

· 电路与控制 ·

微弱光信号探测 APD 处理电路设计

李天浩, 包 维

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300000)

摘 要: 雪崩光电二极管(APD)具备微弱光信号探测性能,其相关处理电路的设计直接关乎 APD 探测能力的大小。分析了 APD 光电探测器工作原理、自身特性及外界影响因素,研究了 APD 工作电路的组成与最佳工作电路的设计问题。后期信号处理阶段,设计了 APD 信号放大处理电路,满足了低噪声、带宽匹配、微弱信号放大的要求。在 APD 微弱光信号探测领域具有一定的意义。

关键词: APD; 微弱光信号; 处理电路; 带宽匹配; 信号放大

中图分类号: TN710.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-01-0055-06

Research on Avalanche Photodiode Processing Circuit Design for Weak Light Signal Detection

LI Tian-hao, BAO Wei

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300000)

Abstract: Avalanche photodiode (APD) has the characteristic of detecting weak light signals. The detection characteristic of APD is directly depended on the design of relevant processing circuits. The operation principle and characteristics of APD electro-optic detectors and external influence factors are analyzed. The composition of operation circuit and the best design of APD are researched. During signal post processing, the signal amplification processing circuit of APD is designed. And the requirements of low noise, bandwidth matching and weak signal amplification are met, which has an important significance in the field of weak light signal detection of APD.

Key words: avalanche photodiodes (APD); weak light signal; processing circuit; bandwidth matching; signal amplification

APD 微弱光信号探测技术在激光测距、激光通信、激光雷达等领域有着广泛的应用。基于 APD 雪崩光电二极管的光电探测系统接收目标的回波信号,不仅能够获取目标的距离信息,还能探测目标的方位信息,且具有较高的测距精度和角分辨率,实现对非合作目标的准确定位,在目标识别,空间对抗等领域有着广阔的应用前景。APD 微弱光信号探测技术是激光探测领域的关键技术之一,处理电路的设计直接影响微弱信号的检测能力,具有重要的研究价值。基于 APD 微弱光信号探测技术,从 APD 光电

探测器的工作原理、自身特性及外界环境因素出发,研究了 APD 处理电路的设计。

1 APD 光电探测器

雪崩光电二极管 APD 是具有雪崩倍增效应的光电探测器^[1]。当在 PN 结上加高反向偏置电压(一般为 50 V 以上,甚至几百伏)时,具备微弱光信号探测性能。APD 是具有内增益的光伏电池,为了获得足够的增益,所加的反向偏压应接近其击穿电压。

收稿日期: 2013-11-13

作者简介: 李天浩(1986-),男,辽宁锦州人,学士,主要研究方向为光电技术和光学设计。

APD的雪崩增益,又称倍增系数 M ,它定义为

$$M = I_M / I_R \quad (1)$$

式中, I_M 为APD器件有雪崩增益时输出的光电流; I_R 为无雪崩增益时光生电流的平均值(无光照时, I_R 即为二极管的反向饱和电流 I_{s0})。实际上,雪崩增益 M 与PN结上所加的反向偏压、PN结的材料和结构等因素有关。实验发现,在外加电压略低于击穿电压 U_{BR} 时,也会发生雪崩倍增现象,只是雪崩增益小些。雪崩增益 M 随外加电压 U 的变化可以用下面经验公式近似表示为

$$M = \frac{1}{1 - (U/U_{BR})^n} \quad (2)$$

式中, n 是PN结的材料和结构有关的常数。对于硅器件, $n=1.5 \sim 4$;对于锗器件, $n=2.5 \sim 8$ 。从经验公式可以看出:当 U 接近 U_{BR} 时, M 迅速增大,而当 $U=U_{BR}$ 时, $M \rightarrow \infty$,此时APD工作在盖革模式(反向偏压超过击穿电压,则方向偏压越大,电流增长越快,即雪崩效应)下,具备单光子探测能力,但会导致PN结击穿,管子将被烧坏。

APD的击穿电压对温度变化相当敏感,如图1所示。因此,当温度变化时,APD的雪崩增益也随之发生较大变化。

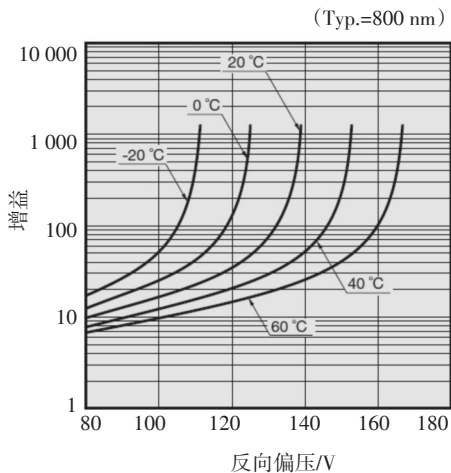


图1 APD反向偏压-增益变化曲线图

由以上分析可知,基于APD工作原理,APD应工作于反向偏置电压下,且该偏置电压变化可调、电压波纹小,用以满足APD处于最佳工作状态的要求,在此基础上设计相应的反向偏压电路。APD发生雪崩效应时,雪崩电流会一直持续到偏置电压低于雪崩击穿电压为止。为了防止APD过流损坏,PN结被击穿,并使APD能够对下一个光子信号产生响应,设计

雪崩抑制电路和计时电路,使雪崩发生后迅速地切断雪崩,并通过计时电路重置偏置电压,以使APD恢复到接收光子的状态。APD击穿电压受外界温度影响较大,进而影响到雪崩增益的大小,设计温度补偿电路,随环境温度变化时刻调整反向偏压大小。

2 APD处理电路

2.1 APD处理电路组成及框图

APD相关处理电路可以分为两大部分:前期信号采集电路和后期信号处理电路。前期信号采集电路主要为APD在复杂多变环境下正常工作提供保障,使APD处于最佳增益状态下,以达到探测微弱光信号的目的;后期信号处理电路主要用于提取APD接收到的微弱信号,经过放大、滤波等处理后送入后期信号处理电路,进而完成相应的测量任务。APD处理电路的原理如图2所示。

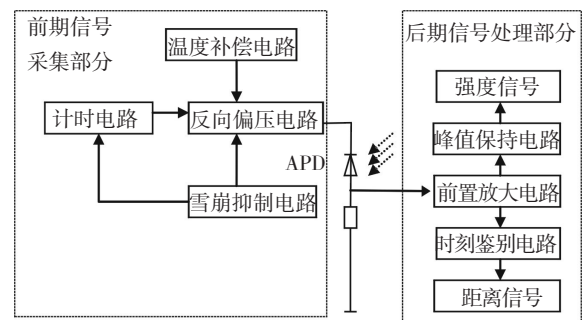


图2 APD处理电路原理图

从图2中可以看出:APD为核心器件,APD探测器将接收到的微弱激光回波信号转换成电信号;APD左侧为前期信号采集部分,依据APD探测器工作原理、自身特性及外界影响因素分别设计了该部分电路;APD右侧为后期信号处理部分,前置放大电路用于将APD输出的微弱电信号进行放大、滤波处理并提供给后期信号处理电路。其中,时刻鉴别电路的作用是对前置放大电路的输出信号进行鉴别,确定激光回波的到达时刻,产生脉冲停止信号,完成测距任务;峰值保持电路的主要作用是检测前置放大电路输出电压信号的峰值,该峰值代表激光回波信号的强度,进而完成了强度像的提取。

2.2 反向偏压电路

APD正常工作时,需要配置合适的高反向偏置

电压。不同的 APD 需要的偏置电压不同,不同环境温度下,需调整合适的偏置电压以达到最佳增益。升压原理如图 3 所示。

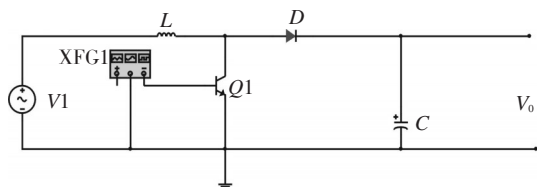


图3 电感储能式开关升压原理图

其中,三极管开关 $Q1$ 代表变换器所起的开关作用。当 $Q1$ 闭合时,电感 L 上就有电流通过而储存电能,电压极性为左正、右负,使得续流二极管截止,负载由电容 C 供给能量释放给负载;当 $Q1$ 断开时,电感 L 中的电流不能突变,电感 L 上产生的感应电动势阻止电流的减小, L 上产生的反向电动势的极性为右正、左负,使得二极管 D 导通。电感 L 中储存的能量经 D 向负载供电,维持输出电压 V_0 不变,同时还对 C 充电。只要开关频率足够高, V_0 就恒定不变。当输入电压为 V_1 时,导出输出电压 V_0 为

$$V_0 = V_1 \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} \quad (3)$$

式中, t_{on} 、 t_{off} 分别是三极管导通和截止时间。

由此得出,只要选择合适的输入电源,控制好三极管导通、截止时间就能够根据 APD 的击穿电压要求设计出理想的反向偏压电路;纹波电压处理时,匹配满足电路要求的电容、电感器件参数,设计滤波电路,另一方面做好 PCB 板级布局布线工作,进而使电压纹波达到要求。

2.3 雪崩抑制电路

雪崩抑制电路能够监听雪崩电流的来路,并实时做出反应,进而达到探测和接收光子的效应^[2-3]。雪崩抑制电路的设计准则为:(1)感应雪崩电流的前沿;(2)产生与雪崩上升沿同步的标准输出脉冲;(3)在雪崩到来时降低偏置电压,使之低于雪崩电压,从而抑制雪崩;(4)重建偏置电压到雪崩电压之上,以探测下一个光子。雪崩抑制电路设计的好坏直接影响着 APD 的探测性能,雪崩抑制电路的设计原理如图 4 所示。

雪崩抑制电路设计原理:光子探测的准备阶段,APD 和大电阻 R_1 串联等待光子事件的发生;光子触发阶段,光子到达 APD 接收光敏面并触发雪崩发生,这时,大电阻 R_1 分压事件发生,快感应级迅速的探测

到 R_1 两端的电压降,并通过外围电路使抑制开关 K_1 闭合,进而拉低 Q 点电压到 V_{low} 处,雪崩熄灭,达到雪崩抑制的目的,同时快感应级发出使能信号启动控制逻辑电路,同步计时电路启动,输出脉冲经过一个计时时间可变的计时电路进行计时,以使工作电压在一段时间内维持在熄灭水平。接着,脉冲通过复位电路使恢复开关 K_2 闭合、 K_1 断开,拉高 Q 点电压到 V_H 处,电路准备好进行下一次光子探测,雪崩抑制过程完成。增设可选门控制模块,可以通过门信号对雪崩进行抑制和恢复,这能极大减少噪声的影响。

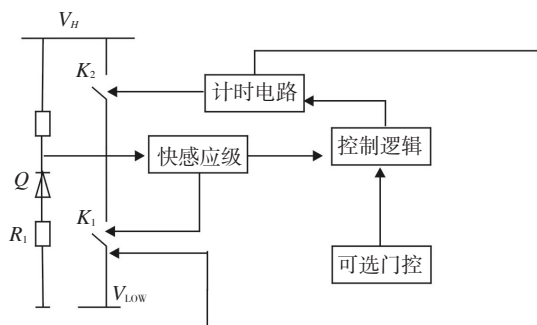


图4 无源-有源抑制电路原理图

2.4 前置放大电路

前置放大电路将接收到的光信号转换成电信号,并对电信号进行放大、滤波处理后提供给后续信号处理电路,它是整个后期信号处理系统的核心,它的性能好坏直接决定了目标距离像、强度像的好坏。实际工作过程中,光信号和电信号要受到很多噪声的干扰,通过一定的光学滤波手段可以滤去很多环境噪声,但是由于电路热噪声、光电探测器噪声等固有噪声的随机起伏是无法通过上述方法滤除的,再加之接收到的光信号和转换后的电信号通常都比较微弱,很容易淹没在各种噪声之中,所以在设计前置放大电路时,要尽量减少噪声,提高系统的信噪比。

2.4.1 放大电路设计

APD 具备微弱光信号检测能力(一般为 nA 级),根据激光雷达的距离方程可知:目标回波的光信号强度与目标特性、系统参数、大气环境、探测距离等因素有关^[4]。回波光信号的强度变化反映在电路中便是脉冲电信号的幅度波动,小幅度回波光信号不能满足峰值保持电路和恒比定时电路的 V 级探测要求;大幅度回波光信号使得接收电路饱和失真。因

此,电路的放大倍数、动态范围和带宽就成为了APD处理电路设计中必须要考虑关键指标。文中采用首级跨阻放大电路和末级AGC放大电路组合,中间加设一级无源低通滤波电路的设计思想,很好地平衡了处理电路的放大倍数、动态范围和带宽之间的关系,设计了满足系统要求的APD处理电路。

处理电路首级采用了跨阻放大电路^[5-6],实现对APD微弱光信号的 I/V 转换,同时将回波光信号和噪声信号放大,但放大倍数有限且可调,使得回波光信号没有淹没在噪声里,而且还限制了噪声信号的放大,在信号与噪声的竞争中,做出了合理的匹配;首级跨阻放大电路采用分立器件搭建,分别由4个三极管组成,输入、输出端三极管共集电极接入,使得整体电路高阻抗输入、低阻抗输出,电路效应最佳化;级间采用电抗性耦合方式,隔离了各级静态工作点,减少了静态工作点因环境变化而引起漂移的影响;电路中去噪电容的加入有效地减少了电路噪声扰动。具体的放大电路如图5所示。

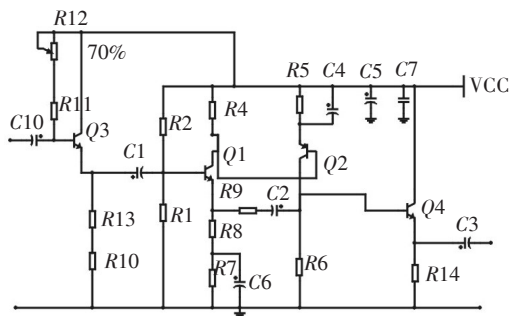


图5 首级放大电路

放大电路通频带的设计直接影响电路的性能,频带设计的过大会将过多的噪声引入电路,噪声滤除效果差;频带设计的过小能够达到很好的滤除噪声效果,但同时也会将一部分有用信号滤除掉。系统频带带宽的设计原则是:在保证信号不失真的前提下尽可能压缩带宽。

APD放大电路带宽的设计取决于探测光信号的脉冲特性及探测器件的截止频率,可通过下面的方法确定系统带宽

$$B \times \tau = 0.35 \sim 0.45 \quad (4)$$

式中, B 为系统带宽, τ 为信号光脉冲半宽。当考虑噪声时,通常取0.35,这里 τ 值取5.7 ns,则此时系统带宽约为60 MHz。

综合考虑,设计了9阶的无源低通椭圆滤波电路^[7],

截止频率为70 MHz,阻带频率在80 MHz时衰减达到60 dB,通带纹波0.2 dB,且输入阻抗100 Ω ,输出阻抗1 k Ω ,达到了系统设计的要求,滤波电路如图6所示。

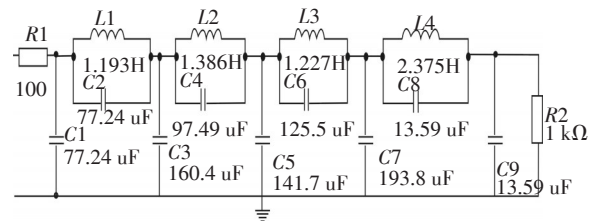


图6 中间级低通滤波电路

末级AGC放大电路^[8]采用了TI公司的增益可调放大器AD8330。AD8330放大器的性能参数如表1所示。

表1 AD8330性能指标参数表

序号	指标内容	技术参数
1	增益控制电压(V_{DIBS})范围	0 ~ 1.5 V
2	增益控制范围	0 ~ 50 dB
3	增益控制精度	30 mV/dB
4	压摆率	1 500 V/us
5	3 dB带宽	150 MHz
6	输入阻抗	1 k Ω
7	差分输出阻抗	150 Ω
8	输入信号电压范围	$V_{\text{DIBS}} = 0$ V ± 2 V $V_{\text{DIBS}} = 1.5$ V ± 6.3 mV
9	输出信号电压范围	± 2 V
10	工作电压	单电源供电 ± 5 V
11	最大功耗	1.67 W
12	工作温度范围	-40 $^{\circ}\text{C}$ ~ +85 $^{\circ}\text{C}$

跨阻放大电路为单路输出,而AD8330是差分输入、输出型放大器。因此,在AGC电路设计中进行了转换电路的设计;为消除直流偏置的影响和抑制高频噪声信号在信号输入端采用电容耦合;AD8330有增益递增和递减两种控制模式,其模式的切换可以通过对引脚MODE的高低电平实现;增益控制引脚 V_{DIBS} 在0 ~ 1.5 V之间变化,能够实现0 ~ 50 dB的动态增益的调控范围,且3 dB带宽为150 MHz,满足AGC放大电路的设计要求。AGC放大电路如图7所示。

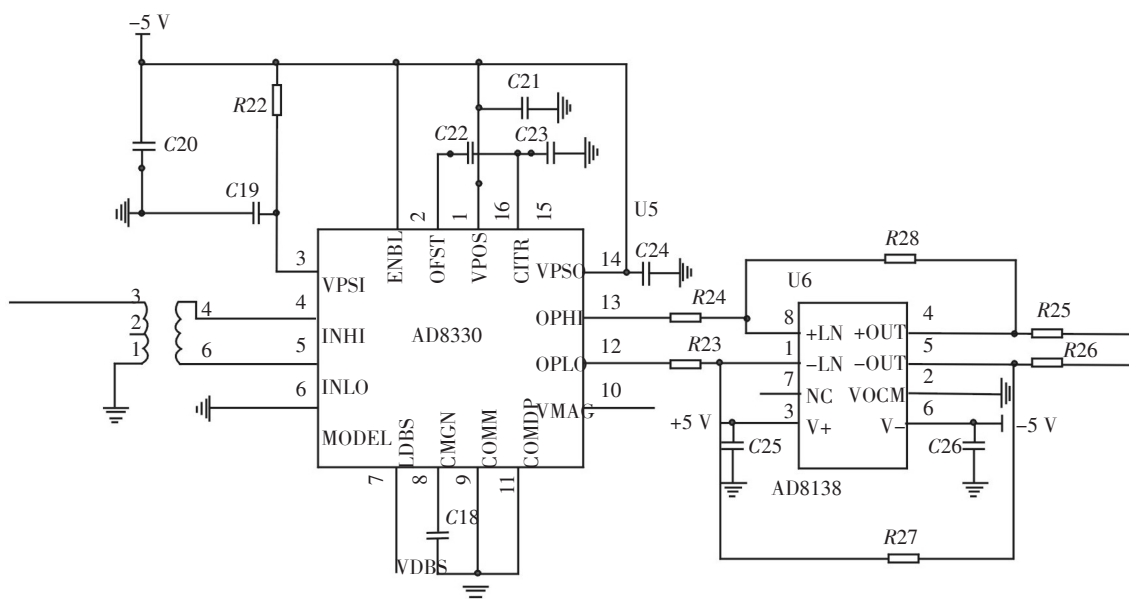


图7 AGC放大电路

2.4.2 仿真分析

基于上述电路结构和设计方法,利用仿真软件对电路的关键参数增益、带宽、幅频特性、动态范围进行了分析,仿真中的APD参数采用了日本hamamatsu公司的一款S2382型号光电探测器,室温25℃下,增益 $M=100$ ($\lambda=800\text{ nm}$)时,最大击穿电压200V,击穿电压的温漂系数为0.65V/℃。系统增益控制可通过反向偏压调节和AGC放大电路调控实现,动态范围可达60dB。前置电路的放大特性如图8所示。

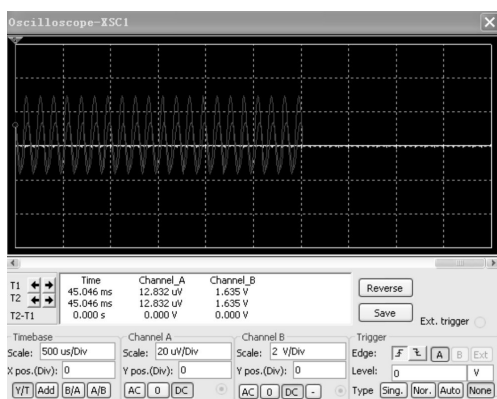


图8 前置放大电路的放大特性

APD处理电路接收到的高速光脉冲信号脉宽很窄(小于50ns),而窄脉宽信号直接对接收电路带宽提出要求。模拟测试了重频20kHz,脉宽40ns,不同上升沿的发射信号通过电路后输出信号上升沿的变化情况,由于模拟的是高速窄脉冲信号,所以根据输

出信号的上升沿变化就能得出电路的带宽。如表2所示。

表2 发射信号和输出信号的上升沿变化表

发射信号上升沿/ns	1	2	3	4	5	6	7	8
输出信号上升沿/ns	5.75	5.78	5.78	5.76	5.77	6	7	8

表2给出了不同上升沿的发射信号通过电路时对应输出信号的上升沿情况。通过仿真得出结论,发射信号的脉宽小于5ns时,输出信号的上升沿能够达到5.7ns;发射信号脉宽大于6ns后,输出信号能够复现发射信号上升沿;接收电路的脉宽稳定,接收电路的带宽约为61.4MHz。通过电路后的输出信号的波形图如图9所示。

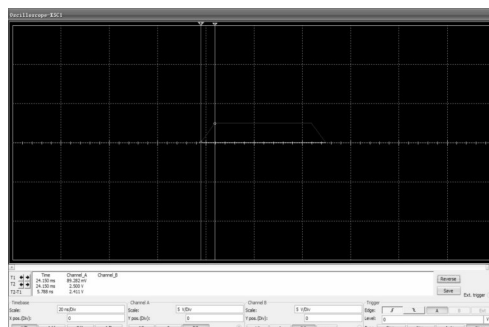


图9 输出信号的波形图

中间级滤波电路的特性直接影响系统的信噪比,运用仿真软件对设计的滤波电路进行了分析。仿真分析表明,在同等指标参数要求下,与其他滤波

电路比较,设计的椭圆低通滤波电路阶数最小,过渡带最窄,满足系统设计要求,滤波电路的幅频特性如图10所示。

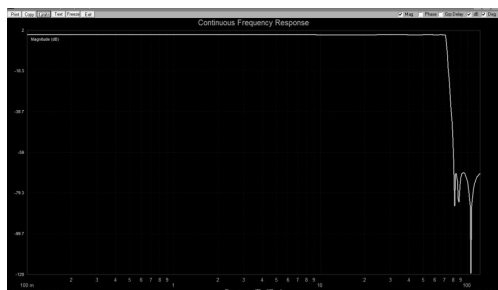


图10 滤波电路的幅频特性

3 结束语

基于APD光电探测器工作原理、自身特性及外界环境因素,研究了APD处理电路。结合APD处理电路设计原理、指标参数,设计了反向偏压电路、首级跨阻放大电路、中级低通滤波电路、末级AGC放大电路;分析了雪崩抑制电路的设计思路,且就设计电路的关键指标进行了仿真分析。仿真分析表明,设计的APD处理电路动态范围可达60 dB;电路有效带

宽61.4 MHz;中级低通滤波电路截止频率70 MHz,在阻带80 MHz处衰减达到60 dB,设计的电路有效可行,能够满足APD微弱信号检测的要求。

参考文献

- [1] 任晓东,黄民双,唐建.宽动态范围连续可调APD高压偏压电路[J].北京石油化工学院学报,2008,16(4).
- [2] 吕华,彭孝东.单光子探测器APD的外围抑制电路设计[J].科技经济市场,2007.
- [3] S Cova, M Ghioni, A Lacaita, et al. Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection [J]. Applied Optics, 1996, 35(12):1956-1973.
- [4] 戴永江.激光雷达原理[M].北京:国防工业出版社,2001:28-30.
- [5] 胡涛,司汉英.光电探测器前置放大电路设计与研究[J].光电技术应用,2010,25(1).
- [6] 松井邦彦.OP放大器应用技巧100例[M].邓学.北京:科学出版社,2005.
- [7] 宁彦卿,姚金科.电子滤波器设计手册[M].北京:科学出版社,2008.
- [8] 王强,孙志慧,倪家升,等.一种应用于脉冲激光测距系统的宽动态-高速接收电路[J].山东科学,2012,25(2).

《光电技术应用》期刊简介

《光电技术应用》期刊是中国电子科技集团公司主管,东北电子技术研究所主办,公开发行的学术性中文科技期刊。

《光电技术应用》期刊以光电系统技术为主要专业特色,传播光电子技术、光电系统应用技术专业领域的先进科技信息,报道新型科技成果,推动工程技术交流,促进行业科技进步与发展。

《光电技术应用》秉承“科学严谨,求实创新,服务读者,促进发展”的办刊方针,竭诚为国内光电系统技术研究、教学、开发及其应用领域的广大科研人员、工程技术人员、科技管理人员、高等院校师生等读者服务。特色栏目包括:综述,光电系统技术,光学设计技术,红外技术,激光技术,光电探测技术,光电器件与材料,信号与信息处理,电路与控制,测试、试验与仿真技术等。

期刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊、《中文科技期刊数据库》收录期刊、《中国期刊全文数据库》全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊、美国《乌利希期刊指南》收录期刊、波兰《哥白尼索引》收录期刊。竭诚欢迎广大读者踊跃投稿。