

基于 APD 的弱光无线检测系统设计与研究

胡锐¹, 芮忠^{1*}, 董兴法², 彭丽丽³

(1. 苏州科技大学 信息化建设与管理中心, 江苏 苏州 215009;

2. 苏州科技大学 电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009; 3. 苏州科技大学 外国语学院, 江苏 苏州 215009)

摘要: 针对复杂环境下的弱光信号检测和温度影响的问题, 提出一种以 MSP430 为核心控制器、雪崩二极管 (APD) 为传感器、远距离无线电 (LoRa) 技术为数据传输的设计方案。该方案采用偏压自适应温度补偿电路, 使偏置电压随温度而变化, 从而使 APD 增益达到稳定。实验表明: 通过温度补偿电路, APD 增压受温度影响较小, 且增益稳定在 100 ± 5 dB, 同时该方案对弱光信号检测误差小于 3.92%, 且能够在某厂区 10 km 以内实时远程无线监测弱光强度变化。

关键词: 弱光检测; 远距离无线电; 自适应温度补偿; 增益稳定

中图分类号: TN29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)05-0048-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.05.012

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Design and research of low-light wireless detection system based on APD

HU Rui¹, RUI Zhong^{1*}, DONG Xingfa², PENG Lili³

(1. Information Construction and Management Center, SUST, Suzhou Jiangsu 215009, China; 2. School of Electronic & Information Engineering, SUST, Suzhou Jiangsu 215009, China; 3. School of Foreign Language and Literature, SUST, Suzhou Jiangsu 215009, China)

Abstract: Aiming at the problem of weak light signal detection and temperature influence in complex environments, a design scheme with MSP430 as the core controller, avalanche diode (APD) as the sensor and long range radio (LoRa) technology as the data transmission is proposed. This circuit uses a bias adaptive temperature compensation circuit to make the bias voltage change with temperature, so as to stabilize the APD gain. The experiments show that the APD boosting is less affected by the temperature compensation circuit and the gain is stable at 100 ± 5 dB. At the same time, the scheme detects the weak light signal with an error of less than 3.92% and can remotely monitor the weak light intensity change in real time within 10 km of a plant area.

Key words: low light detection; long-distance radio; adaptive temperature compensation; gain stabilization

0 引言

随着科技的发展, 微弱光信号检测技术的研究越来越受到人们的重视, 已被广泛应用于现代通信、工业、医疗和科研等领域^[1]。目前, 国内外市场上主要应

收稿日期: 2019-11-04。

基金项目: 江苏省现代教育技术研究 2018 年智慧校园项目 (2018-R-66953) 资助; 国家自然科学基金 (项目编号: 61472267) 资助。

作者简介: 胡锐 (1986—), 男, 研究生, 工程师, 荣获 2018 年“中国教育和科研计算机网先进个人”称号、2018 年“智慧校园建设先进个人”称号和第三届中国“互联网+”大学生创新创业大赛校赛一等奖。主持江苏省现代教育技术研究 2018 年“智慧校园”项目 (2018-R-66953)、高校智慧教室多屏交互策略及小组学习模式研究项目 (2019JSETKT066)。主要从事网络通信、光电信息与处理方面的研究, 包括光机电一体化通信系统的设计与测试以及 SDN 的智能分组传输等。

* 通信作者: 芮忠 (E-mail: rz@usts.edu.cn)。



用基于光电倍增管设计的手持式设备检测弱光信号, 但这需要现场进行检测, 对于一些复杂以及危险环境无法检测, 且光电倍增管有受温度影响较大的缺陷^[2]。雪崩二极管 (APD) 的工作偏置电压较低, 具有较高的响应度和内部增益, 从而提高了器件的信噪比, 使测量的信号更准确^[3], 其在弱光探测技术研究领域得到了人们的关注。对此, 国内的一些研究者, 如桂林电子科技大学的张良等人提出了一种基于 ADL5317 和 LM35 的偏压温度补偿电路^[4], 但该电路主要依赖芯片和电阻的精度大小, 且无法在复杂环境下实时检测弱光变化。因此, 本文提出一种基于 APD 的弱光无线检测方法, 该方法不仅能通过温度自适应偏压补偿电路使增益恒定, 而且还能通过远距离无线电 (LoRa) 技术进行数据远程传输, 便于实时检测光强度和温度变化。

1 弱光检测原理

弱光检测通常是先将光信号通过光电器件转换成电信号,再经前置放大电路放大,由模/数转换电路将模拟信号转换成数字信号进行处理^[5-8],具体的实现框图如图 1 所示。图 1 中,APD 在其工作的偏置电压下进行光/电转换,通过运算放大器进行放大处理,再经差分放大电路将电压信号转换为差分信号。主控制器通过驱动 24 位高精度模/数转换器进行差分采集,最后通过 LoRa 模块将数据传输至监控中心进行弱光信号监测。

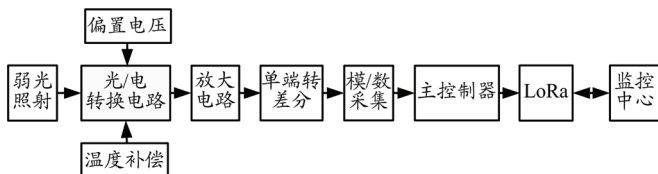


图 1 弱光检测系统框图

2 弱光检测设计方法

2.1 APD 偏压电路设计

由于 APD 正常工作范围内的偏置电压在 100~160 V 之间,而本方法所提供的输入电压为 12 V,所以需要设计升压电路,输出电压为 110 V,且要求电路设计简单,有输入级过流保护。因此,升压芯片选择 LT3757,该芯片的宽电压输入范围为 1.6~42 V,采用同一个反馈引脚来控制正输出或负输出,无需增设外部稳压器或缓慢充电迟滞起动方案,实现了电路简单化以及简单的启动和偏置。同时,本文采用一个从 V_{in} 电源引出的电阻分压器来驱动输入电源欠压闭锁(UVLO),即可轻松地实现用于排序或启动过流保护的 UVLO,具体电路图如图 2 所示。图 2 中,输出电压 V_{out} 为:

$$V_{\text{out}} = 1.6 \times \left(1 + \frac{R_8 + R_9}{R_{10}} \right) \quad (1)$$

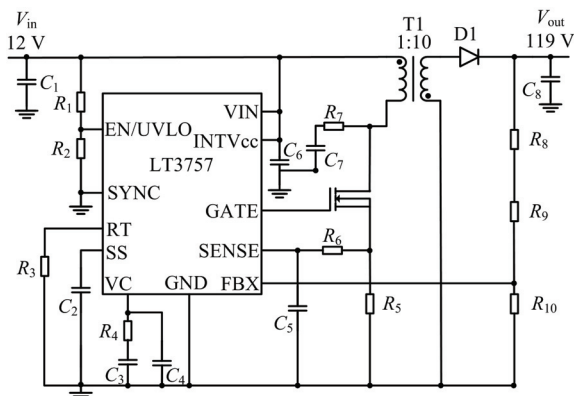


图 2 APD 偏压驱动电路

该电路可通过 R_8 、 R_9 和 R_{10} 阻值调整输出电压, 本文选用 $R_8=1\text{ M}\Omega$ 、 $R_9=84\text{ k}\Omega$ 和 $R_{10}=16\text{ k}\Omega$, 设置其输出电压为 110 V 。

2.2 APD 温度补偿方法设计

虽然 APD 优点突出,但其响应度受温度影响较大,其增益会随着温度的改变而变化。因此,需要通过温度补偿电路来达到恒定的增益^[9]。本文采用温度传感器 PT100,其阻值与温度成正比,由 PT100 的阻值表可得阻值 R 与温度 T 的关系近似为:

$$R=0.39T+100 \quad (2)$$

实验采用 10 mA 的恒流源为其供电,即可得出电压 V_T 与温度 T 的关系为:

$$V_T = 1 + 3.9T \times 10^{-3} = 1 + KT \quad (3)$$

其中, K 为温度与电压间的比例系数, 其值为 3.9×10^{-3} 。

由可调电压源反馈特性、PT100 电压与温度的关系式可以设计出温度补偿电路的原理图,如图 3 所示。当温度发生变化时同相输入端的电压值按照式(3)作相应的变化,图中虚线部分为直流减法放大电路,同相输入端电阻 R_0 、 R_1 和反向输入端 R_2 的阻抗相当。若 R_2 阻值过大,则输出阻抗过大,因此 R_2 的阻值不易偏大。为降低输出阻抗,PT100 转换电路的输出端加电压跟随器。

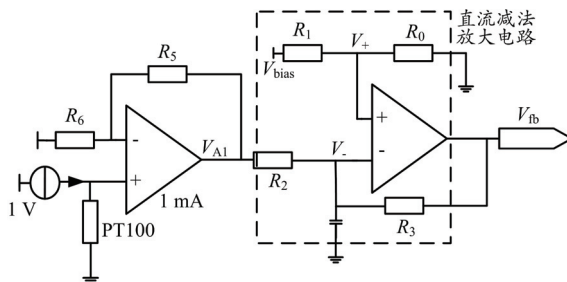


图 3 偏压温度补偿电路原理图

根据图 3 中的直流减法放大电路,由虚短虚断可求得:

$$V_+ = \frac{R_1}{(R_0 + R_1)} V_{\text{bias}} \quad (4)$$

$$V_- = \frac{(R_2 V_{fb} + R_3 V_{Al})}{R_2 + R_3} \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可得:

$$V_{\text{bias}} = \frac{(R_0 + R_1)}{(R_2 + R_3)} (R_2 V_{\text{fb}} + R_3 V_{\text{Al}}) \quad (6)$$

本文选用 S2384 APD 作为传感器,该传感器在 0℃时增益为 100 dB,所需电压为 119 V,偏压的温度敏感系数为 0.65 V/℃。所以偏压温度函数应设置为:

$$V_{bias}=119+0.65T \quad (7)$$

2.3 电流及电压信号调理方法

由于 APD 检测弱光输出的电流信号较小, 采用轨到轨运放能输出低电平噪声, 可有效抑制噪声引入, 提高信噪比。因此, 微弱电流转电压及初级放大电路芯片选择 ADI 公司的轨到轨运放, 如图 4 所示。该部分由两级运放组成: 第一级作为电流电压转换电路, 第二级是同相放大电路, 可通过滑动变阻器 R_4 进行调节放大倍数。由于差分信号的抗干扰能力强, 时序定位准确, 能够有效抑制共模信号干扰。因此, 本文通过两级运放将同相放大电路信号进行差分处理, 如图 5 所示。

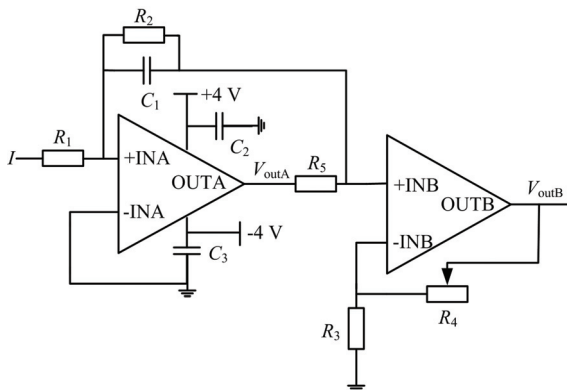


图 4 I/V 转换及初级放大电路图

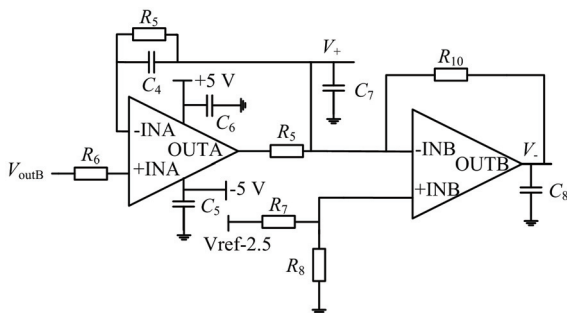


图 5 差分输出电路图

图 4、图 5 中有以下关系:

$$V_{outB} = (1 + \frac{R_4}{R_3}) V_{outA} \quad (8)$$

$$V_+ + V_- = 2.5 \quad (9)$$

其中, R_4 为 100 k Ω 滑动变阻器, $V_{outA} = R_2 I$, I 是 APD 输出的电流值。

2.4 采集方法

以往的模/数采集中使用单端采集较多, 与差分采集相比, 后者因信号受干扰, 差分的两线会同时受影响, 电压差变化不大。而单端采集时, 电压差变化较大。因此, 为了避免模数采集中接地回路干扰以及环境造成的共模干扰的影响, 本文选用差分采集芯片^[10]。该方

式采用内部含有 3 个差分模拟输入的 24 位高精度模/数转换器采集芯片, 其片内低噪声仪表放大器可通过编程控制放大倍数, 采集小信号; 当增益设置为 64, 更新速率为 4.17 Hz 时, 均方根噪声为 40 nV; 采集芯片内部的 2 个可编程电流源可以用于温度测量, 以便实时检测环境温度。采集芯片通道 1 作为电压信号差分输入端, 通道 2 作为温度采集输入端。温度传感器 R_s 选用 PT1000, 其阻值 R_s 与温度 T 之间的关系为:

$$R_s = 1000 + 3.85T \quad (10)$$

电流源采用模/数芯片内部激励电流 $I_{ad} = 1$ mA, 故温度传感器两端电压 V_s 与温度 T 之间的关系为:

$$V_s = I_{ad} \times R_s = I_{ad} \times (1000 + 3.85T) = 1 + 3.85 \times 10^{-3} T \quad (11)$$

由模/数采集芯片手册可知, 采集的电压信号与码数对应关系式为:

$$V_{in} = \frac{V_{REF} \times Code}{2^N \times GAIN} \quad (12)$$

其中, V_{in} 表示差分模拟输入电压; V_{REF} 表示基准源 (2.5 V); $Code$ 表示二进制码数; N 表示分辨率; $GAIN$ 表示模/数采集芯片内部增益。根据式 (12) 可得出模/数采集的电压值, 并结合式 (11) 可计算出温度值。为了便于观测弱光变化, 将电压 V_{in} 与光功率 W (单位为 μ W) 对应关系定义为:

$$W = K V_{in} \quad (13)$$

实验选择光照强度为 5 mW 时进行定标 (通过调节式 (8) 中 R_4 的阻值, 使得测量值与理论值相等), 可得 $K = 0.86$ 。

3 系统软件设计方法

3.1 数据传输模块设计

文献[11, 12]介绍的信号监测无线数传系统采用 SEMTECH 公司的 LoRa 模块, 该模块具有传输距离远、速度快、功耗低和抗干扰性高等优点, 可用于把主控制器处理的各类数据进行编码, 按照相应格式把数据通过无线网络方式远距离发送出去, 也可以接收控制中心的命令。主控制器与 LoRa 连接图如图 6 所示, 主控制器选用低功耗的 MSP430 系列, LoRa 与 MSP430 通过通用异步收发传输器 (UART) 进行通信^[13, 14], MSP430 可以通过控制 MDO 和 AUX 电平设置传输图。LoRa 定向传输图如图 7 所示, LoRa 点对点进行数据传输。

3.2 下位机系统设计

下位机系统设计流程如图 8 所示, 主控制器 MSP430 首先对一些功能模块进行初始化, 通过串行

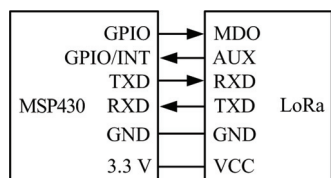


图6 主控制器与LoRa连接图

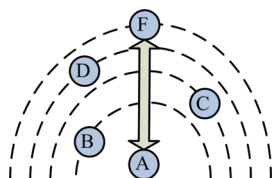


图7 LoRa定向传输图

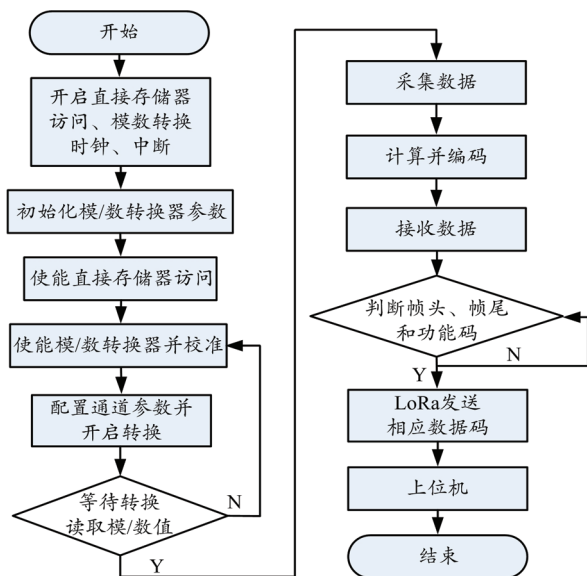


图8 下位机设计流程图

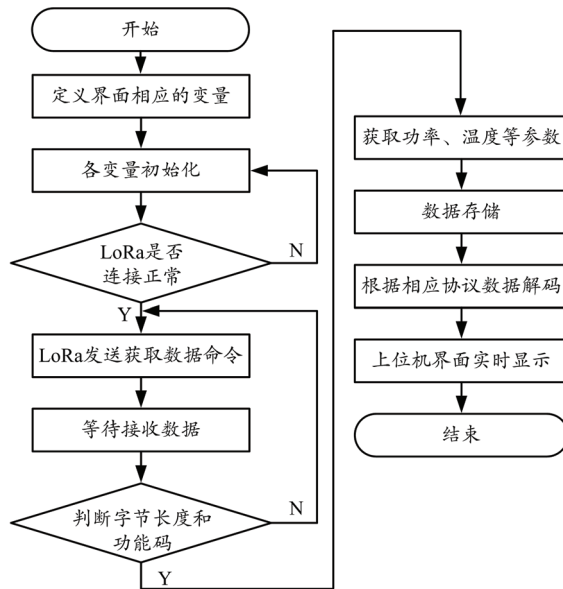


图9 上位机监测系统流程图

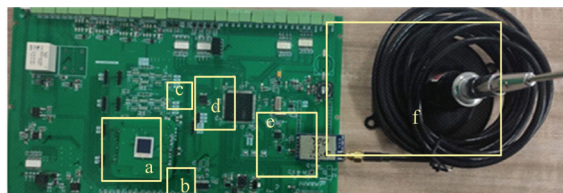


图10 基于ADP的弱光无线检测系统实物图

外设接口(SPI)接口发送相应的命令对模/数采集芯片进行初始化操作并选择相应的寄存器,设置采样速率、放大倍数、配置通道以及电流源大小等相应的参数。然后,差分采集芯片采集电压信号和温度信号并返回给单片机作相应的数据处理,根据相应的协议进行编码,当下位机接收上位机发送的命令请求时,通过LoRa将数据传输至上位机进行实时显示。

3.3 上位机系统设计

上位机监测系统流程图如图9所示,上位机先进行函数初始化操作,判断LoRa连接是否正常,然后通过LoRa发送相应参数获取命令,接收数据后判断其字节长度及功能代码,根据相应的协议进行解码,计算出相应的功率和温度值并将数据存储,最终在显示屏实时显示。

4 实验结果与分析

实验中12V开关电源为基于ADP的弱光无线检测系统提供输入电压,由温枪测温可以知道环境温度为28℃,其实物如图10所示。图中a为APD光/电转换模块,b为信号转化及差分放大电路,c为模/数采集模块,d为主控制器模块,e为LoRa模块,f为外接天

表1 实验数据表

灯光强度 /mV	V_m /mV	理论值 /mW	测量 最大值 /mV	测量 最小值 /mV	最大 误差 /%	温度 /℃	偏置 电压 /V	增益 /dB
1	0.31	0.26	0.27	0.25	3.85	28	137.2	100±5
2	0.61	0.51	0.53	0.50	3.92	28	137.2	100±5
3	0.98	0.84	0.86	0.82	2.39	28	137.2	100±5
4	1.29	1.11	1.13	1.11	1.80	28	137.2	100±5
5	1.62	1.39	1.40	1.39	0.72	28	137.2	100±5
6	2.26	1.94	2.01	1.92	2.06	28	137.2	100±5
7	3.01	2.59	2.64	2.56	1.93	28	137.2	100±5
8	3.84	3.31	2.38	3.27	2.11	29	137.9	100±5
9	5.42	4.66	4.72	4.61	1.29	29	137.9	100±5
10	6.83	5.87	5.93	5.83	1.02	30	137.9	100±5

胡锐, 芮忠, 董兴法, 等. 基于 APD 的弱光无线检测系统设计与研究

线模块。该电路的差分电压信号满足 $V_+ + V_- = 2.5 \text{ V}$ 。采用本文设计的系统在环境温度为 28°C 且在同一位置选择 10 个不同的弱光强度所测得数据如表 1 所示。可以看出, 在不同灯光下, 最大测量误差在 3.92% 以内, 且随温度变化其增益为 $100 \pm 5 \text{ dB}$ 。同时, 随着灯光强度的增加, 温度也略微上升。监控中心通过无线 LoRa 模块接收的数据, 根据公式计算出相应的弱光功率和温度值, 可实时监控弱光强度以及温度变化。根据 S2384 手册可以得出偏置电压与增益和温度之间的特性关系, 当温度为 0°C 时其偏置电压约为 119 V , 其增益为 100 dB 。

5 结束语

本文基于 APD 设计了一套弱光无线检测系统, 该系统在测量方式、偏置电压和精度等方面都有很大的改进。本文中 APD 偏置电压电路和温度补偿电路设计简单, 并采用高精度模/数转换器差分采集电路提高弱光检测的精度, 主控制器通过 LoRa 传输方式代替传统的数据线传输方式。LoRa 模块具有抗干扰性强、数据传输稳定可靠的优点, 传输距离达 10 km (测量点至监控中心最远距离)。另外, 该模块能将弱光信号实时传输至监控中心便于观测弱光变化。因此, 本文的设计可应用于工业弱光检测领域。

参考文献:

[1] 郑群生, 张理兵, 毛建智, 等. 基于光电倍增管的弱光检测电路设计

[J]. 电子世界, 2012(3): 43-45.

[2] 梁创, 廖静, 梁冰, 等. 硅雪崩光电二极管单光子探测器[J]. 光子学报, 2000(12): 1142-1147.

[3] 廉海峰. 雪崩光电二极管 (APD) 专利发展综述[J]. 数字通信世界, 2018(4): 134-135.

[4] 张良, 李思敏, 张文涛, 等. 基于 ADL5317 和 LM35 的偏压温度补偿电路设计[J]. 光通信技术, 2014, 12(15): 52-24.

[5] ZIMMERMANN R, BRAUN F, ACHTNICH T, et al. Silicon photomultipliers for improved detection of low light levels in miniature near-infrared spectroscopy instruments[J]. Biomedical optics express, 2013(4): 5-9.

[6] 李常青, 梅欣丽, 明奇. 微弱光信号检测电路的实现[J]. 应用光学, 2010, 31(5): 724-727.

[7] MARKMAN A, HEN X, JAVIDI B. Three-dimensional object visualization and detection in low light illumination using integral imaging[J]. Optics letters, 2017(42): 16-19.

[8] 郭培源, 付扬. 光电检测技术与应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016: 71, 94-95.

[9] 吴国秀, 段发阶, 郭浩天. 基于 TPS40210 的 APD 偏压温补电路设计[J]. 电子设计, 2015, 23(3): 119-122.

[10] 李方方. 微弱信号检测与采集技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

[11] 原群盛, 钱松荣. 基于 STM32 动态监测系统的设计[J]. 液晶与显示, 2016, 31(7): 681-685.

[12] 于涛. 紫外临边探测光谱仪通讯与数传系统的设计与实现[J]. 液晶与显示, 2017, 32(12): 981-986.

[13] 龚天平. LoRa 技术实现远距离、低功耗无线数据传输 [J]. 电子世界, 2016, 10(82): 115-117.

[14] HARDIE M, HOYLE D. Underground Wireless Data Transmission Using 433MHz LoRa for Agriculture [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019(19): 19-23.

《光纤通信原理》书讯

由中国“光纤之父”、中国工程院资深院士赵梓森作序推荐, 由原武汉邮电科学研究学院教授级高级工程师、硕士导师胡先志撰写的《光纤通信原理》一书, 已于 2019 年 8 月由武汉理工大学出版社正式出版并上市销售。

该书是作者 38 年从事光纤通信技术科学研究与教学工作的经验总结。该书系统且全面地阐述了光纤传输理论、光纤性能特点、光缆结构特点、光源 (结构、原理与性能)、光电检测器 (结构、原理与性能)、光网络组网关键器件 (结构、原理与功能)、波分复用传输系统 (组成、工作原理、关键技术与应用实例)、光传送网、自动交换光网络、分组传送网、光纤接入网和光纤通信前沿研究等内容。图书精品装 16 开, 字数 492 千字, 定价 128 元。

该书的特点是, 一、内容新颖。书中内容都取材于国内外最新研究成果; 二、图文并茂。作者以简练的文字和直观形象的图表, 便于读者掌握所学内容; 三、实用性强。书中内容介绍注意以基本概念、基本原理和关键技术为主线, 同时列举了一些工程应用实例。四、目的明确。本书的读者定位是通信工程专业本科生和从事光纤通信技术工作的工程师。

购书联系方式:

1. 责任编辑 黄春 手机: 13807129599; 电子邮箱: 1437534722@qq.com

2. 出版社 地址: 武汉市洪山区珞狮路 122 号 邮政编码: 430070

网址: <http://www.wutp.com.cn>

E-mail: chenjd@whut.edu.cn