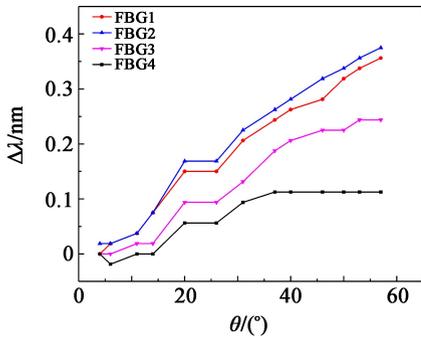


图8 波长漂移量与弯曲角度之间的关系

3.3 弯曲变形重构

通过对操作器的弯曲状态建立运动坐标系,根据4个FBG测量点的中心波长漂移量及弯曲角度信息,进而计算弯曲曲率,并求出测量点的坐标,再进行插值运算,从而完成软体操作器的三维形状重

建。取软体操作器在4种不同弯曲状态下的重构图,如图9所示。

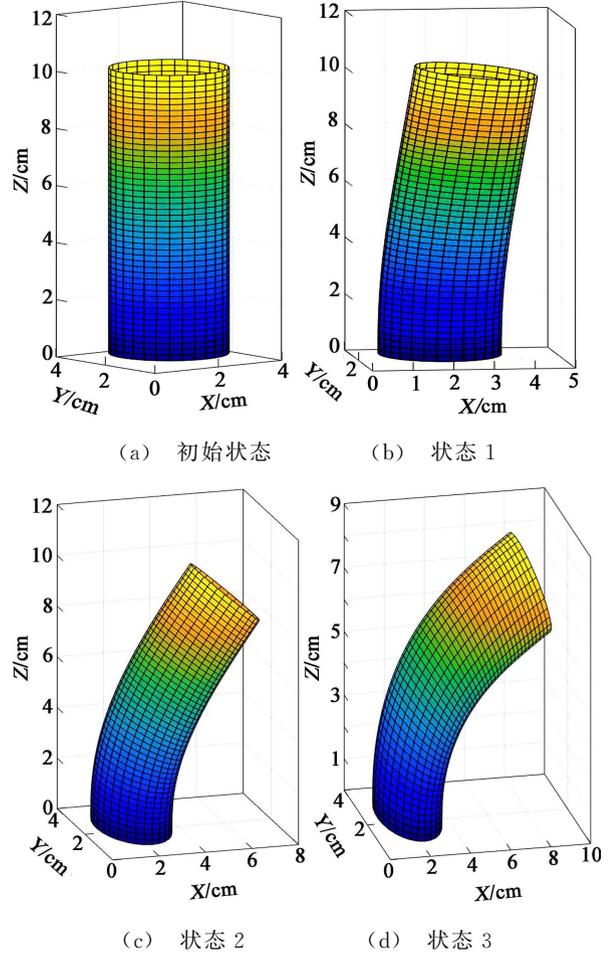


图9 不同弯曲状态下的软体操作器三维重构模型

通过将软体操作器弯曲变形时的实际测量值与软体操作器在不同弯曲状态下的重构结果进行比较,如表1所示,可得软体操作器的实际测量值与重构值之间的最大误差值为4.29%。由此表明本文所提出的螺旋布设光纤光栅的方法适用于软体操作器的弯曲形状传感测量。

表1 三种弯曲状态下的重构误差分析

弯曲状态	状态1	状态2	状态3
实际值/(°)	14.0	37.1	53.6
重构值/(°)	13.4	36.3	51.8
误差/%	4.29	2.16	3.36

4 结论

(1)针对软体操作器弯曲伸缩运动时的形状传感问题,提出了一种螺旋布设光纤光栅的传感方法,并验证了其可行性。

(2)验证了螺旋布设光纤光栅的软体操作器的弯曲形状传感特性,实验结果表明:在软体操作器的不同位置上螺旋布设光纤光栅的灵敏度最大为 $7.1\text{ pm}/(^{\circ})$,软体操作器三维变形形状的重构误差不大于 4.29% 。

(3)螺旋型光纤传感方法在软体操作器形状传感方面具有广阔的应用前景,并可延伸应用于微创手术、康复机器人等领域。

参考文献:

- [1] Laschi C, Mazzolai B, Cianchetti M. Soft robotics: Technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities[J]. *Science Robotics*, 2016, 1(1): eaah3690.
- [2] Pfeifer R, Lungarella M, Iida F. The challenges ahead for bio-inspired “soft” robotics[J]. *Commun. of the ACM*, 2012, 55(11): 76.
- [3] Ranzani T, Gerboni G, Cianchetti M, et al. A bioinspired soft manipulator for minimally invasive surgery[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2015, 10(3): 035008.
- [4] Tao T, Chen Q, Da J, et al. Real-time 3-D shape measurement with composite phase-shifting fringes and multi-view system[J]. *Opt. Express*, 2016, 24(18): 20253.
- [5] Huang Y R, Kuo S A, Stach M, et al. A high sensitivity three-dimensional-shape sensing patch prepared by lithography and inkjet printing[J]. *Sensors*, 2012, 12(12): 4172-4186.
- [6] Wang Y, Negahdaripour S, Avkin M D. Calibration and 3D reconstruction of underwater objects with non-single-view projection model by structured light stereo imaging[J]. *Appl. Opt.*, 2016, 55(24): 6564.
- [7] 刘铁根, 王双, 江俊峰, 等. 航空航天光纤传感技术研究进展[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(8): 1681-1692.
- Liu Tiegen, Wang Shuang, Jiang Junfeng, et al. Advances in optical fiber sensing technology for aviation and aerospace application[J]. *Chinese J. of Scientific Instrument*, 2014, 35(8): 1681-1692.
- [8] 徐国权, 熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. *中国光学*, 2013, 6(3): 306-317.
- Xu Guoquan, Xiong Daiyu. Application of fiber Bragg grating sensing technology in engineering[J]. *Chinese Opt.*, 2013, 6(3): 306-317.
- [9] 常天英, 李东升, 隋青美, 等. 光纤光栅传感技术在分岔隧道模型中的实验研究[J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(1): 103-108.
- Chang Tianying, Li Dongsheng, Sui Qingmei, et al. Experiment research of fiber grating sensor in the forked tunnel model[J]. *Chinese J. of Scientific Instrument*, 2008, 29(1): 103-108.
- [10] Nor Y, Sareh S, Back J, et al. A three-axial body force sensor for flexible manipulators[C]// *Proc. of IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation*, 2014: 6388-6393.
- [11] Ge J, James A E, Xu L, et al. Bidirectional soft silicone curvature sensor based on off-centered embedded fiber Bragg grating[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2016, 28(20): 2237-2240.
- [12] Duncan R G, Froggatt M E, Kreger S T, et al. High-accuracy fiber-optic shape sensing [C]// *Proc. of Inter. Symp. on: Smart Structures & Materials & Nondestructive Evaluation & Health Monitoring*, 2007: 65301s-11.
- [13] 曲道明, 孙广开, 李红, 等. 变形机翼柔性蒙皮形状光纤传感及重构方法[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(1): 144-151.
- Qu Daoming, Sun Guangkai, Li Hong, et al. Optical fiber sensing and reconstruction method for morphing wing flexible skin shape[J]. *Chinese J. of Scientific Instrument*, 2018, 39(1): 144-151.
- [14] 钱晋武, 郑庆华, 张伦伟, 等. 渐进式内窥镜形状的感知和重建[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(5): 518-524.
- Qian Jinwu, Zheng Qinghua, Zhang Lunwei, et al. Deformation sensing and incremental shape reconstruction for intelligent colonoscope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(5): 518-524.
- [15] 娄小平, 陈仲卿, 庄炜, 等. 非正交FBG柔杆空间形状重构误差分析及标定[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(2): 386-393.
- Lou Xiaoping, Chen Zhongqing, Zhuang Wei, et al. Error analysis and calibration for FBG shape reconstruction based on non-orthogonal curvatures [J]. *Chinese J. of Scientific Instrument*, 2017, 38(2): 386-393.
- [16] 高东, 孟凡勇, 宋言明, 等. 植入光纤光栅的软体驱动器形状传感研究[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(2): 155-163.
- Gao Dong, Meng Fanyong, Song Yanming, et al. Research on the shape sensing of embedded fiber Bragg grating for soft actuator[J]. *Chinese J. of Scientific Instrument*, 2019, 40(2): 155-163.
- [17] 章亚男, 肖海, 沈林勇. 用于光纤光栅曲线重建算法的坐标点拟合[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(9): 2149-2157.
- Zhang Yanan, Xiao Hai, Shen Linyong. Coordinate point fitting in FBG curve reconstruction algorithm[J]. *Optical and Precision Engin.*, 2016, 24(9): 2149-2157.

作者简介:

朱伟涛(1995—),男,河南人,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感测量;

孙广开(1984—),男,河北人,2015年于北京航空航天大学并获博士学位,现为副教授,主要研究方向为飞行器监测技术和生物医学检测技术。

基于改进 Camshift 算法的 NAO 机器人目标跟踪

王立玲^{1,2*}, 单忠宇^{1,2}, 马 东^{1,2}, 王洪瑞¹

(1. 河北大学 电子信息工程学院, 河北 保定 071002;

2. 河北省数字医疗工程重点实验室, 河北 保定 071002)

摘要: 针对 Camshift 算法应用于 NAO 机器人目标跟踪过程中, 当目标受到相似颜色背景干扰或被物体遮挡时跟踪失败的问题, 提出一种基于 ORB 特征检测和 Kalman 滤波多算法结合的目标跟踪方法。首先检测目标 ORB 特征点初始化搜索窗口, 然后利用 Kalman 滤波作为目标运动状态的预测机制, 以预测的位置初始化 Camshift 算法。利用 Bhattacharyya 距离判断跟踪窗口的收敛性, 若受到背景干扰, 则利用 ORB 算法对当前帧中的 Kalman 预测区域和目标模型进行特征点匹配, 重新检测目标在视频帧中的位置。根据 Kalman 滤波预测目标被物体遮挡后可能的位置来更新预测器参数。实验结果表明, 改进的算法能够在相似颜色背景干扰和目标遮挡的复杂环境下, 连续稳定地跟踪运动目标。

关键词: 目标跟踪; 仿人机器人 NAO; Camshift; Kalman 滤波; ORB 特征点

中图分类号: TP391.4 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0896-06

NAO Robot Target Tracking Based on Improved Camshift Algorithm

WANG Liling^{1,2}, SHAN Zhongyu^{1,2}, MA Dong^{1,2}, WANG Hongrui¹

(1. College of Electronic and Information Engineering, Hebei University, Baoding 071002, CHN;

2. Key Laboratory of Digital Medical Engineering of Hebei Province, Baoding 071002, CHN)

Abstract: When Camshift algorithm is applied to target tracking of NAO robot, the tracking fails if the target is interfered by similar color background or blocked by objects. A target tracking method based on ORB feature detection and Kalman filter is proposed. Firstly, it is to detect the target ORB signature point and initialize the search window. Then Kalman filter is used as the prediction mechanism of target motion state to initialize Camshift algorithm with the predicted position. The Bhattacharyya distance is used to determine the convergence of the trace window. If background interference occurs, the ORB algorithm is used to match feature points between Kalman prediction area and target model in the current frame, and the position of the target in the video frame is redetected. According to Kalman filter, the possible position of the target after it is blocked by the object is updated. The experimental results show that the improved algorithm can continuously and stably track moving targets under the complex environment of similar color background interference and target occlusion.

Key words: target tracking; humanoid robot NAO; Camshift; Kalman filter; ORB feature points

收稿日期: 2020-09-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61703133); 国家重点研发计划项目(2017YFB1401200).

* 通信作者: 王立玲

E-mail: hbuszy@163.com

0 引言

目标检测与跟踪是图像处理和计算机视觉领域的一个重要研究课题,是很多上层应用实现的基础,已经被广泛应用于机器人、人机交互、视频监控等领域^[1]。Camshift(Continuous Adaptive Meanshift)是 Bradski^[2]提出的一种实时目标跟踪算法,它使用颜色直方图特征作为目标模型,由于目标图像直方图是颜色概率的统计,所以算法不容易受到目标形状变化的影响,而且算法使用梯度下降法减少计算时间,可以快速实现对目标的实时跟踪。

传统 Camshift 算法需要手动初始化搜索窗口进行目标跟踪,在单一颜色背景下具有较好的实时目标跟踪效果^[3]。但是 Camshift 算法在目标检测部分只使用目标颜色特征,而完全没有考虑目标的运动信息、纹理特征等其他因素,当目标和背景存在大面积相似颜色时,跟踪失败。在目标跟踪部分,虽然使用梯度下降法减少了计算时间,可以快速实现目标实时跟踪,但是 Camshift 算法本身没有对目标运动的预测机制,跟踪过程中当目标被物体遮挡而短暂消失时,跟踪会失败,即使当目标再次稳定出现在视野中,跟踪也无法恢复。

针对上述问题,很多研究者对 Camshift 算法进行了改进。Huang 等^[4]提出利用 Kalman 滤波算法来预测运动目标被遮挡时在当前帧中的位置。闫钧华等^[5]提出利用 Kalman 预测器解决目标发生短暂丢失再次出现后 Camshift 算法不能恢复跟踪的问题。利用卡尔曼滤波改进的 Camshift 算法具有良好的实时性,但当目标长时间处于相似颜色背景干扰或光照变化较大时,算法跟踪精度会明显下降。文献^[6]将 Camshift 算法与 SIFT(Scale-Invariant Feature Transform)算法相结合,提高了背景干扰情况下目标检测的能力。文献^[7]利用 FAST-SIFT 特征点检测结合 Camshift 算法,可以有效克服相似颜色的背景干扰。在此基础上,文献^[8-9]利用加速的鲁棒特征 SURF 和 Camshift 算法相结合进一步提高了算法的实时性。SURF 算法是 SIFT 算法的升级版,但是在较大图像中进行目标跟踪时,由于自身算法的复杂性,消耗时间长,仍然无法实现实时跟踪。

本文提出一种结合 ORB 特征点检测和 Kalman 滤波的多算法融合的目标跟踪算法。ORB 算法采用 FAST 算法获取特征点位置,在对同一幅

图像提取 1 000 个特征点的情况下,ORB 算法的计算速度是 SIFT 算法的 300 倍,是 SURF 算法的 14 倍,满足实时性需求^[10]。ORB 特征点与颜色信息无关,可以在相似颜色背景干扰时根据 ORB 算法重新计算目标位置。当目标被遮挡时利用 Kalman 预测器获得目标的可能位置。实验结果表明,本文算法能够连续稳定地跟踪运动目标。

1 Camshift 算法

Camshift 算法可以不断调整跟踪窗口大小自适应解决目标形变的问题。算法通过提取目标颜色直方图特征作为目标模型,利用梯度下降法减少计算时间,可以快速实现实时目标跟踪。

Camshift 算法的实现步骤如下:

(1)得到一帧 RGB 图像,将其转换到 HSV 色彩空间,提取 H 通道分量;

(2)手动给定搜索窗口位置,计算感兴趣区域色彩直方图;

(3)根据目标直方图对输入图像进行反向投影计算,根据概率分布图 $I(i, j)$ 得到零阶矩:

$$M_{00} = \sum_x \sum_y I(x, y) \quad (1)$$

一阶矩:

$$M_{10} = \sum_x \sum_y xI(x, y) \quad (2)$$

$$M_{01} = \sum_x \sum_y yI(x, y) \quad (3)$$

然后根据

$$x_c = \frac{M_{10}}{M_{00}}, \quad y_c = \frac{M_{01}}{M_{00}} \quad (4)$$

计算候选区域的目标质心点坐标 (x_c, y_c) ;

(4)将跟踪窗口中心点位置 (x_0, y_0) , 移动到目标质心点位置 (x_c, y_c) , 判断是否收敛。若不收敛,则返回步骤(3)根据新的搜索窗口位置重新定义零阶矩和一阶矩,再次计算质心点位置。若收敛,则将搜索窗口中心点位置移到质心点位置,并将当前候选区域作为目标区域进行更新,继续迭代直到结束。

2 改进的 Camshift 算法

改进算法由 ORB 特征点检测、Kalman 滤波和 Camshift 跟踪三部分组成,可实现在相似颜色背景干扰和遮挡场景下目标的连续稳定跟踪。

2.1 ORB 算法

Rublee 等^[11]提出的 ORB 算法,根据 FAST

(Features from Accelerated Segment Test)快速特征提取算法和 BRIEE(Binary Robust Independent Elementary Features)二进制特征描述子,实现目标检测。FAST 算法^[12]是一种迅速、有效的特征点检测算法,其核心是基于像素与其邻域的灰度值差值进行检测。

ORB 特征点不受颜色信息干扰,在获取目标的过程中,首先提取 Kalman 预测区域和目标模板 ORB 特征点,从而减小 ORB 算法处理的图像尺寸。然后利用 BFknn 算法根据特征描述子对目标模板和测试图像的特征点进行匹配计算,利用 RANSAC 算法优化匹配结果。最后在测试图像上根据特征点坐标画出包含所有最优匹配点的最小轮廓,作为初始搜索窗口位置。ORB 算法跟踪效果如图 1 所示。

从图 1 可以看出,在受到相似颜色背景干扰时,利用 ORB 算法能够准确得到目标的位置。



图 1 ORB 算法跟踪效果图

2.2 Kalman 预测器

Kalman 滤波是 20 世纪 60 年代末提出的一种系统最优估计算法^[13],能够根据当前帧中的目标位置预测下一帧中目标的可能位置。算法的核心是根据输入系统的观测值更新状态向量^[14],将预测值作为滤波器的输出。假设系统状态向量由 \hat{X}_k 表示,那么 $\hat{X}_k = [x_k, y_k, v_{kx}, v_{ky}]^T$, x_k 和 y_k 代表运动目标质心的坐标, v_{kx} 和 v_{ky} 分别表示运动目标在 x 轴和 y 轴方向上的运动速度。定义系统的观测状态向量为 $Z_k = [x_k, y_k]^T$ 。实验过程中通过 NAO 机器人的摄像头获取视频图像,因为相邻帧之间的时间间隔 Δt 极短而且目标移动的距离很小。所以实验中近似地认为相邻两帧之间的目标是匀速直线运动的。

得到方程如下:

$$\begin{cases} x_k = x_{k-1} + \Delta t \cdot v_x \\ y_k = y_{k-1} + \Delta t \cdot v_y \\ v_x = v_{kx} \\ v_y = v_{ky} \end{cases} \quad (5)$$

定义系统状态转移矩阵 A 和系统观测矩阵 H :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

定义它们的协方差矩阵分别为 Q 和 R :

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

初始状态变量为 X_0 ,假设预测的目标位置在 x 轴和 y 轴方向上都与实际目标位置有 4 个像素的偏差,目标位置变化速度有 7 个像素的偏差。初始误差协方差矩阵 P_0 为

$$P_0 = \begin{bmatrix} 4^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 7^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.3 Camshift 算法的改进

本文改进算法利用 ORB 特征点进行目标检测,首先对目标模型和输入视频帧进行 ORB 特征点提取,使用 BFknn 算法匹配计算运动目标在视频帧中的位置,利用 RANSAC 算法对匹配结果进行优化。将匹配获得的目标位置作为初始搜索窗口,解决 Camshift 算法手动初始化问题。ORB 算法目标检测流程如图 2 所示。

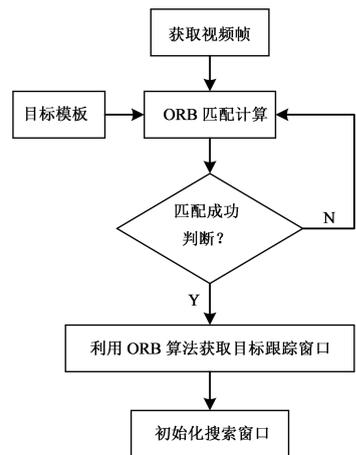


图 2 ORB 算法目标检测流程图

两种实验场景:相似颜色背景干扰实验和目标遮挡实验,图像中用绿色矩形框选定目标。通过与传统 Camshift 算法进行对比实验,从定性和定量两个方面进行分析。

场景一:相似颜色背景干扰实验。图 5 和 6 分



图 5 传统 Camshift 算法跟踪结果图

本文改进算法的跟踪结果如图 6 所示:当运动目标接近相似颜色干扰物体时,通过判断跟踪窗口的收敛性,改进算法对 Kalman 预测的位置区域进



图 6 本文改进算法跟踪结果图

场景二:目标遮挡实验。图 7 和图 8 分别选择视频序列中的第 37 帧、42 帧、48 帧、54 帧、68 帧作为对比帧。传统 Camshift 算法的跟踪结果如图 7 所示:在运动目标跟踪过程中,当目标靠近白色上衣黑色短裤的遮挡物体时,跟踪窗口发生漂移,当目标被完全遮挡后跟踪窗口拾取了遮挡物体并固定在一个很小的区域,即使目标重新出现也不能恢复跟踪。



图 7 传统 Camshift 算法跟踪结果图



图 8 本文改进算法跟踪结果图

别选择视频序列中的第 31 帧、42 帧、48 帧、53 帧、65 帧作为对比帧。传统 Camshift 算法的跟踪结果如图 5 所示:当运动目标接近相似颜色干扰物体时,发现跟踪窗口跟踪区域扩大,包含大面积的干扰背景部分,并一直干扰跟踪过程,导致跟踪不准确。

行 ORB 特征点检测,重新确定目标位置,很好地限制跟踪窗口的位置,解决相似颜色背景干扰,实现稳定的目标跟踪。

本文改进算法的跟踪结果如图 8 所示:当目标靠近白色上衣黑色短裤遮挡物体时,跟踪窗口能够继续跟踪目标,当目标被完全遮挡后,虽然此时得不到 Camshift 算法返回的质心位置,但是可以利用 Kalman 预测器来预测目标位置,实现目标再次出现后对目标的继续稳定跟踪。

为了对两种算法的跟踪效果进行定量分析,实验中通过获取图像帧中目标真实的中心点位置值(I)和目标中心点测量值(I'),并比较两者的位置误差 $d = \sqrt{(I_x - I'_x)^2 + (I_y - I'_y)^2}$,来表示跟踪效果。 d 的值越小,表示跟踪精度越高,反之精度越低。

场景一相似颜色背景干扰情况下中心点误差如图 9 所示。场景二目标遮挡情况下中心点误差如图 10 所示。实验结果表明,在发生相似颜色背景干扰或目标遮挡情况时,本文改进的 Camshift 算法的中心点位置误差始终保持在一个较小水平,保证搜索窗口较好地收敛于目标区域。两种场景下跟踪结果均优于传统 Camshift 算法。

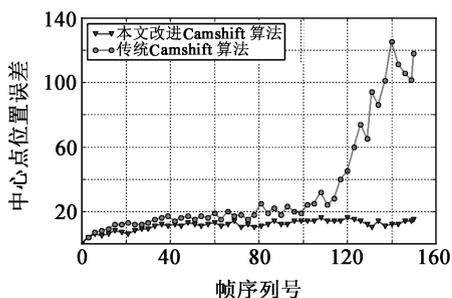


图 9 相似颜色背景干扰误差图

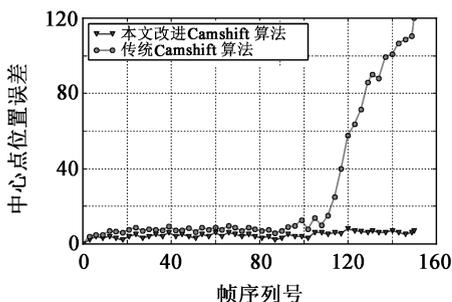


图 10 目标遮挡误差图

4 总结

目标检测与跟踪技术已经广泛应用于机器人家庭服务、监测等领域。单一颜色背景下 Camshift 算法具有较好的实时跟踪效果。在此基础上,本文提出结合 ORB 特征点检测和 Kalman 预测的改进算法,并将其应用于机器人运动目标跟踪。首先利用 ORB 特征点检测目标在视频帧中的位置初始化搜索窗口,当发生相似颜色背景干扰导致跟踪失败时,利用 ORB 算法重新确定运动目标的位置,有效降低了相似颜色背景的干扰。当目标被物体遮挡消失后,利用 Kalman 滤波预测目标的可能位置,实现在目标重新出现在视野中时继续对其跟踪。实验结果

表明,本文改进算法在相似颜色背景干扰和目标遮挡等复杂环境下,能够连续稳定地跟踪运动目标位置,实验结果优于传统 Camshift 算法。

参考文献:

- [1] 孟 球, 杨 旭. 目标跟踪算法综述[J]. 自动化学报, 2019, 45(7): 1245-1260.
Meng L, Yang X. Overview of target tracking algorithms[J]. J. of Automation, 2019, 45(7): 1245-1260.
- [2] Bradski G R. Computer vision face tracking for use in a perceptual user interface[J]. Intel Technol. J., 1998, 2(2): 1-15.
- [3] Chen Xin, Wu Hefeng, Li Xiang, et al. Real-time visual object tracking via Camshift-based robust framework [J]. Intern. J. of Fuzzy Systems, 2012, 14(2): 262-269.
- [4] Huang Shengluan, Hong Jingxin. Moving object tracking system based on Camshift and Kalman filter[C]// Proc. of Inter. Conf. on Consumer Electronics, Communications and Networks, 2011: 1423-1426.
- [5] 闫钧华, 陈少华, 艾淑芳. 基于 Kalman 预测器改进的 Camshift 目标跟踪[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(4): 537-542.
Yan J H, Chen S H, Ai S F. Improved Camshift target tracking based on Kalman predictor[J]. Chinese J. of Inertial Technol., 2014, 22(4): 537-542.
- [6] Qiu Xuena, Lu Qiang. Target tracking and localization of binocular mobile robot using Camshift and SIFT[C]// Proc. of Genetic and Evolutionary Computation Conf., 2009: 483-488.
- [7] Xiao Xuzhang, Wang Jing, Shen Qiwei, et al. An improved Camshift algorithm based on FAST-SIFT feature detection matching [C]// Proc. of Inter. Conf. on Information Communication and Signal Proc., 2018: 64-68.
- [8] Li Jianhong, Zhang Ji, Zhou Zhenhuan, et al. Object tracking using improved Camshift with SURF method[C]// Proc. of Inter. Workshop on Open-source Software for Scientific Computation, 2011: 136-141.
- [9] 陈杏源, 郑烈心, 裴海龙. 基于 Camshift 和 SURF 的目标跟踪系统[J]. 计算机工程与设计, 2016, 37(4): 902-905.
Chan X Y, Zheng L X, Pei H L. Object tracking system based on Camshift and SURF[J]. Computer Engineering and Design, 2016, 37(4): 902-905.
- [10] 高 翔, 张 涛. 视觉 SLAM 十四讲: 从理论到实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017: 132-138.
Gao Xiang, Zhang Tao. Visual SLAM 14: From Theory to Practice [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2017: 132-138.
- [11] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, et al. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF[C]// Proc. of IEEE Inter. Conf. on Computer Vision, 2011: 2564-2571.

(下转第 906 页)

基于相位调制的大动态微波光子链路仿真研究

王超^{1,2*}, 庾财斌¹, 肖永川¹, 张羽¹, 瞿鹏飞¹, 李儒章², 孙力军¹

(1. 重庆光电技术研究所, 重庆 400060; 2. 模拟集成电路重点实验室, 重庆 400060)

摘要: 针对相位调制微波光子链路线性解调困难的问题, 开展了基于锁相环高线性相位解调方法的理论研究。建立了详细的链路模型, 充分考虑噪声和非线性畸变的影响, 推导得到了链路关键参数的变化趋势。同时结合实际链路器件参数, 完成了链路关键参数的仿真研究。结果显示, 基于锁相环, 在 200 MHz 的射频频率下, 链路动态范围可达到 $127 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$, 较传统强度调制方法提升近 20 dB, 为大动态微波光子链路实验应用提供了一定的理论参考。

关键词: 微波光子; 相位调制; 光锁相环; 大动态范围; 雷达系统

中图分类号: TN015; O439 **文章编号:** 1001-5868(2020)06-0902-05

Simulation of Large-dynamic Microwave Photonic Link Based on Phase Modulation

WANG Chao^{1,2}, YU Caibin¹, XIAO Yongchuan¹,

ZHANG Yu¹, QU Pengfei¹, LI Ruzhang², SUN Lijun¹

(1. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN;

2. Key Laboratory on Analog Integrated Circuit, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: In order to solve the problem of linear demodulation for phase-modulated microwave photonic link, a theoretical study of high-linear phase demodulation with optical phase-locked loop (OPLL) is carried out. A detailed link model is established, and taking full account of the influence of noise and nonlinear distortion, the variation trend of key parameters of the link was derived. And also, the key parameters of the link were simulated based on the parameters of actual link devices. Simulation results show that based on the OPLL, the dynamic range of the link can reach $127 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$ at 200 MHz RF, which is nearly 20 dB higher than that obtained by the traditional intensity modulation method, providing a reference for applications of large-dynamic microwave photonic link.

Key words: microwave photonics; phase modulation; optical phase locked loop; large dynamic range; radar system

0 引言

大动态、宽带射频信号的传输特性是下一代雷达、电子战及通信等电子信息装备的核心需求^[1-3]。而以射频信号传输常用的同轴电缆作为传输介质, 存在体积大、质量大、抗电磁干扰能力弱以及损耗大

等诸多的问题。微波光子技术将射频信号调制到光载波上, 以光纤作为传输介质进行长距离传输; 该技术具有以下得天独厚的优势^[4-6]: (1) 光纤体积小、重量轻、灵活性好; (2) 抗电磁干扰能力强; (3) 传输损耗低; (4) 工作带宽大, 光波的本征频率约为 200 THz, 比微波高 4~5 个数量级; (5) 复用能力强, 可以通过一根光纤并行传输。大动态射频信号光传输技术是微波光子技术中最核心的一项技术, 未来以微波光子技术为基础构建的雷达、电子战及通信等电子信息装备都离不开这一关键技术。

收稿日期: 2020-08-30.

基金项目: 重庆市博士后科学基金项目 (CSTC2019jcyj-bshx0103).

* 通信作者: 王超

E-mail: wangchaohuster@163.com

进一步,提高微波光传输链路的动态范围主要可以通过两种途径实现^[7-8]:一是有效提升非线性三阶交调点;二是降低系统噪声底部。通常系统噪声的抑制空间有限,因此前者是实现大动态范围的主要途径。基于相位调制的微波信号在原理上是完全线性的,相对传统强度调制,其具备更高非线性三阶交调点和动态范围的潜力。只要保证相位解调的过程具有更高的线性度,整体系统就能够获得更大的动态范围。因此,如何实现高线性度的相位解调一直是近年来的研究热点。

目前基于相位调制的大动态解调方式主要包括锁相环、级联光滤波线性解调以及双波长三阶交调抵消等^[9-12]。几种方式各有优劣:级联光滤波具有高线性、大动态和大带宽的优点,但其偏置点控制较多、系统复杂;双波长三阶交调抵消具备大动态、大带宽的特点,但独立的双光源使其系统在光源控制和光滤波方面复杂度增大,严重限制了基于相位调制大动态微波光链路的广泛应用。

为了解决上述难题,本文开展了基于光锁相环的相位解调微波光子链路的理论仿真研究,详细研究了链路关键参数的演变趋势,可为实用化实验应用提供理论参考。

1 链路结构和工作原理

对于相位调制的微波光传输链路来说,射频信号转换为光信号的过程是完全线性的。假设相位调制器外加的射频信号,即随时间变化的电压信号,为 $V(t)$,此电压信号引起的光相位的变化可由下式表示:

$$\phi(t) = \pi \frac{n_0^3 \gamma_{33} L}{\lambda} V(t) \quad (1)$$

式中, n_0 为相位调制器光波导的有效折射率, γ_{33} 为铌酸锂晶体的电光系数, L 为电光互作用的有效长度, λ 为光载波的波长。这些参数对于给定的相位调制器都是常数,因此相位调制过程的光相位变化与射频信号的电压变化呈完全线性关系。

由于探测器不能直接感知光相位的变化,只能感知光强度的变换,并且探测器将强度调制的光信号转换为射频信号的过程具有很好的线性度,所以必须将光的相位调制转换为光的强度调制(PM-IM),并且这一转换过程的线性度高,直接决定了整个射频信号光传输过程的线性度高。

基于锁相环(OPLL)的微波光链路通过相位实

时反馈跟随,有效提高相位解调的线性度,增大链路动态指标。其原理图如图1所示,加载有射频信号的光信号 $S_{in}(t)$ 与本振光信号 $S_{lo}(t)$ 通过平衡探测器拍频,然后通过射频滤波整形处理后一部分进入锁相环路,将产生的误差信号加载到本振光信号上,实现环路的闭环反馈,将本振光信号的相位跟随在发射光频上,从而获得射频信号的线性解调。

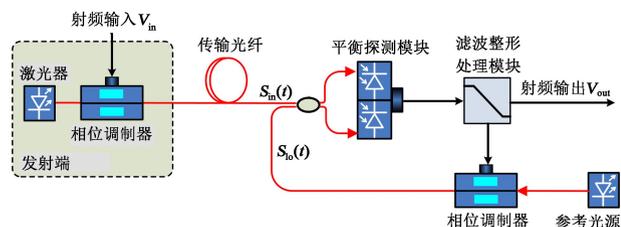


图1 基于OPLL相位调制及解调原理图

2 链路模型仿真

2.1 链路模型

基于图1的链路结构图,构建了相应的链路模型,如图2所示,从而推导出链路的无杂散动态范围(SFDR)、噪声系数(NF)、增益(G)以及非线性三阶交调(IIP3)等关键指标。

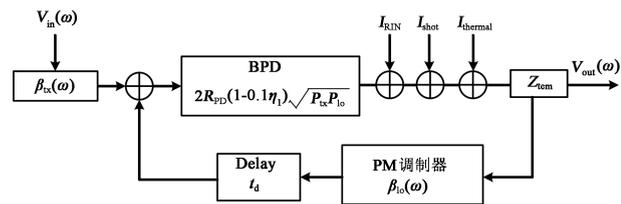


图2 基于OPLL微波光链路模型示意图

首先,发射(tx)和本振(lo)的光频信号可以表示为

$$\begin{aligned} S_{tx}(t) &= \sqrt{P_{tx}} e^{j[\omega_0 t + \theta_{tx}(t)]} \\ S_{lo}(t) &= \sqrt{P_{lo}} e^{j[\omega_0 t + \theta_{lo}(t)]} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, P_{tx} 和 P_{lo} 分别是信号光和本振光输入平均功率, ω_0 为光载波对应频率,两个光信号载波一致,有一个初始固定相位差 π 。同时,两路光信号均通过相位调制加载相应的射频信息:

$$\begin{aligned} \theta_{tx}(t) &= \beta_{tx}(\omega) V_{in}(t) \\ \theta_{lo}(t) &= \beta_{ACP}(\omega) V_{out}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, β_{tx} 和 β_{ACP} 分别为发射端与锁相环内相位调制器的灵敏度。而 $V_{in}(t)$ 为输入射频信号,可以表示为

$$V_{in}(t) = A_{in}(t) e^{j\omega_{RF} t} + c.c. \quad (4)$$

式中, ω_{RF} 为射频频率。当两个光信号通过平衡探测器(BPD)混频, 考虑探测器受三阶非线性产生饱和, 可以得到反应相位差的射频信号^[13]:

$$I_{BPD} = 2R_{PD}(1 - 0.1\eta_1) \sqrt{P_{tx}P_{lo}} \sin(\theta_{tx} - \theta_{lo}) - 0.2R_{PD} \sqrt{P_{tx}P_{lo}} \eta_2 \sin(\theta_{tx} - \theta_{lo})^3 / 3 \quad (5)$$

其中, R_{PD} 为探测器的灵敏度, η_1 和 η_2 是关于探测器饱和度的参数:

$$\eta_1 = (P_{tx} + P_{lo})^2 / 4P_{1dB}^2 \quad (6)$$

$$\eta_2 = P_{tx}P_{lo} / P_{1dB}^2$$

其中, P_{1dB} 为探测器的 1 dB 饱和功率值。

最终, 探测器输出可以表示为

$$V_{out}(\omega) = Z_{term}(\omega) I_{RPD}(\omega) \quad (7)$$

其中, $Z_{term}(\omega)$ 为探测器的阻抗匹配, 与 RC 低通滤波的设置有关。

2.2 小信号近似

当 OPLL 将本振光频相位跟随到发射光频信号上, $|\theta_{tx}(t) - \theta_{lo}(t)| \ll 1$, 可以作小信号近似:

$$I_{RPD} = 2R_{PD}(1 - 0.1\eta_1) \sqrt{P_{tx}P_{lo}} (\theta_{tx} - \theta_{lo}) \quad (8)$$

因此, 链路的幅度增益与功率增益可以表示为

$$G_{link}^v = \frac{G(\omega)}{1 + G(\omega)} \frac{\beta_{tx}(\omega)}{\beta_{ACP}(\omega)} \quad (9)$$

$$G_{link} = \left[\frac{G(\omega)}{1 + G(\omega)} \frac{\beta_{tx}(\omega)}{\beta_{ACP}(\omega)} \right]^2 \text{Re} \left(\frac{50}{Z_{term}} \right)$$

其中, $G(\omega)$ 为 OPLL 的开环增益:

$$G(\omega) = 2R_{PD}(1 - 0.1\eta_1) \sqrt{P_{tx}P_{lo}} \beta_{ACP} Z_{term} e^{-j\omega t_d} \quad (10)$$

因此, 链路的增益主要受限于两个调制器的灵敏度之比, 同时反馈环路需要确保足够的增益, 同时控制延时量, 以确保射频带宽下的相位稳定。

2.3 噪声分析

同时进一步分析链路的噪声特性, 主要包括: 热噪声、散粒噪声和激光器的相对强度(RIN)噪声:

$$\begin{cases} \langle I_{thermal} \rangle^2 = 4kT \text{Re}(1/Z_{term}) \\ \langle I_{shot} \rangle^2 = 2kT \text{Re}(1/Z_{term}) \\ \langle I_{RIN} \rangle^2 = \Gamma(R_{PD}P_{tx})^2 RIN_{tx} + \Gamma(R_{PD}P_{lo})^2 RIN_{lo} \end{cases} \quad (11)$$

其中, Γ 表征 BPD 对激光器 RIN 噪声的抑制程度。 RIN_{tx} 和 RIN_{lo} 分别表示发射和本振激光器的 RIN 噪声, k 为波尔兹曼常数, T 在常温下取 290 K。相应地, 链路的噪声系数 NF 可以表征为

$$NF = \frac{\langle V_{nfloor} \rangle^2 \text{Re}(1/Z_{term})}{G_{link} kT} \quad (12)$$

其中, $\langle V_{nfloor} \rangle$ 为输出的噪声幅度。由于 BPD 可以有效消除 RIN 噪声的影响, 因此在低功率下, 系统主要受限于散粒噪声, NF 可以表示为

$$NF = \frac{(1/P_{lo} + 1/P_{tx})q}{2R_{PD}(1 - 0.1\eta_1)^2 \beta_{tx}^2 50kT} + 1 \quad (13)$$

其中, q 为电子电荷量。可以看到, 在散粒噪声受限的情况下, 可通过提高发射端调制器的灵敏度和光功率来提升 NF 指标。

2.4 非线性畸变分析

进一步地, 考虑链路的非线性畸变, 从式(5)中可看到, 链路的非线性为相位差 $(\theta_{tx} - \theta_{lo})$ 的正弦响应, 在 OPLL 快速反馈的情况下, 相位差为小量, 相应的畸变可以有效减小。为了表征畸变量, 我们引入双音调制信号:

$$V_{in}(t) = A(\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t) \quad (14)$$

其中, A 为信号幅度, ω_1 和 ω_2 为射频频率。将式(14)结合式(9)便可以得到基频信号输出:

$$V_{out}^{fund}(t) = \frac{G(\omega)}{1 + G(\omega)} \frac{\beta_{tx}}{\beta_{ACP}} A(\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t) \quad (15)$$

同时结合式(5)可得到 BPD 的三阶畸变对应的电流:

$$i^{TOD} = -R_{PD}(1 - 0.1\eta_1 + 0.2\eta_2) \sqrt{P_{tx}P_{lo}} \cdot \frac{\beta_{tx}^3}{3[1 + G(\omega)]^3} A^3 (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t)^3 \quad (16)$$

上式包括多个频率成分, 在基频边上主要有两个, 对应的输出幅度分别为

$$V_1^{TOD} = -(1 - 0.1\eta_1 + 0.2\eta_2) \cdot \frac{\beta_{tx}^3 G(\omega)}{8\beta_{ACP}(1 - 0.1\eta_1)[1 + G(\omega)]^4} A^3 \cos(2\omega_1 - \omega_2)t \quad (17)$$

$$V_2^{TOD} = -(1 - 0.1\eta_1 + 0.2\eta_2) \cdot \frac{\beta_{tx}^3 G(\omega)}{8\beta_{ACP}(1 - 0.1\eta_1)[1 + G(\omega)]^4} A^3 \cos(2\omega_2 - \omega_1)t \quad (18)$$

与式(14)对比, 并根据三阶交调(IIP3)的定义, 可以得到此时 IIP3 对应功率为

$$P_{IIP3} = \left| \frac{G(\omega)}{1 + G(\omega)} \right|^2 \times \frac{4(1 - 0.1\eta_1)}{(1 - 0.1\eta_1 + 0.2\eta_2)} \times \frac{|1 + G(\omega)|^3}{|\beta_{ACP}|^2} \times \text{Re} \left(\frac{1}{Z_{term}} \right) \quad (19)$$

根据定义, 链路无杂散动态范围 SFDR 可以表示为

$$SFDR/\text{dB} = \frac{20}{3} \lg \frac{P_{\text{IIP3}}}{\langle V_{\text{nfloor}}^2 \rangle \text{Re} \left(\frac{1}{Z_{\text{term}}} \right)} \quad (20)$$

在散粒噪声受限的情况下可以简化为

$$SFDR = \frac{20}{3} \lg \left[\left| \frac{G(\omega)}{1+G(\omega)} \right|^2 \times \frac{4(1-0.1\eta_1)}{(1-0.1\eta_1+0.2\eta_2)} \times \frac{|1+G(\omega)|^5}{|\beta_{\text{ACP}}|^2 \langle I_{\text{shot}}^2 \rangle |Z_{\text{term}}|^2} \right] \quad (21)$$

综上,本文通过构建 OPLL 的相位调制微波光子链路模型,推导了相应的系统指标。可以看到,利用 BPD 的探测系统,在探测器未饱和的情况,输入功率增大 1 倍,动态范围可以提升 8 dB。

3 链路模型仿真结果与分析

基于上述理论推导,得到了基于 OPLL 的相位调制链路的关键参数。进一步地,结合激光器、调制器以及探测器等器件的实际关键参数,可以得到光链路关键参数的演变趋势。表 1 所示为光链路中关键元器件的主要参数,其中各数值参考了现有商售器件的参数规格。

表 1 链路关键元器件的参数规格

参数	数值
激光器功率 P/W	0.1
探测器 1 dB 功率 $P_{1\text{dB}}/\text{W}$	0.1
探测端阻抗 Z_{term}/Ω	150
探测器灵敏度 $R_{\text{PD}}/(\text{A} \cdot \text{W}^{-1})$	0.4
tx 调制器灵敏度 $\beta_{\text{tx}}/(\text{rad} \cdot \text{V}^{-1})$	1.61
lo 调制器灵敏度 $\beta_{\text{lo}}/(\text{rad} \cdot \text{V}^{-1})$	1.61
滤波带宽 W/MHz	500
RF 频率 f_{R}/MHz	100
发射端阻抗 Z_{lo}/Ω	50
环境温度 T/K	290

首先,得到的是光链路的噪声系数 NF,如图 3 所示,随着光电流的逐渐增大,噪声系数逐渐减小。在光电流为 10 mA 时,噪声系数达到 15.5 dB,利用平衡探测可以有效抑制激光器噪声的影响。

其次,得到的是光链路的三阶交调 IIP3 参数随光电流的变化曲线,如图 4 所示,随着光电流的逐渐增大,三阶交调 IIP3 逐渐增大。在光电流为 10 mA 情况时,三阶交调 IIP3 达到 32 dB,表明通过 OPLL 可以有效抑制非线性畸变,实现高线性的相位解调。

进一步地,可以得到光链路的无杂散动态范围 SFDR 参数的变化趋势,如图 5 所示,随着光电流的

逐渐增大,SFDR 值逐渐增大。在 10 mA 情况下,动态范围达到 $127 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$,较传统强度调制方法,该值提高了近 20 dB,可见其动态范围提升的潜力非常大。

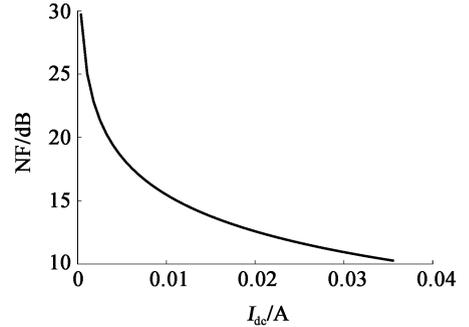


图 3 链路 NF 随光电流的变化趋势

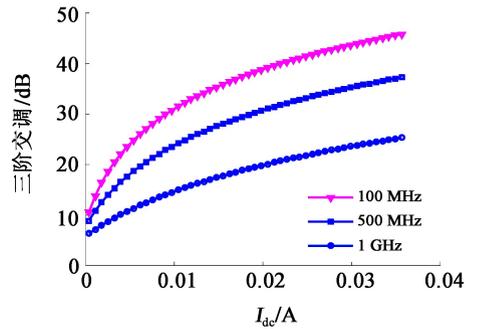


图 4 不同 RF 频率下链路 IIP3 随光电流的变化趋势

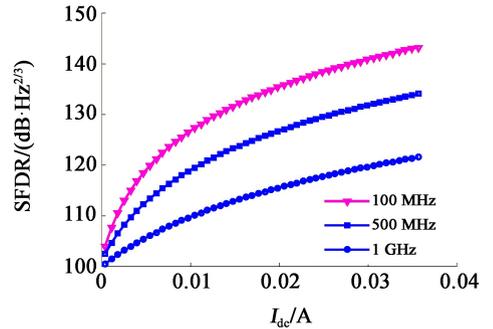


图 5 不同 RF 频率下链路 SFDR 随光电流的变化趋势

最后,还得到光链路 SFDR 参数随 RF 频率的变化趋势。如图 6 所示,由于锁相环受限反馈时延

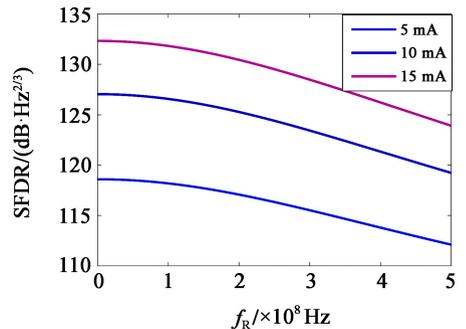


图 6 不同光电流下链路 SFDR 随 RF 频率的变化趋势

存在上限, SFDR 随着 RF 的增大逐渐减小。对于 500 MHz 的锁相带宽, 在工作频率为 200 MHz 时, 动态范围可以达到 $123 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$ 。

4 结论

本文针对相位调制微波光链路线性解调困难的问题, 提出了一种基于锁相环的高线性解调方法并建立了详细的链路模型。在充分考虑噪声与非线性畸变的影响下, 推导得到链路关键参数的变化趋势。结合实际链路器件参数, 完成了链路总体参数仿真, 结果显示在工作频率为 200 MHz 的情况下, 动态范围可达到 $127 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$, 较传统强度调制方法提高了近 20 dB。可见基于锁相环相位解调的光链路具有大动态范围的潜力, 同时通过减小反馈延时, 工作频率可拓展到吉赫兹量级, 适合于大动态范围、低频本振信号的传输应用。后续将基于本模型进一步开展大动态微波光链路的实验研究。

参考文献:

- [1] Marpaung D, Roeloffzen C. Integrated microwave photonics [J]. *Laser & Photon. Rev.*, 2012, 10(1): 1-30.
- [2] Roeloffzen C G H, Zhuang L M, Taddei C. Silicon nitride microwave photonic circuits [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(19): 22937-22961.
- [3] 陈小龙, 关键, 黄勇, 等. 雷达低可观测目标探测技术 [J]. *科技导报*, 2017, 35(11): 30-38.
Chen Xiaolong, Guan Jian, Huang Yong, et al. Radar low-observable target detection [J]. *Science & Technology Rev.*, 2017, 35(11): 30-38.
- [4] Yao Jianping. Microwave photonics [J]. *J. of Lightwave Technol.*, 2009, 27(3): 314-335.
- [5] Xu Kun, Li Jianqiang, Yin Jie, et al. Microwave photonic [J]. *Inter. J. of Adv. Robotic Systems*, 2016, 13(3): 13-20.
- [12] Rosten E, Drummond T. Machine learning for high-speed corner detection [C]// *Proc. of European Conf. on Computer Vision*, 2006: 430-433.
- [13] Kalman R E. A new approach to linear filtering and prediction problems [J]. *J. of Fluids Engin.*, 1960, 82: 35-45.
- [14] Guo Lie, Li Linhui, Zhao Yibing. Pedestrian tracking based on Camshift with Kalman prediction for autonomous vehicles

signal processing techniques and radio-over-fiber transmission demonstration [J]. *The J. of China Universities of Posts and Telecommun.*, 2009, 16(1): 6-9.

- [6] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds [J]. *Nature Photon.*, 2007, 1(6): 319-330.
- [7] Vincent J U, Frank B, Jason D M, et al. Long-haul analog photonics [J]. *J. of Lightwave Technol.*, 2011, 22(8): 1182-1205.
- [8] Marpaung D, Roeloffzen C. Integrated microwave photonics [J]. *Laser & Photon. Rev.*, 2012, 10(1): 1-30.
- [9] Haas B, Urlick V, Mckinney J, et al. Dual-wavelength linearization of optically phase-modulated analog microwave signals [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2008, 26(15): 2748-2753.
- [10] Xu Longtao, Jin Shilei, Li Yifei. ACP-OPLL performance in presence of out-of-band interference [J]. *J. of Lightwave Technol.*, 2014, 32(15): 2636-2642.
- [11] Chi Hao, Zou Xihua, Yao Jianping. Analytical models for phase-modulation-based microwave photonic systems with phase modulation to intensity modulation conversion using a dispersive device [J]. *J. of Lightwave Technol.*, 2009, 27(5): 511-521.
- [12] Fandino S J, Domenech D J, Munoz P, et al. Integrated InP frequency discriminator for phase-modulated microwave photonic links [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(3): 3726-3736.
- [13] Li Yifei, Herczfeld P. Coherent PM optical link employing ACP-PPLL [J]. *J. of Lightwave Technol.*, 2009, 27(9): 1086-1094.

作者简介:

王超(1990—),男,重庆垫江人,2013年毕业于华中科技大学光信息科学与技术专业,获学士学位,2018年毕业于华东师范大学光学专业,获理学博士学位,高级工程师,主要从事微波光子学、光学频率梳以及超快光纤激光器等方面的研究。

[J]. *Inter. J. of Adv. Robotic Systems*, 2016, 13(3): 13-20.

- [15] Kailath T. The divergence and Bhattacharyya distance measures in signal selection [J]. *IEEE Trans. on Communication Technol.*, 1967, 15(1): 52-60.

作者简介:

王立玲(1979—),女,博士,副教授,主要从事机器人建模与控制方面的研究。

《半导体光电》2020 年第 41 卷总目次

· 动态综述 ·

基于深度学习的目标检测技术的研究综述	罗元, 王薄宇, 陈旭(41-1-001)
半导体激光器辐照损伤效应实验研究进展	王祖军, 宁浩, 薛院院, 等(41-2-151)
“新基建”环境下光电子产业基础能力建设的探索	韩国忠(41-3-301)
基于微纳结构的硅基高速探测器研究进展	王昊璇, 郭安然, 金晖, 等(41-3-306)
基于硅基微环谐振器的折射率传感研究综述	徐亚萌, 孔梅(41-4-455)
光子晶体光纤的设计与应用研究综述	赵丽娟, 梁若愚, 徐志钮(41-4-464)
视网膜 OCT B-scan 图像分割算法综述	袁坤, 霍力(41-5-605)
微透镜阵列的制作及其在光场成像中应用的研究进展	乌李瑛, 瞿敏妮, 付学成, 等(41-5-611)
大功率半导体激光器抗腔面灾变性光学损伤技术综述	宋悦, 宁永强, 秦莉, 等(41-5-618)
基于深度学习的目标跟踪技术的研究综述	罗元, 肖航, 欧俊雄(41-6-757)
低噪声 CMOS 图像传感器技术研究综述	刘嵘侃, 邢德智, 唐昭焕, 等(41-6-768)
航空发动机叶尖间隙测量技术研究进展	许欧阳, 童杏林(41-6-774)

· 光电器件 ·

一种低交叉轴灵敏度微米光栅加速度计设计	高山, 冯丽爽, 周震, 等(41-1-011)
基于有限元法的 12 μm 微测辐射热计单元设计	史佳欣, 陈超, 王军(41-1-015)
级联倍增 InAlAs/InAlGaAs 雪崩光电二极管暗电流成分分析	张承, 黄晓峰, 迟殿鑫, 等(41-1-020)
基于敏感薄膜的 F-P 光纤温度传感器的高温特性	高晓丹, 彭建坤(41-1-025)
谐振式光纤陀螺的误差及噪声分析	梅魁, 蒋治国, 胡宗福(41-1-029)
基于表面等离子体共振的光子晶体光纤折射率传感器的设计与分析	魏方皓, 张祥军, 唐守锋(41-1-035)
基于遗传算法的太阳能飞艇光伏阵列优化研究	刘晓光, 汪岳峰(41-1-039)
基于石墨烯探测器的积分电路设计	任思伟, 申钧, 刘昌举(41-1-044)
一种带温度参量的半导体激光器速率方程及仿真求解	张亚标, 肖永川, 王超, 等(41-1-050)
基于微多环谐振陀螺仪的馈通效应研究	田梦雅, 张卫平, 谷留涛, 等(41-1-054)
基于人眼视觉特性的 IRFPA 非均匀性校正算法研究	代少升, 易伟男, 聂合文, 等(41-1-059)
基于银纳米薄膜欧姆接触的高波长选择性紫外探测器研究	梁志斌, 张齐轩, 许朝军, 等(41-1-064)
高分辨率 AM Micro-LED 显示器设计及其驱动实现	林杰泓, 聂君扬, 张永爱, 等(41-1-068)
光纤光栅温度传感器增敏封装特性研究	王甫, 江淮, 易小龙, 等(41-1-073)
一种用于光时域反射仪的 1 550 nm 半导体激光器	廖柯, 王昊璇, 熊文涛, 等(41-2-159)
基于碳管/石墨烯/GaAs 双异质结自驱动的近红外光电探测器	陶泽军, 霍婷婷, 尹欢, 等(41-2-164)
TDI 图像传感器横向抗晕栅极电压与满阱容量关系研究	曲杨, 王欣洋, 周泉, 等(41-2-169)
三维压差式光纤矢量水听器设计与实验	张滔, 胡斌杰, 陈超育, 等(41-2-173)
结构解耦四质量块微陀螺仪的设计与制备	李敏阳, 张卫平, 谷留涛, 等(41-2-177)
低电压驱动 F-P 腔可调谐滤波器的仿真和设计	任浩杰, 侯海港, 朱丽慧, 等(41-2-182)
影响谐振式光纤陀螺精细度的因素分析	郭丽君, 王田瑞, 何家杰, 等(41-2-187)
基于纺锤型空气腔的光纤马赫-曾德尔折射率传感器	戴洋, 王婷婷, 孙家程, 等(41-2-191)
压电谐振器特殊模式振动特性研究	梁天晨, 吴校生, 李志超(41-2-195)
一种应用于 CMOS 图像传感器数字双采样 ADC 的 PGA 电路	吴治军, 李毅强, 彭松, 等(41-2-200)
基于 MSM 结构的表面等离子体共振光纤折射率传感器	郭志勇, 葛益娴, 沈令闻, 等(41-2-205)
电光双向强度调制器的隔离度研究	张洪波, 富松, 李森森, 等(41-3-314)
全光纤马赫-曾德尔干涉仪制作过程中的受力预分析	花文栋, 王婷婷, 戴洋, 等(41-3-318)

压电谐振器双闭环驱动电路研究	李志超, 吴校生, 梁天晨(41-3-322)
一种低成本透射光谱强度调制型光纤温度传感器	顾拥军, 沙春, 高洁, 等(41-3-327)
CMOS 图像传感器抗电离辐射加固技术研究	吕玉冰, 吴琼瑶, 刘昌举, 等(41-3-331)
全光纤型侧向 OCT 探针的设计与鲁棒性分析	马婧, 王颖奇, 胡运韬, 等(41-4-472)
一种基于双模干涉的光纤折射率传感器	王钧, 杨树(41-4-476)
星载高灵敏度平衡光电探测器研究	崔大健, 周浪, 奚水清, 等(41-4-480)
浴铜灵有机分子材料对钙钛矿薄膜表面的钝化作用	宋奇, 梁春军, 何志群(41-4-485)
高光谱成像用高速 CMOS 图像传感器设计	冯国旭, 刘昌举, 刘戈扬, 等(41-4-489)
菲涅耳透镜下多结电池表面局部高辐射功率对短路电流的影响	江景祥, 舒碧芬, 梁齐兵, 等(41-4-494)
半导体激光器温度调谐波长扫描技术	柯文雄, 江毅(41-4-500)
基于随机光栅的可调谐随机光纤激光器	沈成荣, 董新永(41-4-505)
低对比度光栅诱导的激光腔中准连续域束缚态研究	范策, 王宇飞, 屈晋先, 等(41-5-627)
氧化石墨烯修饰的色散拐点长周期光纤光栅的折射率传感特性	赵明富, 王鑫, 罗彬彬, 等(41-5-632)
基于复合膜的双通道光纤表面等离子共振传感器	顾钦顺, 葛益娴, 张鹏, 等(41-5-638)
有机卤化物盐对钙钛矿太阳能电池器件性能的影响	冯晓娜, 李丹, 梁春军(41-5-644)
基于超材料的太赫兹超窄带吸收器设计及特性分析	沈涛, 潘武, 李燧, 等(41-5-648)
高灵敏度多模干涉-异质无芯光纤折射率传感器	杨宏艳, 刘孟银, 李叶柯, 等(41-5-652)
一种面向大面阵焦平面阵列的低功耗多功能读出电路设计	撒鹏花, 乔辉, 马丁, 等(41-5-658)
一种主动共存的增强型光束扩展器	张永棠(41-5-663)
载流子平衡方法提高量子点发光二极管效率的研究	杨媚, 郑力为, 孟琪, 等(41-5-667)
一种用于油气井持气率测量的高可靠性光纤探针	姜劲栋, 王蒙, 赵庆超, 等(41-5-673)
石墨烯压力传感器结构设计及压力敏感特性研究	王冬, 秦亚飞, 袁锐波, 等(41-5-676)
高帧频高灵敏度线列 PIN-CMOS 图像传感器研究	陈世军, 王欣, 丁毅, 等(41-6-779)
三维成像用 128×2 线性模式 APD 焦平面探测器设计	邓光平, 马华平, 鹿婷婷, 等(41-6-784)
谐振式光纤陀螺的信噪比研究	韩松延, 胡宗福(41-6-788)
基于 Al_3 光耦合层的新型顶发射蓝光有机电致发光器件	王振, 陈家雯, 卢永生, 等(41-6-794)
基于双锥形光子晶体光纤的折射率传感器	王婷婷, 杨凌旭, 李帅, 等(41-6-798)
P3HT 为空气传输层的碳基钙钛矿太阳能电池	万雪健, 梁春军(41-6-802)
MIM 波导结构中的等离激元诱导透明和慢光效应	张利伟, 黄星, 孟威威, 等(41-6-808)
用于卫星次镜座结构的光纤光栅温度传感器设计	王天奇, 孟凡勇, 王永千, 等(41-6-815)
基于光学干涉法的翻新电子元器件鉴别方法	温景超, 吴立强, 赵彦飞, 等(41-6-822)

• 材料、结构及工艺 •

不同应力增透膜对半导体激光器性能的影响	崔碧峰, 程瑾, 郝帅, 等(41-1-077)
温度和材料参数对 $InAs_x Sb_{1-x}$ 俄歇复合寿命影响的数值分析	张景波, 张云琦, 王思文, 等(41-1-080)
高强度光纤光栅与碳纤维的复合及应变传感特性研究	侯智懿, 李彦, 邵洪峰, 等(41-1-085)
$InAs$ 量子点低温盖层对其发光特性的影响	吴唯, 周勇, 刘尚军, 等(41-1-089)
基于方形腔耦合金属波导结构的全光等离子体开关	肖功利, 窦婉滢, 杨宏艳, 等(41-1-093)
NLDMOS 器件性能优化及分析	李维杰, 王兴, 王云峰, 等(41-1-099)
蓝光 GaN 基 Micro-LED 芯片制备及激光剥离工艺研究	王仙翅, 潘章旭, 刘久澄, 等(41-2-211)
缺陷对极紫外掩模多层结构反射场的扰动研究	李冠楠, 刘立拓, 周维虎, 等(41-2-217)
基于压控电流源的铂电阻测温非线性校正设计	许子颖, 董峰, 傅雨田(41-2-223)
用于近红外单光子探测器的均温板性能研究	姚友丹, 洪占勇, 罗成刚(41-2-227)
凹槽型微通道传热与流动性能的数值分析	范贤光, 黄江尧, 许英杰(41-2-232)
基于蛾眼阵列的全向宽光谱减反层优化设计	刘晓光, 汪岳峰(41-2-237)
p 型 GaN 上 Pd/NiO/Al/Ni 反射电极欧姆接触的热稳定性研究	左秉鑫, 曾昭烜, 李昕昕, 等(41-2-242)

面向毫克级仿昆扑翼微飞行器的力-力矩传感器	孟 冉, 张卫平, 王晨阳, 等(41-2-247)
二硫化钨-石墨烯垂直异质结的制备与表征	顾 杰, 颜元凯, 万 茜(41-2-252)
兼顾增益与折射率变化的低偏振量子点材料研究	缪庆元, 吴子涵(41-3-336)
不同手性单壁碳纳米管分离及其场效应晶体管性能研究	郑苗苗, 李亚辉, 姚 建, 等(41-3-344)
氮气流量对磁控溅射 C 掺杂 TiO ₂ 薄膜光学性能的影响	江耀华, 沈鸿烈, 高 凯(41-3-351)
有限能量 Olver-Gaussian 光束通过电光晶体的光强分布特性	靳 龙, 王晴岚(41-3-357)
一种三维立体传输结构的分段式设计方法	栗辰焯, 李振松, 缪 旻(41-3-362)
一种高双折射低损耗大负色散光子晶体光纤的设计	赵丽娟, 赵海英, 徐志钮(41-3-368)
SnSe 薄膜的两步法制备与光电性能研究	崔树松, 沈鸿烈, 李树兵, 等(41-3-374)
InP 晶圆背面减薄工艺中翘曲度的控制与矫正	张圆圆, 柳 聪, 赵文伯, 等(41-3-379)
一种压电半导体纳米线的热电耦合性能研究	李鑫飞, 张巧云(41-3-384)
PCM 测试参数与 CCD 工艺关系研究	岳志强, 曲鹏程, 杨修伟, 等(41-3-389)
IC 基板传输机器人末端执行器结构拓扑优化设计	祝锡晶, 郭 宵, 林知微, 等(41-4-513)
预电离效应对 ArF 准分子激光特性的影响分析	苏 丹, 赵江山, 王 倩(41-4-517)
介电常数近零模式与表面声子极化模式的耦合杂化研究	杨明莉, 陈溢杭(41-4-523)
氧化镓生长模拟中的流场与反应参数优化研究	戴必胜, 陈 琳, 陶志阔, 等(41-4-527)
偏振发光的钙钛矿纳米线薄膜	王健越, 魏雅平, 邱龙臻, 等(41-4-531)
微针鳍散热器结构参数模拟及优化	王志敏, 叶贵根, 薛世峰, 等(41-4-535)
掩模版复印工艺图形畸变分析与改进	束名扬, 周 文, 陈栋豪(41-5-681)
PERC 背钝化结构提升多晶硅太阳能电池的光电转换性能研究	吕文辉, 邱小永, 赵庆国, 等(41-5-685)
三角形硅二聚体纳米天线及其荧光增强效应研究	刘占锋, 曹文静, 孙 非, 等(41-5-689)
印刷烧结工艺对单晶硅太阳能电池栅线形貌及电学性能的影响	李琰琪, 沈鸿烈, 杨汪扬, 等(41-6-827)
FBG 形状传感器应变传递与传感性能研究	张冬伟, 金 靖, 朱云鸿, 等(41-6-833)
一种双模大模场面积多芯光纤的设计和特性分析	赵丽娟, 王贺晴, 徐志钮(41-6-839)
光纤研磨纸粒度对侧面研磨塑料光纤传感器灵敏度的影响	冯利民, 巫涛江, 赵 杰, 等(41-6-845)
ITO 薄膜的电阻并联效应研究	王松林, 杨崇民, 张建付, 等(41-6-850)
三维多孔石墨烯的制备及其电化学性能研究	李建勇, 邵庆国(41-6-855)
两种微型热管传热性能对比研究	魏智康, 侯 燕, 段彦军, 等(41-6-860)

• 光电技术及应用 •

微小零件显微检测图像的清晰度评价	李成超, 于占江, 李一全, 等(41-1-103)
基于像元纯净指数的多端元提取算法	杨华东, 许 楠, 郝永平(41-1-108)
应用于微型扑翼飞行器的实时视觉系统设计	王昕鹏, 张卫平, 牟家旺, 等(41-1-114)
丙丁烷 TDLAS 测量系统的吸收峰自动检测	张 铭, 苗玉彬, 张 舒(41-1-118)
基于随机 Radon 变换的 DRPE 加密系统	彭凯飞, 沈学举, 黄富瑜, 等(41-1-123)
针对间断纹理环境中的图像特征追踪和匹配算法研究	赵明富, 曹利波, 宋 涛, 等(41-1-128)
基于非均匀有序直方图和锐化的红外图像增强	吴 婷(41-1-135)
联合空间信息的改进低秩稀疏矩阵分解的高光谱异常目标检测	张 炎, 华文深, 黄富瑜, 等(41-1-141)
一种基于 AP 与消除基本陷阱集的低错误平层 QC-LDPC 码构造方法	袁建国, 王宏森, 张希瑞, 等(41-1-146)
基于 GPU 的分布式全息孔径数字成像技术研究	黄家应, 杨 峰, 朱 磊, 等(41-2-257)
基于高程和地物光谱约束的多光谱图像预处理算法	方秀秀, 黄 旻, 王德志, 等(41-2-264)
一种基于宽频光源和 FP 腔滤波的 CO ₂ 检测系统	成 龙, 丁 雷, 张子儒(41-2-268)
轻小型推扫视频一体化相机设计与验证	胡永富, 解 静, 吴建福, 等(41-2-273)
基于 SVM 的疲劳驾驶人脸图像特征检测算法	刘梦佳, 赵建国(41-2-278)
基于双层决策规则的红外与可见光图像融合	王芳莲, 李喜艳(41-2-283)
CCD 图像传感器电极间漏电流自动化测试系统设计	郭 利, 周建勇, 何 达, 等(41-2-287)

针对联合变换相关器加密系统的光学唯密文攻击系统	彭凯飞, 沈学举, 黄富瑜(41-2-291)
基于 SSD 的实时轻量级无人机检测算法	王若霄, 徐智勇, 张建林(41-2-296)
深紫外 CMOS 图像传感器测试匀光系统设计	李琦, 齐月静, 卢增雄, 等(41-3-395)
基于改进变分模态分解的 Φ -OTDR 信号去噪方法	熊兴隆, 冯磊, 刘佳, 等(41-3-400)
二次多项式拟合在分布式光纤传感中的应用	徐志钮, 樊明月, 赵丽娟, 等(41-3-406)
基于时空注意力网络的中国手语识别	罗元, 李丹, 张毅(41-3-414)
多抽头 EMCCD 相机时序控制及像元合并技术	刘玲钰, 王明富, 刘恩海(41-3-420)
大口径细光束自准直测量系统误差的实验研究	姚明, 王劫(41-3-426)
基于光场相机波前传感器的气动光学效应校正研究	盛良睿, 马晓焯, 杨奇龙, 等(41-3-432)
可见光通信中一种大围长可快速编码的 QC-LDPC 码构造方法	袁建国, 张希瑞, 袁财政, 等(41-3-437)
多环谐振式微机械陀螺频率跟踪电路研究	薛冰, 张卫平, 王子杰, 等(41-3-443)
超分辨率面阵激光雷达的动目标姿态估计	王盛杰, 刘博, 李和平, 等(41-3-448)
面向长距离量子通信的双光子关联成像技术	王登峰, 姚鑫, 焦仲科, 等(41-4-542)
融合特征法与直接法的 RGB-D 稠密视觉 SLAM 算法	胡章芳, 张杰, 程亮(41-4-548)
微波光子链路中的附加相位噪声分析	瞿鹏飞, 肖永川, 庾财斌, 等(41-4-555)
DFB 激光器饱和吸收稳频的精密温控系统设计	张玮, 李兆隆, 郭平, 等(41-4-560)
基于弱光栅阵列应变传感的驼峰溜放监测方法研究	甘维兵, 艾凌云, 涂世宇, 等(41-4-566)
基于 ROI 的高精度红外全景拼接算法研究	代少升, 姚俐(41-4-572)
面向自动化装配过程的光纤传感调校系统	孟祥秋, 于金召, 王杰(41-4-578)
一种基于卷积神经网络的人脸识别改进算法	王彦秋, 冯英伟(41-4-582)
基于激光检测的无人机探测系统与实验	陈实, 杨帆, 王梓任(41-4-587)
基于星座图对射频指纹识别方法的研究	袁建国, 赵富强, 覃陆祯玥, 等(41-4-592)
基于互信息的紫外成像仪中图像配准研究	侯思祖, 陈宇, 刘雅婷(41-4-598)
光子计数激光雷达游走误差与时间抖动的研究	罗佳承, 刘博, 华康健(41-5-695)
基于光纤陀螺的桥梁路面平整度检测研究	杨丹丹, 王立新, 胡文彬, 等(41-5-700)
基于时间一致性约束的核互相关器目标跟踪	崔雄文, 刘传银, 周杨, 等(41-5-705)
光纤电流互感器用半导体激光器数字驱动电路设计	王硕, 王国臣, 高伟(41-5-711)
基于改进 DDPG 算法的中短期光伏发电功率预测	苏诗慧, 雷勇, 李永凯, 等(41-5-717)
基于任意场景的 CCD 相机电子学增益测试方法研究	胡明鹏, 成俊舟, 任王涛, 等(41-5-724)
相位共轭信号在无中继传输系统中的性能研究	陈芳, 刘军, 李伯中, 等(41-5-729)
基于能量守恒与光谱法的无创血糖检测技术	陈健, 王太宏, 段小川(41-5-734)
基于 CLAHE 和多尺度细节融合的静脉图像增强算法	马静云, 叶兵, 汪仕铭(41-5-738)
二值加权正交迭代相机位姿估计算法	陈紫强, 周秉毅, 刘庆华, 等(41-5-743)
基于面阵三维成像激光雷达的目标点云分割技术	王盛杰, 刘博, 李和平, 等(41-5-749)
基于特征数不变量的插针特征点匹配算法研究	李慧鹏, 李科(41-6-865)
基于多尺度分析的快速相位立体匹配	蔡超, 刘文波, 郑祥爱, 等(41-6-870)
基于自适应筛选 Harris 角点检测的快速图像配准算法	蔡欣展, 刘艳艳(41-6-875)
卫星激光通信中一种基于矩阵扩展的 RC-LDPC 码构造方法	袁建国, 袁雅琴, 刘议靖(41-6-879)
空间激光通信高速多制式光调制技术	兰枫, 韩婷, 郭精忠(41-6-884)
螺旋布设光纤光栅的软体操作器形状传感方法	朱伟涛, 孙广开, 何彦霖, 等(41-6-889)
基于改进 Camshift 算法的 NAO 机器人目标跟踪	王立玲, 单忠宇, 马东, 等(41-6-896)
基于相位调制的大动态微波光子链路仿真研究	王超, 庾财斌, 肖永川, 等(41-6-902)

《半导体光电》编辑委员会

顾问 王占国(科学院院士) 姚建铨(科学院院士) 方家熊(工程院院士)

主任 欧黎

副主任 蒋志伟

委员 (以姓氏笔画为序)

王小勇 方亮 孔梅 宁永强 孙长征 刘秉琦 刘胜 刘斌
华勇 安俊明 李成 李向阳 李国强 余华 邹卫文 张卫平
张佰君 沈鸿烈 宋凝芳 罗风光 周立庆 孟洲 祝连庆 赵明富
徐学良 高新江 郭霞 崔一平 龚敏 蒋亚东 喻志农 童杏林
熊平 潘武 瞿鹏飞

半导体光电

BANDAOTI GUANGDIAN

(双月刊 1976年创刊)

第41卷 第6期 2020年12月

SEMICONDUCTOR OPTOELECTRONICS

(Bimonthly, Started in 1976)

Vol. 41 No. 6 December 2020

主管单位 中国电子科技集团有限公司

主办单位 重庆光电技术研究所

编辑出版 《半导体光电》编辑部

编委主任 欧黎

主编 蒋志伟

执行主编 李福果

责任编辑 朱玲瑞

印刷 重庆五湖印务有限公司

国内订阅 《半导体光电》编辑部

通信地址 重庆市南岸区南坪花园路14号(400060)

电话 (023)65860286(编辑)

(023)65860287(发行)

电子邮箱 soe@163.net

Competent Authorities China Electronics Technology Group Corporation

Sponsored by Chongqing Optoelectronics Research Institute

Edited and Published by Editorial Office of Semiconductor Optoelectronics

Director of Editorial Board OULI

Chief Editor JIANG Zhiwei

Executive Chief Editor LI Fuguo

Editor in Charge ZHU Lingrui

Printed by Chongqing Wuhu Printing Corp.

Domestic Subscription Editorial Office of Semiconductor Optoelectronics

Address No. 14 Garden Road, Nan'an District, Chongqing 400060, P. R. China

Telephone (023)65860286 (Edition)

(023)65860287 (Distribution)

E-mail soe@163.net

半导体光电

二〇二〇年十二月

第四十一卷 第六期 (757-906)

半导体光电

二〇二〇年十二月

第四十一卷 第六期 (757-906)