

基于紫外 LED 阵列的调制光产生及应用技术

王少水 孙权社 赵发财 韩 忠

中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555

摘要 主要介绍了紫外气体放电灯、紫外 LED、紫外激光器的工作原理及其优缺点,利用紫外 LED 阵列作为发光元件,研制了紫外调制光源,可产生不同调制速率和不同占空比的标准紫外调制信号,最终通过光纤输出,实现光功率的量值溯源。实验结果表明,紫外调制光源的光纤输出耦合效率约为 8%,最高调制速率大于 2 MHz,满足目前紫外光通信接收机灵敏度的测试要求。

关键词 激光光学; 紫外 LED; 紫外光通信; 接收机灵敏度; 量值溯源

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s114009

Generation and Application Technology of Modulated Light Based on Ultraviolet LED Array

Wang Shaoshui Sun Quanshe Zhao Facai Han Zhong

41st Research Institute of CETC, Qingdao, Shandong 266555, China

Abstract Working principle, advantages and disadvantages of ultraviolet (UV) discharge lamp, UV LED and UV laser are introduced. UV modulated light is developed using UV LED as the original light, can produce standard UV modulation signal with different modulation rates and different duty ratios. In order to solve traceability of optical power, the modulated light is outputted by optical fiber. The experimental results show that the modulated light meets the requirements of UV communication receiver sensitivity test, whose optical fiber output coupling efficiency of UV source modulation is about 8%, and the maximum modulation rate is higher than 2 MHz.

Key words laser optics; ultraviolet LED; ultraviolet communication; receiver sensitivity; traceability

OCIS codes 140.3460; 140.3580; 140.3610; 140.7240

1 引言

紫外光通信作为一种新型的军事通信系统,具有抗干扰能力强、保密性好、非视距通信、全方位通信等优点,成为国内外军事技术人员研究的焦点^[1]。在紫外光通信系统中,紫外光的调制与接收是紫外光通信与其他常用通信方式的主要区别所在^[2-3],国内工程化的接收机多采用日盲型光电倍增管(PMT)或雪崩光电二极管(APD)作为探测器^[4],并在探测器前放置窄带滤光片,以达到抑制背景光的目的。选用不同类型的探测器和滤光片对接收机的光谱灵敏度具有较大影响。

我国紫外光通信系统的相关研究机构对收发端机的参数定义、技术指标尚未达成一致,紫外光通信接收端机灵敏度的校准在国内仍处于空白。为了提高通信距离,减小误码率,需要在紫外光通信系统研制过程中和交付使用之前对接收机的灵敏度进行校准/检测,由于接收机只能处理调制信号,对接收机灵敏度进行校准时需要采用功率和调制速率已知的紫外光调制信号作为激励。本文分析了常用紫外光源的工作原理、优缺点及其在紫外光通信中的应用,以紫外 LED 阵列作为发光元件,研制了量值可溯源的调制光源,并对某紫外光通信型号产品进行了测试。

2 实验装置及原理

灵敏度是指测量仪器的响应变化与相应的激励变化的比值,由此将紫外光通信接收机的灵敏度定义为

收稿日期: 2015-01-05; 收到修改稿日期: 2015-03-04

基金项目: 技术基础科研项目(J312012B002, J312011A003)

作者简介: 王少水(1985—),男,硕士,工程师,主要从事光电子计量校准方面的研究。E-mail: eiqd@ei41.com

接收机输出电压与输入光功率的比值,记为 R ,计算公式为

$$R = U/P, \quad (1)$$

式中 R 为接收机灵敏度, U 为接收机输出电压峰峰值, P 为入射调制光峰值功率。

设计的接收机灵敏度校准装置主要由紫外调制光源、紫外光功率计、紫外衰减器等部分组成,测量原理如图 1 所示,调节紫外光衰减器使接收机处于非饱和状态,记录接收机电压值,然后利用紫外光功率计测试紫外调制光源光功率,利用(1)式计算得到接收机灵敏度。

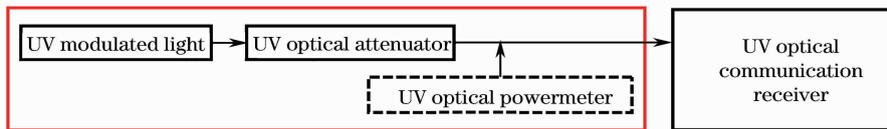


图 1 紫外光通信接收机灵敏度校准原理框图

Fig. 1 Block diagram of calibration device of UV communication receiver

校准装置中紫外光衰减器和紫外光功率计的制造技术均已成熟,而且紫外光功率计的量值可通过陷阱探测器溯源至低温辐射计,因此研究重点是紫外调制光的产生及其检测技术。

2.1 紫外光源的选择

根据不同的发光原理,紫外光源可分为紫外气体灯、深紫外 LED 及紫外激光器,由于实验研制的调制光源用于接收机的灵敏度校准,所以必须具备窄线宽、稳功率、量值可溯源等特性。

紫外气体灯利用气体分子被激发后产生的一系列特征谱线而发光,具有多线谱或宽光谱的特性,不便于光功率的量值溯源;而且气体灯调制速率达到一定值后会产生连火现象,无法满足高调制速率的校准要求。LED 是通过 PN 结中电子和空穴复合时产生的能量发光,其中深紫外 LED 一般采用 AlGaIn 作为外延材料,具有窄线宽、体积小、低压驱动、数字调制等特点^[5-7]。不足之处在于电光转换效率较低,约为 2%;发散角太大,不便于光功率测量,可通过采用阵列工作模式及光纤耦合输出等方式解决其不足。紫外波段激光器的输出波长主要有 266、325、355、375 nm 等,其中日盲区波段的 266 nm 激光器产生的典型模式是以 808 nm 激光二极管抽运得到连续单纵模的 1064 nm 基频激光,经过两次倍频得到 266 nm 激光,线宽窄、发散角小,便于量值溯源,但是价格昂贵、体积大^[9-10]。

综上所述,从技术和经济两方面考虑,选择紫外 LED 阵列作为发光元件研制调制光源,为了解决紫外 LED 阵列发散角大导致光功率溯源困难的问题,将紫外 LED 光辐射耦合至紫外光纤。

2.2 紫外 LED 调制光源

整个系统由上位机系统、控制电路、调制电路、紫外 LED 光源、供电电源和光纤耦合等组成,系统设计框图如图 2 所示。

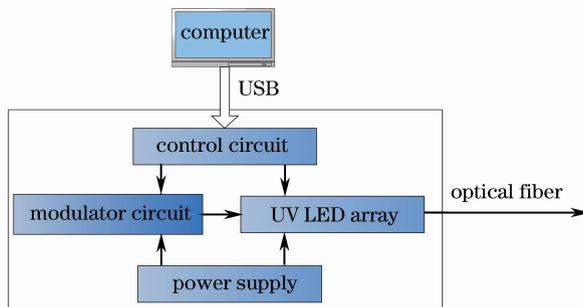


图 2 紫外调制光源系统总体结构框图

Fig. 2 Block diagram of UV modulated light system

2.2.1 上位机系统

上位机系统包括工业电脑及其中运行的软件控制系统,为测试接收机在不同通信速率下的灵敏度,可通过软件系统设置不同的调制速率(300、1200、9600、115200、921600、2211840 Hz),同时可以设置不同的占空比(30%、50%、70%)。

2.2.2 电学系统

1) 供电电源:调制电路和 LED 驱动电路都需要供电,需要将 220 V 交流电转化为相应的直流电源。由于调制电路和 LED 驱动电路在电压等级和驱动等级上的差异,在设计中将分别供电。对于调制电路,使用变压器和专为调制电路设计的电源处理板供电;而对于 LED 驱动电路,则使用开关电源模块将 220 V 交流电转化为高压直流电输出^[11],如图 3 所示。

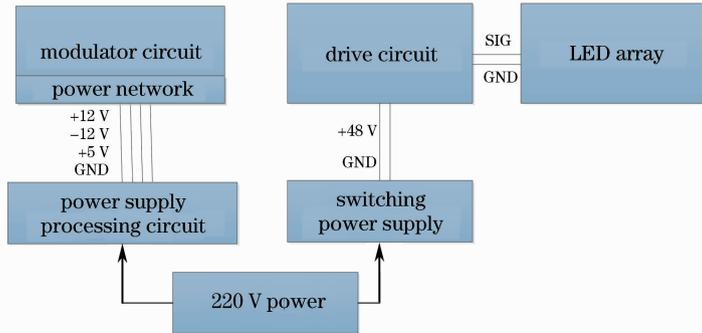


图 3 电源网络结构图

Fig. 3 Block diagram of power network

2) 调制电路:电路系统中的核心模块,需要在实现与上位机通信的同时完成所需信号波形的生成与处理。选用 Xilinx 公司 XC6SLX75 型号现场可编程门程序(FPGA)作为核心器件,并结合外围电路实现调制和波形整形的功能,电路设计原理如图 4 所示。外围电路中 FLASH 芯片 M25P64 用于存储程序,隔离芯片 CBTD3384 和 74LS14 用于信号电平的隔离和转换,USB 解码芯片 CH341A 用于 USB 通讯协议的转换,射频信号 SMA 插头用于连接 LED 驱动板。

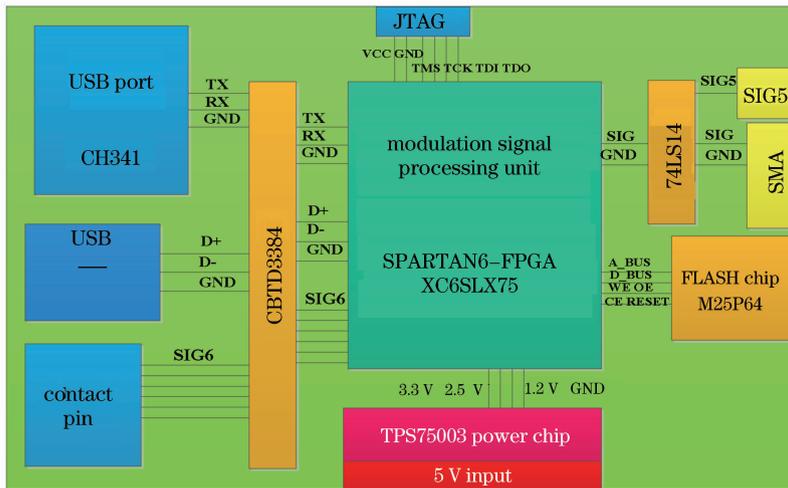


图 4 调制电路框图

Fig. 4 Block diagram of modulation circuit

3) 驱动电路:主要作用是依照调制电路产生的信号波形对紫外 LED 阵列进行驱动,选用 TI 的 LM3402 LED 驱动芯片,输入电压支持 6~76 V、电流上限为 500 mA,芯片上限工作温度为 125 °C,并有过热保护功能。电路原理如图 5 所示,为了保证高速开关 LED 阵列,输出端未加任何电容元件。

2.2.3 光纤耦合系统

选用的紫外 LED 阵列是青岛杰生电气有限公司生产的 DUV265-AR36-C-N 型号产品,由 36 颗小型 LED 组成,尺寸约为 9 mm×7 mm,发散角大于 60°。光功率计的探测器直径为 10 mm,导致紫外 LED 阵列的光功率无法利用光功率计准确测量。光纤输出方式便于光路调整,圆形光斑有利于光功率的测试。面阵面积和发散角较大给聚束带来了较高的难度;同时光纤耦合技术对机械的精度要求很高。

1) 耦合光纤的选择

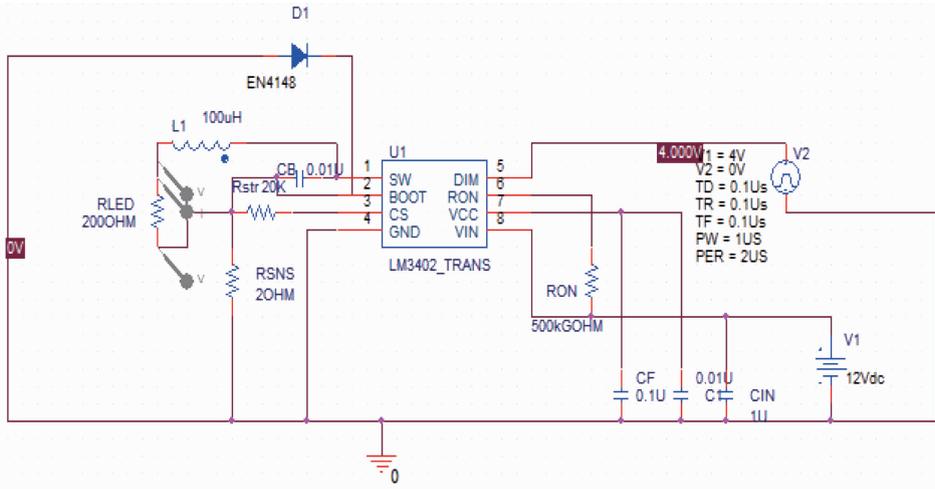


图 5 LED 驱动电路原理图

Fig. 5 Principle diagram of drive circuit

按照光纤纤芯折射率分布情况,可以将光纤的种类分为渐变折射率光纤和阶跃折射率光纤。与渐变折射率光纤相比,阶跃折射率光纤的数值孔径不会随着 LED 光源距光纤端面的距离变化而变化,且实际接收角略大于理论接收角。市场上常用的阶跃折射率光纤结构有石英材料、聚碳酸酯(PCS)材料、全塑料材料,鉴于只有石英材料能够透射深紫外光,最终选择石英材料的阶跃折射率光纤作为耦合光纤。

2) 光纤耦合方法

光源与光纤的耦合方式有两种,直接耦合与间接耦合。直接耦合是将光源直接无限接近被耦合的光纤端面。间接耦合是通过光学元件将光源发射的光进行光束整形使其满足光纤的数值孔径。

紫外 LED 阵列采用直接耦合的难度较大,采用两组透镜组合的方式将 LED 阵列的光辐射间接耦合至直径为 3 mm 的光纤束中,耦合装置原理如图 6 所示。光纤束示意图如图 7 所示,光纤束中单根光纤的直径为 0.05 mm。

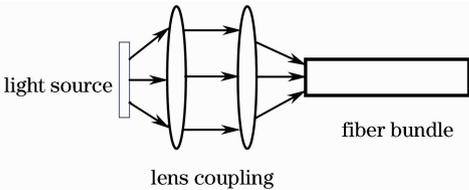


图 6 光纤耦合示意图

Fig. 6 Schematic diagram of fiber coupling

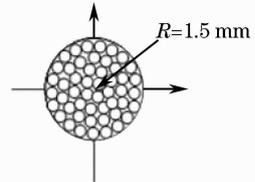


图 7 光纤束示意图

Fig. 7 Schematic diagram of fiber bundle

3) 光纤耦合系统整体设计

经过以上讨论,确定了基于光纤束光学耦合系统中光纤束的设计和选择,在整体设计光纤耦合系统时,



图 8 光纤耦合装置实物图

Fig. 8 Object photograph of optical fiber coupling device



图 9 基于紫外 LED 调制光源实物图

Fig. 9 Object photograph of modulated light based on UV LED

还应该注意系统中光源和光纤束的机械匹配度。耦合装置如图 8 所示,调制光源整机实物如图 9 所示。

整个装置主要由 LED 阵列、耦合透镜和光纤透镜组成,通过耦合透镜对 LED 阵列发出的光进行聚焦,将激光耦合进光纤束中。耦合时要注意耦合透镜与光纤束的数值孔径相匹配,否则会带来很大的能量损失。

3 实验结果分析

3.1 调制光源光电参数测试

实验主要完成调制光源在不同调制速率下的中心波长、3 dB 带宽、调制速率、平均功率等参数的测试。

中心波长和 3 dB 带宽测试仪器采用美国 PI 公司生产的 ARC-SP 2555 光栅光谱仪(使用之前需要利用低压汞灯标定波长),测试结果如表 1 所示,中心波长在 266 nm 附近,3 dB 带宽小于 10 nm,整个光谱均在日盲区范围内,满足紫外光通信接收机校准要求。

表 1 紫外调制光源波长参数测试结果
Table 1 Results of wavelength of modulated light

Modulation rate / Hz	300	1200	9600	115200	921600	2211840
Central wavelength / nm	266.4	266.2	266.2	266.0	266.0	266.0
3 dB bandwidth / nm	9.8	9.7	9.8	9.8	9.7	9.4

调制速率测试装置采用 THORLABS 公司生产的 PDA10A-EC 型高速探测器作为光电转换器件,输出信号接示波器,不同调制速率下的测试结果如表 2 所示,测量值与设定值保持一致,但是当频率为 2.21184 MHz 时,信号已发生畸变,如图 10 所示。与紫外 LED 阵列相比,单颗 LED 的调制速率能够达到更高,图 11 为单颗紫外 LED 在 10 MHz 调制频率下的波形图。这主要是由于紫外 LED 阵列采用多颗 LED 串并联相结合的方式封装,导致结电容变大,频响随着调制速率的增大而变差。

表 2 紫外 LED 阵列调制速率测试结果
Table 2 Results of modulation rate of UV LED array

Set value / Hz	300	1200	9600	115200	921600	2211840
Measured value / Hz	300	1200	9600	115200	921600	2211840

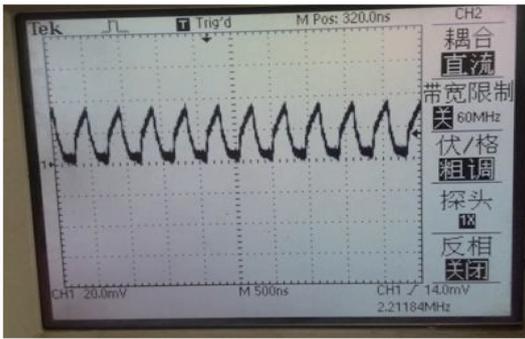


图 10 紫外 LED 阵列调制速率(2.21184 MHz)

Fig. 10 Graph of modulation rate of UV LED array at 2.21184 MHz



图 11 单颗紫外 LED 调制速率(10 MHz)

Fig. 11 Graph of modulation rate of a single UV LED at 10 MHz

表 3 紫外调制光源输出光功率测试结果

Table 3 Results of optical output power of UV modulated light

Modulation rate / Hz	300	1200	9600	115200	921600	2211840	
Mean power / mW	Space output	2.11	2.08	2.07	2.13	1.59	1.37
	Fiber output	0.17	0.17	0.16	0.17	0.12	0.11

平均光功率测试仪器采用以色列 OPHIR 公司生产的 VEGA 型功率计,并配以 PD300R-UV 型探头,紫外调制光源在占空比为 50%、不同调制速率下的平均功率测试结果如表 3 所示,光纤耦合效率较低,约为 8%,由于紫外光通信接收机的灵敏度很高,可检测到微瓦甚至纳瓦量级的光,调制光源光纤输出光满足接收机灵敏度校准需求。

3.2 接收机灵敏度测试

利用实验研制的紫外调制光源对某型号紫外光通信接收机(通信速率为 9.6 kbps)灵敏度进行测试,按图 1 连接设备,紫外调制光源占空比设置为 50%,调制速率设置为 9600 Hz,调节紫外光衰减器使接收机处于非饱和状态,记录接收机的输出电压峰峰值,然后利用紫外光功率计测试入射光功率,测试结果如表 4 所示,接收机灵敏度达到 $5.24 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

表 4 接收机灵敏度测试结果

Table 4 Results of receiver sensitivity

Input optical power P / W	Output voltage U / V	Sensitivity $R / (\text{V} \cdot \text{W}^{-1})$
1.04×10^{-6}	5.45	5.24×10^6

4 结 论

以紫外光通信接收机灵敏度校准技术研究为出发点,重点对现有紫外光源的工作原理进行了介绍,对其在紫外光通信接收端机校准中的适用性进行了分析,最终选用紫外 LED 阵列作为发光元件实现了紫外标准调制光信号的产生,并对国内某紫外光通信型号产品的接收机进行了测试,对紫外光通信接收端机的研制具有一定的指导意义。

由于紫外 LED 阵列的耦合难度较大,实验中紫外光耦合效率仍然偏小,后期可考虑单颗 LED 耦合后再聚束的方案,可以提高耦合效率,同时调制速率也能达到 10 MHz 量级。随着紫外 LED 制作工艺的不断发展,采用紫外 LED 作为紫外光通信发射机光源将会是一种趋势,该研究工作对便携式紫外光通信系统的研制具有重要意义。

参 考 文 献

- Zhao Mingyu. Characteristics of Atmospheric Propagation and Modulation Research for UV Communication [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013.
赵明宇. 紫外光通信大气传输特性和调制技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2013.
- Lan Yuzhen, Xiao Shali, Luo Yijun, *et al.*. Reasearch of transmission and modulation technology in solar blind UV communication system [J]. Optoelectronic Technology, 2007, 27(3):206-211.
蓝玉侦,肖沙里,罗亦军,等. 日盲紫外光通信系统发射及调制技术研究[J]. 光电子技术,2007,27(3): 206-211.
- Peng Guanghui, Shi Jun, Lü Fengfei, *et al.*. UV communication system based on improved FSK modulation[J]. Optical Communication Technology, 2013, 37(7):56-59.
彭光辉,施 军,吕凤飞,等. 基于改进型 FSK 调制的紫外激光通信系统[J]. 光通信技术,2013,37(7):56-59.
- Wang Rongyang, Yuan Yonggang, Li Xiangyang. Design and realization of APD-based UV speech communication system [J]. Optical Communication Technology, 2011, (10): 24-27.
王荣阳,袁永刚,李向阳. 基于 APD 的紫外光语音通信系统设计[J]. 光通信技术,2011,(10):24-27.
- Zheng Nina, Xie Pinhua, Ling Liuyi, *et al.*. Detection of atmospheric SO₂ and O₃ using optical fiber coupling long-path differential optical absorption spectroscopy system with UV light emitting diodes[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3):0301007.
郑尼娜,谢品华,凌六一,等. 紫外 LED 光纤耦合长程 DOAS 系统监测大气 SO₂ 和 O₃ 的研究[J]. 光学学报,2013,33(3):0301007.
- Wang Xi, Xiao Shali, Zhao Ming, *et al.*. Short-wavelength ultraviolet communication transceiver system based on field programmable gate array [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(s2): 272-276.
王 玺,肖沙里,赵 明,等. 基于现场可编程门阵列的短波紫外光通信发射系统[J]. 中国激光,2009,36(s2):272-276.
- Zhao Ming, Xiao Shali, Wang Xi, *et al.*. Communication system based on deep LED[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(4): 040602.
赵 明,肖沙里,王 玺,等. 基于 LED 的紫外光通信系统研究[J]. 激光与光电子学进展,2010,47(4): 040602.
- Wang Lihui, Wang Xiaokun. New method to improve sensitivity of ultraviolet communication system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(12):120-123.
王丽辉,王孝坤. 提高紫外光通信系统灵敏度的新方法[J]. 激光与光电子学进展,2009,46(12):120-123.
- Zhao Ming. Study on Receiver of High Data Rate Ultraviolet Communication System[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
赵 明. 高速率紫外光通信系统接收端研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.
- Guo Wenji, Yan Jiqing, Tang Yi, *et al.*. A high speed UV communication method and system [J]. Optical Technique, 2012, 38(2): 240-243.
郭文记,闫吉庆,唐 义,等. 一种低重频高码率紫外光通信方法和系统[J]. 光学技术,2012,38(2): 240-243.
- Zhou Dongqin. The Key Technology Research of Vehicle LED Array Intelligent Adantage Drive[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
周冬芹. 车用 LED 阵列高效智能驱动的关键技术研究 [D]. 重庆:重庆大学,2011.