

## 室内可见光通信 APD 探测电路的设计与实现

郭 倩<sup>1,2</sup>, 蓝 天<sup>1</sup>, 朱 祺<sup>2</sup>, 倪国强<sup>1</sup>

- (1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081;
2. 中国人民解放军 63963 部队, 北京 100072)

**摘 要:** 室内可见光无线通信技术是随着白光 LED 照明技术的发展而兴起的无线光通信技术。在分析目前的可见光通信技术基础上, 针对室内可见光通信系统的应用需求, 设计了雪崩光电二极管 (APD) 探测电路组件。首先阐述了 APD 探测电路的工作原理, 其次详细设计并分析了系统各组成部分的电路结构及其功能, 最后对所设计的用于室内可见光通信接收子系统的探测组件进行了相关实验测试。实验结果表明: 设计有效可行, APD 探测电路具有增益高、带宽宽、温控可靠、稳定性好等优点, 对室内可见光通信系统有很好的应用价值, 为室内可见光通信系统进一步研究提供依据。

**关键词:** 可见光通信; 雪崩光电二极管; 温度控制

**中图分类号:** TN29 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0731-05

## Design and implementation of indoor visible light communication avalanche photodiode detecting circuit

Guo Qian<sup>1,2</sup>, Lan Tian<sup>1</sup>, Zhu Qi<sup>2</sup>, Ni Guoqiang<sup>1</sup>

- (1. College of Opto-Electronic, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. The Unit 63963 of PLA, Beijing 100072, China)

**Abstract:** Recently, the indoor visible light wireless communications technology is emerged companied with the blooming white light-emitting diode (LED) lighting technology. In this thesis, the current visible light communication system was analyzed and aiming at the request of application in indoor visible light communication system, an avalanche photodiode (APD) detecting circuit was designed. Firstly, the work principle of the APD detecting circuit was described. Secondly, a detailed design and analysis of the system structure and their function of the circuit components was presented. Finally, a detecting circuit component of the indoor visible light wireless communications receivers was designed, and related experiment tests were tested. Experimental results show that the design is effective and feasible, the APD detecting circuit has high gain, wide bandwidth, stable temperature control and high stability etc, therefore the detecting circuit is capable of meeting the needs of indoor visible light communication systems, provides a basis for further study on indoor visible light communication systems.

**Key words:** visible light communication; avalanche photodiode; temperature control

收稿日期: 2014-06-10; 修订日期: 2014-07-21

基金项目: 国家 973 计划(2013CB329202)

作者简介: 郭倩(1982-), 女, 工程师, 硕士生, 主要从事可见光通信方面的研究。Email: olive\_guoqian@163.com

导师简介: 蓝天(1962-), 女, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事可见光通信方面的研究。Email: lantian@bit.edu.cn

## 0 引言

室内可见光通信是一种基于白光 LED 的高速无线接入技术,是光通信和无线通信相结合的产物,它以光信号为载体,以大气为传输媒质进行光信号传送。随着近十几年来世界范围对白光 LED 照明技术的大规模应用推广,对可见光波段(380~780 nm)的通信应用研发迅速成为热点。从 2000 年开始,日本 Keio 大学的 Nakagawa M 教授等人开始从事基于室内照明灯和室外交通灯的低速率可见光通信(VLC)和定位研究<sup>[1-2]</sup>。与射频无线技术相比,VLC 可利用带宽高;具有更高的安全性和私密性;不产生电磁干扰,也无需相应频段的许可授权;能够以较低的成本实现高带宽高速率的无线通信接入;具有很好的空间复用性,极大地拓展了网络的覆盖面,是对现有射频技术的很好的补充<sup>[3]</sup>,这些特性使得 VLC 受到了广泛关注<sup>[4-8]</sup>。

室内可见光通信系统主要由信号调制编码、光源发射、传输和接收系统等部份组成。其中,接收子系统作为室内可见光通信系统的重要环节,其性能在很大程度上决定了整个系统的优劣<sup>[9]</sup>。与光电倍增管(PMT)相比,雪崩光电二极管(APD)在光通信、弱光探测和应用方面具有诸多优点:雪崩光电二极管在很宽的光谱范围内具有相当高的量子效率(80%~90%);对入射光强度的线性响应动态范围要比 PMT 高出两个量级,由于 APD 是半导体芯片探测器,容易集成,而且体积小,抗磁抗震,适用于对空间限制要求较高的场合。这些特点决定了 APD 在室内可见光通信及相关应用领域具有广阔的应用前景。

文中从 APD 检测原理出发,设计了可用于室内可见光通信系统的雪崩光电二极管探测电路并进行了相关参数的测试。

## 1 雪崩光电二极管探测电路的设计

雪崩光电二极管是工作在高反偏状态下的光电二极管:在无光照射时仅存在由热电子产生微弱的“暗电流”;当有光照时,雪崩光电二极管产生电子-空穴对,形成光电流。与普通光电二极管不同的是,通常 APD 的偏置电压比较高(几十伏到几百伏),这样电子被充分加速,从而导致半导体内原子电离,产

生新的自由电子。新电子又被电场加速,产生更多电子-空穴对,到达输出端时,每一初始光子会产生成千上万个电子,使光电流大大增加,显著提高了光探测器的灵敏度<sup>[10]</sup>。

在室内可见光通信系统中,APD 探测接收的原理框图如图 1 所示。APD 接收墙壁、室内物体等漫反射回来的微弱光信号,并转换为电流信号,经互阻放大电路转换为电压信号并放大,然后经过高通滤波电路抑制低频噪声,再送给电压放大电路进行电压放大,最后送至信号解调电路进行信号提取。其中温度控制电路确保探测器工作在恒定的温度下,使探测器工作于最佳偏置电压,从而获得最佳倍增因子。这样就可保证系统性能稳定的同时,获得较高的信噪比。文中选用美国 First Sensor 公司的 AD500-8 雪崩光电二极管。

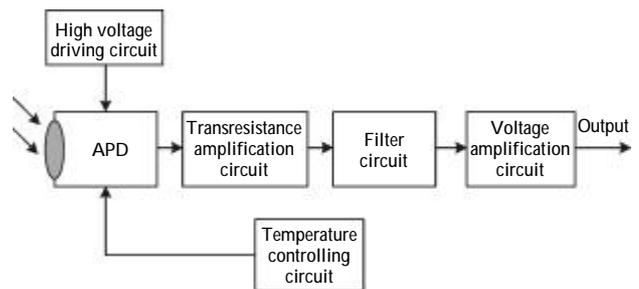


图 1 室内可见光通信接收子系统原理框图

Fig.1 Functional block diagram of receiver subsystem for indoor visible light communication

### 1.1 互阻放大电路

为了便于信号放大与处理,通常需要通过互阻放大器将雪崩光电二极管的电流输出转换为电压输出。图 2 是互阻放大器的原理图。

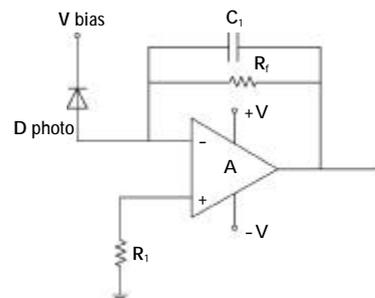


图 2 互阻放大器原理图

Fig.2 Schematic diagram of transresistance amplifier

图中运放的正向端通过电阻接地,APD 为雪崩光电二极管,反馈电阻  $R_f$  决定了增益的大小, $V_{bias}$  是反向偏置电压,它能够提高光电二极管响应的线性度,减小结电容,增大电路带宽。通常要求滤波电容  $C_1$  比 APD 的内部结电容小很多,否则  $C_1$  就会影响探测器的带宽。考虑到探测器对增益、带宽和噪声的要求,文中选用 TI 公司专门用于互阻放大器的高增益、宽带宽、低噪声运算放大器 OPA657,其增益带宽积为 1.6 GHz,输入噪声电压为  $4.8 \text{ nV/Hz}^{1/2}$ ,输入偏置电流为 2 pA,计算可知放大器的噪声系数几乎接近 1。设计时选择偏置电压为 120 V,反馈电阻  $R_f$  为 10 k $\Omega$ ,滤波电容  $C_1$  为 0.25 pF。根据雪崩光电二极管的结电容和互阻放大器的反馈电阻可计算得到系统的带宽为:

$$f_{-3dB} = \sqrt{GBP / (2\pi R_f C_D)} \quad (1)$$

式中:GBP 为运算放大器的增益带宽; $C_D$  为 APD 的内部结电容(AD500-8 结电容为 2.2 pF)。由公式(1)计算可得系统的带宽为 134 MHz。

### 1.2 滤波及电压放大电路

为了抑制低频噪声,尤其是电源噪声,选用最简单的 RC 网络构成高通滤波电路,如图 3 所示。根据图中的电路参数可知,所设计高通滤波电路的截止频率为 100 Hz,由此可滤除  $1/f$  噪声。

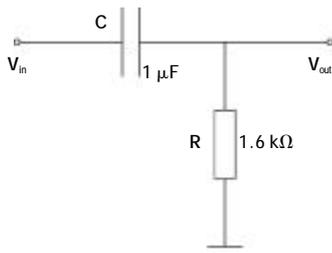


图 3 一阶无源高通滤波器

Fig.3 First-order high-pass passive filter

图 4 是所选 APD 在不同波长下的光谱响应曲线,设计中选用波长为 532 nm 的激光,其光谱响应度为 18 A/W。结合 APD 的特性参数和所设计互阻放大器的反馈电阻可知,对于互阻放大器而言,输入灵敏度为  $1.8 \times 10^5 \text{ V/W}$ ,即互阻增益约为  $1.8 \times 10^5$ 。

为了获得更大的增益,在互阻放大器滤波电路之后还需增加电压放大电路。值得注意的是,这里并不能通过无限增大互阻放大器的反馈电阻来提高增

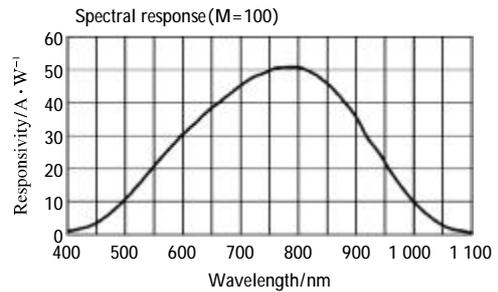


图 4 光谱响应曲线

Fig.4 Curve of spectral response of the APD

益,因为增大反馈电阻的同时减小了系统的带宽。电压放大电路有多种形式,此设计采用反相比例运算放大电路,如图 5 所示,其电压增益为  $-R_f/R_1$ 。设计中选用 AD 公司生产的低噪声运算放大器 ADA4899-1,其增益带宽积为 600 MHz,等效输入噪声电压为  $1 \text{ nV/Hz}^{1/2}$ ,输入偏置电流为 100 nA,计算可得放大器的噪声系数几乎接近 1。设计中采用两级电压放大电路串联,每一级电阻  $R_1$  为 27  $\Omega$ ,反馈电阻  $R_f$  为 270  $\Omega$ ,因此每一级的电压增益为 10。综合互阻放大器的增益可知,探测电路总的增益为  $1.8 \times 10^7$ 。

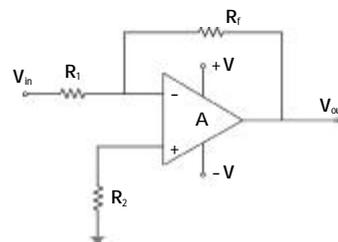


图 5 反相比例运算放大电路

Fig.5 Inverting scaling operation amplifier circuit

### 1.3 温度控制电路设计

为了使探测器工作在最佳偏置电压下工作,以获得稳定的倍增因子,必须精确控制探测器的温度。文中利用集成温控芯片 MAX1978 控制半导体热电致冷器(TEC)的制冷量,以达到精确控制探测器工作温度的目的。

MAX1978 是专为 TEC 模块设计的最小、最安全、最精确的单片温度控制器。片内的 FET 以及热控制环电路在提供高效率的同时,还尽可能地减少了外部元件。500 kHz / 1 MHz 可选的开关频率和独特的纹波消除电路在降低噪声的同时,也优化了元件的尺寸和效率。

MAX1978 直接控制的是输出电流,而不是电压,消除了浪涌电流。MAX1978 工作于单电源,通过在两个同步 buck 稳压器输出之间连接 TEC,可提供 $\pm 3A$  双极性输出。双极性工作能够实现无“死区”温度控制,从而避免轻载电流时的非线性问题。该方案通过少许加热或制冷就可避免控制系统在调整点非常接近环境工作点时的振荡现象。此外,还可通过模拟控制信号精确地设置 TEC 电流。

图 6 是基于 MAX1978 控制热敏电阻温度的原理框图。热敏电阻感知雪崩光电二极管的温度,并将相应的电压信号传送至斩波自稳零仪表放大器。该放大器将当前温度电压信号与设定的温度电压对比后,产生偏差电压,该偏差电压经积分放大器放大后,由 PWM 控制器转换为脉宽调制信号经 FET 驱动后,向 TEC 输出具有一定大小的电流,最后使目标温度逐渐趋于设定的温度。

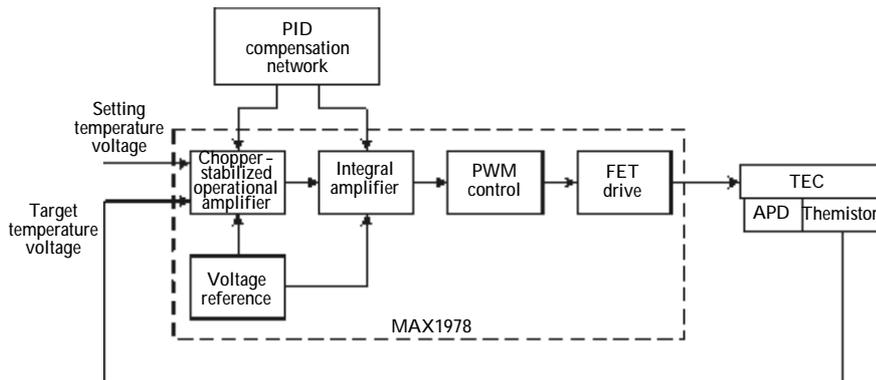


图 6 基于 MAX1978 控制探测器温度的原理框图

Fig.6 Functional block diagram of controlling detector temperature based on MAX1978

## 2 实验结果与分析

图 7 为文中设计的用于室内可见光通信接收子系统的探测组件。电路右下角为设计采用的 APD 器件,左侧为电路的高压电源部分,上边为连线接口。

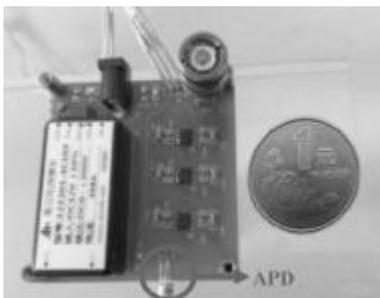


图 7 探测器的放大滤波温控组件

Fig.7 Photo of photodetector assembly consisting of amplifier, filter and temperature control circuits

图 8 为某一时间段内探测器的温度变化测量曲线。测试过程中初始环境温度为  $23.5^{\circ}\text{C}$ ,目标温度设为  $20^{\circ}\text{C}$ (由 APD 偏置电压的最佳倍增因子  $M$  决定)。由图 8 可知,在刚通电的较短时间内温度波动稍大,这是因为设定的初始环境温度与目标温度差

别较大,需要一个逐步稳定的过程。大约 76 s 后温度已稳定在设定的目标温度附近,温度波动的幅度小于  $0.1^{\circ}\text{C}$ ,这样就可以保证探测器具有稳定的倍增因子和增益。为了验证探测器的工作性能,实验时利用激光器输出的激光经斩波片调制和衰减片衰减后入射到探测器上。

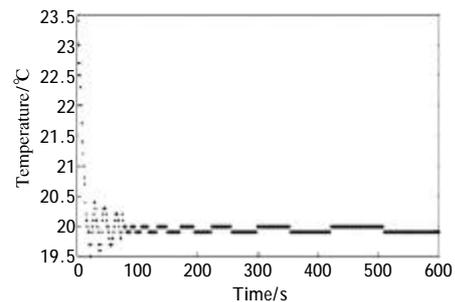


图 8 探测器温度的实测曲线

Fig.8 Experimental measurement result of detector temperature

表 1 是文中设计的探测组件与日本滨松公司的雪崩光电二极管模块的带宽及增益对比,最后一行为设计的组件参数。

目前国内用户大多采用代理或引进国外的产品模块。对比表 1 中的带宽及增益指标可知,该设计达

到国内领先、国际先进的技术水平。

表 1 不同 APD 探测器的带宽及增益

Tab.1 Bandwidth and gain of different APD detectors

Type No.	Cut-off frequency		Photoelectric sensitivity(V/W)
	Low-band	High-band	
C5331-11	4 kHz	100 MHz	$2.46 \times 10^4 (M=30, \lambda=620 \text{ nm})$
C5331-12	4 kHz	40 MHz	$1.26 \times 10^4 (M=30, \lambda=620 \text{ nm})$
C5331-13	4 kHz	20 MHz	$0.69 \times 10^4 (M=30, \lambda=620 \text{ nm})$
C5460	DC	10 MHz	$1.50 \times 10^6 (M=30, \lambda=800 \text{ nm})$
Products	DC	134 MHz	$1.80 \times 10^7 (M=100, \lambda=532 \text{ nm})$

图 9 是探测器接收的 1 kHz 光信号的输出电压和对应的频谱。由频谱图可得探测器的品质因子  $Q$  为 43.64, 结合产品参数可得探测器总功耗小于 2 W。实验结果表明,探测器的增益稳定,信号光电转换无失真,所设计的探测器可用于室内可见光通信。

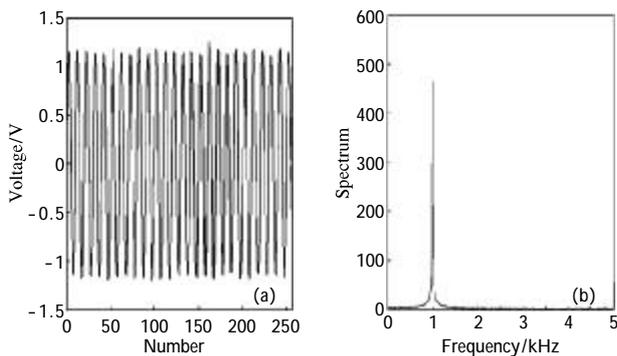


图 9 探测器输出信号及其频谱

Fig.9 Curve of detector output signal and its spectrum

### 3 结论

文中采用雪崩光电二极管和 MAX1978 设计了室内可见光通信接收子系统。实验表明,所设计的温控电路确保了 APD 处于最佳工作点,在性能稳定的同时使系统获得较高的信噪比。APD 信号接收子系统具有增益高、功耗低、可靠性好、体积小,对微弱信号的接收能力强,通信距离远的特点,在室内可见光通信等领域将具有很高的实际应用价值。

该探测器采用自主设计的信号驱动电路和放大电路,同时实现了宽带和高增益。今后的工作包括

改进电源,设计专用集成芯片进一步减小体积,优化布线结构,设计适合的电磁屏蔽,减小噪声干扰,提高输出信噪比,以满足实用化要求。

### 参考文献:

- [1] Visible Light Communication Consortium (VLCC) [EB/OL]. (2012-08-21)[2012-12-18]. [http: www. vlcc. net.](http://www.vlcc.net)
  - [2] Komine T, Nakagawa M. Fundamental analysis for visible light communication system using LED lights [J]. Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100-107.
  - [3] Brien D C O, Katz M. Short-range optical wireless communications[C]//Wireless World Research Forum(WWRF11), 2004: 1-11.
  - [4] Moreno I, Avendaño M, Tzonchev R I. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance [J]. Applied Optics, 2006, 45(10): 2265-2272.
  - [5] Grubor J, Randel S, Langer K D, et al. Broadband information broadcasting using LED based interior lighting[J]. Journal of Light Wave Technology, 2008, 26(24): 3883-3892.
  - [6] Gutsait E M. Analysis of the illuminance provided by LED modules placed at large distances from illuminated objects[J]. Journal of Communications Technology and Electronics, 2009, 54(1): 107-118.
  - [7] Ding Deqiang, Ke Xizheng, Li Jianxun, et al. Design of multi-element transmitting antenna for indoor visible light communication [J]. Journal of Applied Sciences-Electronics and Information Engineering, 2011, 29 (3): 238-242. (in Chinese)
  - [8] Yang Yu, Liu Bo, Zhang Jiankun, et al. A visible light communication system based on high-power illumination LED lamp [J]. Journal of Optoelectronics-Laser, 2011, 22 (6): 803-807. (in Chinese)
  - [9] Kong Meimei, Liang Zhongcheng, Zhang Guohu, et al. Optical receiving antenna design based on angle diversity technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41 (3): 750-754. (in Chinese)
  - [10] Tian Ziwen, Huo Lianzheng, Miao Qi, et al. Development and application of 1.54  $\mu\text{m}$  APD detector assembly [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35 (Z5): 118-121. (in Chinese)
- 田子文, 霍联正, 缪奇, 等. 1.54  $\mu\text{m}$  APD 光电探测器组件的研制及应用 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35 (Z5): 118-121.