

文章编号 1004-924X(2016)增-0006-06

并行雪崩光电二极管阵列红外单光子探测系统

李 臻, 雒 超, 路腾腾, 耿 霄, 徐 军*, 易 波

(中国科学技术大学 物理系, 安徽 合肥 230026)

摘要: 为了克服 InGaAs/InP APD 单光子探测器的后脉冲效应, 减小 APD 器件的死时间, 设计了一种并行 APD 阵列结构的红外单光子探测系统。该系统使用并行 APD 阵列将单光子信号转换成雪崩电信号, 利用直流偏置电压电路使并行 APD 阵列工作于盖革模式, 利用高速脉冲门控时序信号电路以及多通道光开关实现并行 APD 阵列的通道时序切换功能, 并行 APD 阵列输出的雪崩电信号在经过信号探测电路的低通滤波和宽带放大处理后, 由信号模拟数字转换电路转换成数字信号, 再由信号处理电路进行甄别探测和计数, 最后输出各种类型的数字信号。实验结果表明: 使用 1.6 GHz 的脉冲门控信号频率进行测量, 8 通道的并行 APD 阵列结构的红外单光子探测系统的重复频率为 1 000 MHz, 暗计数率为 5.92×10^{-5} , 探测效率为 10.0%。该系统大幅度减小了死时间, 有效提高了单光子探测的工作频率和重复计数率。

关键词: 雪崩光电二极管; 红外单光子探测器; 后脉冲效应; 并行阵列

中图分类号: TN215; TN364.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0006

Infrared single photon detection system based on parallel avalanche photodiode array

LI Zhen, LUO Chao, LU Teng-teng, GENG Xiao, XU Jun*, YI Bo

(Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

* Corresponding author, E-mail: xujung@ustc.edu.cn

Abstract: To overcome the after-pulse effect of InGaAs/InP APD single-photon detector, reduce the dead time of APD devices, and improve the operating frequency and detection efficiency of infrared single-photon detector, a parallel APD array was adopted to convert the single-photon signal into the avalanche signal. Through a DC bias voltage circuit, the parallel APD array can operate in the Geiger Mode. By virtue of the high-speed pulse gating sequence signal circuit and multi-channel optical switch, the parallel APD array was able to achieve the sequential switching function. The avalanche signal output from the parallel APD array, after being processed by low-pass filtering and broadband of signal detection circuit, was converted into digital signal through the signal-simulation digital conversion circuit; and then through discrimination detection and counting by the signal processing circuit, digital signals of different types can be output. The results show that when the pulse gating signal frequency is 1.6 GHz, the repetition frequency of the infrared single-photon detection system with parallel APD array of 8 channels is 1000 MHz, with a dark count rate of 5.92×10^{-5} and a detection efficiency of 10.0%. The infrared single-photon detection system with parallel APD array can dramati-

收稿日期: 2016-05-28; 修订日期: 2016-06-12.

基金项目: 国家自然科学基金青年资助基金 (No. 61308013)

ically reduce the dead time, and effectively improve the operating frequency and repetition count rate of single-photon detection.

Key words: avalanche photodiode; infrared single-photon detector; after-pulse effect; parallel array

1 引 言

红外单光子探测器作为一种重要的微弱光电信号检测技术,在量子信息技术中具有广阔的应用前景。目前量子信息技术的研究中,采用单光子作为量子信息载体,因此需要使用高效率可靠的单光子探测器来探测携带量子信息的单光子,并转换为电信号输出,然后通过符合测量、计数等手段提取其量子信息或实现量子密钥分配等通信任务。红外单光子探测器是量子信息技术领域最关键的器件之一^[1-5]。

目前,红外单光子探测器主要利用 APD 器件进行光电探测,其原理是利用光生载流子的光电效应,结型半导体器件在接收到单个光子时,借助强电场作用产生载流子的雪崩倍增效应,从而获得高灵敏的微弱雪崩信号,由此发展出一些特殊的光电信号处理方法。这些方法在实际量子密码通信系统中得到实际应用。此外还有一些其它的探测方法,比如光电倍增管探测器、光子频率上转换和超导单光子探测器等^[6-11]。光电倍增管利用外光电效应进行光探测,对波长超过 $1\ \mu\text{m}$ 的光的探测效率很低,小于 1%,这使得它在红外测量领域几乎没有实用价值。光子频率上转换的探测方法是将红外波段的单光子转换为可见光波段的单光子信号,使用高增益的硅基雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)进行探测,但其背景噪声导致暗计数很大,成本相对较高。超导纳米线红外单光子探测器是在超薄超导材料上构造纳米曲折线结构,利用超导纳米线条对单光子辐照的高灵敏度响应来实现单光子探测,超导红外单光子探测器具有暗计数小、时间抖动小、工作频率不受限制等优点,但是由于探测器的光敏感元件的工作温度为 4 K 左右,因此需要庞大复杂的冷却装置。此外,其探测效率也很低仅为 1.4%,由此限制了这种技术在实际的高速量子通信网络中的推广应用。基于 InGaAs/InP APD 器件的红外单光子探测器具有响应速度快、探测灵敏度

高、暗计数率低、计数重复率高、成本低、实用性强等优点。近年来,InGaAs/InP APD 作为异质结化合物半导体器件在器件工艺和结构上均取得了较大进展,性能指标得到提高,并且已经商用化。随着器件性能的改善和微弱信号检测电子学方法的发展,基于 InGaAs/InP APD 的单光子探测器仍然是未来高速红外单光子探测技术的主流方法^[12]。

由于 InGaAs/InP APD 材料中存在一些缺陷,这些缺陷容易成为载流子的俘获中心。载流子被俘获中心俘获,经过一段时间后释放出来,会产生雪崩信号,即后脉冲效应。目前的主要解决方法是设置一定的死时间,即雪崩被抑制后的一段时间内,使加在 APD 上的偏压远小于雪崩电压,以保证释放的载流子无法触发雪崩。例如,对于触发频率为 100 MHz 数量级的单光子探测器来说,其最大计数率不超过 100 kHz,通过设置合适的死时间将 APD 偏压减小并持续几个 μs 时间不进行探测,从而可以有效地解决后脉冲效应问题。但是对于计数重复率要求在 GHz 以上的高速探测器来说,两次有效探测之间的死时间最多只能设置为 1 ns 数量级,远远低于 APD 中的载流子寿命,因此根本无法克服高速探测时后脉冲效应的影响。

针对上述问题,本文提出了一种并行 APD 阵列结构的红外单光子探测系统,它包括并行 APD 阵列,并行 APD 阵列驱动电路,信号探测电路,信号模数转换电路,信号处理电路和数字信号输出。该方法采用并行 APD 阵列将单光子信号转换成雪崩电信号,利用直流偏置电压电路使并行 APD 阵列工作于盖革模式,利用高速脉冲门控时序信号电路以及多通道光开关实现并行 APD 阵列的通道时序切换功能。并行 APD 阵列输出的雪崩电信号,经过信号探测电路的低通滤波和宽带放大处理后,由信号模拟数字转换电路转换成数字信号,再由信号处理电路进行甄别探测和计数,最后输出不同类型的数字信号。

2 并行雪崩光电二极管阵列红外单光子探测系统构成及其原理

2.1 红外单光子探测系统的硬件构成

图 1 为并行 APD 阵列结构红外单光子探测系统的原理图。系统包括并行 APD 阵列, 并行 APD 阵列驱动电路, 信号探测电路, 信号模数转换电路, 信号处理电路和数字信号输出。并行 APD 阵列可由分立的多个 APD 器件组成的, 形成并行的阵列结构, 也可以是由多个 APD 芯片集成在同一个芯片上封装成一个器件。并行 APD 阵列驱动电路是用来驱动并行 APD 阵列工作的电子电路, 包括直流偏置电压电路、高速脉冲门控时序信号电路以及多通道光开关。信号探测电路用于将并行 APD 阵列输出的单光子信号转换成雪崩电信号, 并将所述雪崩信号经过低通滤波和高速宽带放大器从尖峰噪声中提取出来。信号模数转换电路将提取出来的雪崩电信号经过高速比较器转换成数字信号。信号处理电路将转换后的数字信号进行甄别探测和计数, 提供各种类型的数字信号给数字信号输出。具体电路结构连接有: 并行 APD 阵列的控制端与并行 APD 阵列驱动电路的直流偏置电压电路、高速脉冲门控时序信号电路相连; 并行 APD 阵列的输出端与并行 APD 阵列驱动电路的多通道光开关的输入端相连; 多通道光开关的输出端与信号探测电路的多级低通滤波电路的输入端相连; 多级低通滤波电路的输出端与高速宽带放大电路的输入端相连; 高速宽带放大电路的输出端与信号模数转换电路的高速比较电路的输入端相连; 高速比较电路的输出端与信号处理电路的数字信号甄别电路输入端相连; 数字信号甄别电路的输出端与计数器的输入端相连; 计数器的输出端与数字信号输出相连。

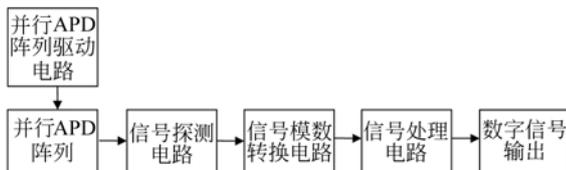


图 1 红外单光子探测系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of infrared single photon detection system

2.2 红外单光子探测系统的工作原理

系统的工作原理为: 当并行 APD 阵列中第一个 APD 器件探测完单光子信号后进入死时间, 多通道光开关将输入信号从这个已不能响应的 APD 器件即通道 1 切换至第二个处于待接收状态的 APD 器件即通道 2 进行接收; 依次循环, 至到第 N 个 APD 器件即通道 N 完成探测。此时通道 1 的第一个 APD 器件已经结束死时间进入待接收状态, 这样通道可从第 N 通道切换至第一通道, 继续进行探测, 从而完成并行循环结构的探测系统。使用 N 个 APD 器件构成的 N 通道进行探测, 可以实现探测速率 N 倍的增长, 其效率主要取决于光路切换速度和通道数 N , 每个 APD 要求的性能指标可以大大降低, 使用现有的 APD 器件完全可以满足 GHz 以上的高速单光子探测系统的要求, 从而解决了减小死时间提高计数重复率与降低后脉冲几率降低暗计数之间的矛盾。

3 红外单光子探测系统的技术方案

并行 APD 阵列由 N 个分立的 InGaAs/InP APD 器件组成。并行 APD 阵列驱动电路包括直流偏置电压电路、高速脉冲门控时序信号电路以及多通道光开关。信号探测电路包括低通滤波电路和高速宽带放大电路。信号模数转换电路包括高速比较电路。信号处理电路包括数字信号甄别电路和计数器。数字信号输出则提供各种类型的数字信号输出, 系统方法流程如图 2 所示。

APD 采用美国 JDSU 公司 ETX40 型号 InGaAs/InP APD, 工作温度为 $-50 \pm 2^\circ\text{C}$, 带宽最小为 1.6 GHz, 雪崩电压为 46.2 V。偏置电压电路为并行 APD 阵列提供直流高压反偏信号, 通常输出电压通过数字接口进行控制, 输出电压为 40~50 V。

高速脉冲门控时序信号电路提供高速脉冲门控信号和门控时序信号给并行 APD 阵列, 使用高频功率信号源和高功率放大器给并行 APD 阵列提供脉冲门控信号, 同时由脉冲门控信号 N 分频产生 N 个高速的门控时序信号。这 N 个门控时序信号之间将相互依次有 $1/N$ 个周期的相位差, 作为通道切换的时序控制信号提供给并行 APD 阵列, 并作为同步参考信号提供给多通道光

开关。高频功率信号源采用美国安捷伦公司的 N5181A 型号高频信号源,使用 Picosecond 公司的 5865 型号的 12.5 GHz 宽带功率放大器将信号进行功率放大,提供脉冲门控信号给并行 APD 阵列,输出脉冲重复频率为 1.6 GHz,脉宽约为 310 ps,输出幅度为 6.2 V_{p-p}。

多通道光开关由高速的电光调制器及现场可编程逻辑器件(FPGA)电路实现,这里通道数 N 通常可取 4,8,16,32 等。多通道光开关的时序信号由高速脉冲门控时序信号电路输出的同步参考信号所得,通过 FPGA 电路和电光调制器实现通道的切换功能。

信号探测电路中多级低通滤波电路为多级 LC 无源微波低通滤波器,截止频率比高速脉冲门控信号的频率约低 10%,取 2×15 级 LC 无源微波低通滤波器,1 dB 转折频率为 1.45 GHz,插入损耗小于 5 dB,1.6 GHz 处衰减为 103 dB。

信号探测电路中高速宽带放大电路使用的高速宽带放大器为 Analog Devices 公司的可调增益宽带放大器 ADL5330,带宽为 10 MHz~3 GHz,60 dB 的增益可调范围,42 dB@2.7 GHz,最大输出功率为 5 dBm。

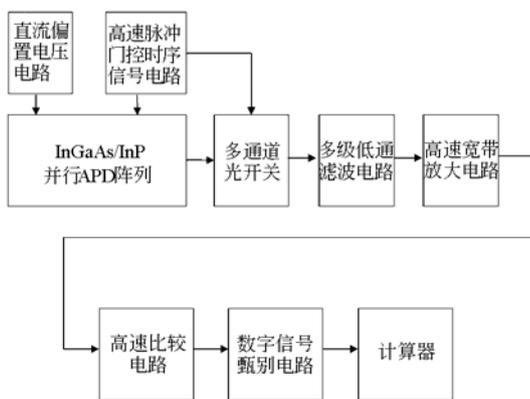


图 2 红外探测系统方法流程图

Fig. 2 Infrared detection system flowchart method

信号模数转换电路的高速比较电路使用高速比较器,用于比较雪崩信号,将经过信号探测电路放大得到的电信号经过高速比较器比较后转换成数字信号。采用 ADI 公司的高速比较器 ADC-MP573,传播延迟为 150 ps,最小脉冲宽度为 80 ps。

信号处理电路的数字信号甄别电路使用高速

甄别器,用于甄别雪崩信号。采用美国 ORTEC 公司的甄别器,型号 9307,输入脉冲的最小脉宽为 400 ps,甄别电平为 -200 mV,最高翻转频率为 5 GHz,甄别电平在 -10 mV~-1 V 可调。其输出 TTL 或 NIM 电平,脉冲宽度为 10 ns。

信号处理电路的计数器使用 200 MHz 以上的计数器对雪崩信号进行计数。

数字信号输出则提供 TTL、NIM 等各种类型的数字信号。

4 实验结果

在单光子探测器中,最重要的技术参数是计数重复率,暗计数率和探测效率。这 3 个参数可以直接反应探测器的工作性能^[13-15]。

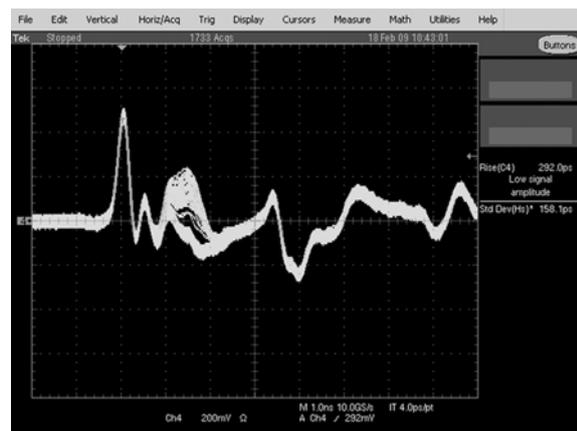


图 3 示波器在 10 ns 内的采样波形

Fig. 3 Sampling waveform in 10 ns by oscilloscope

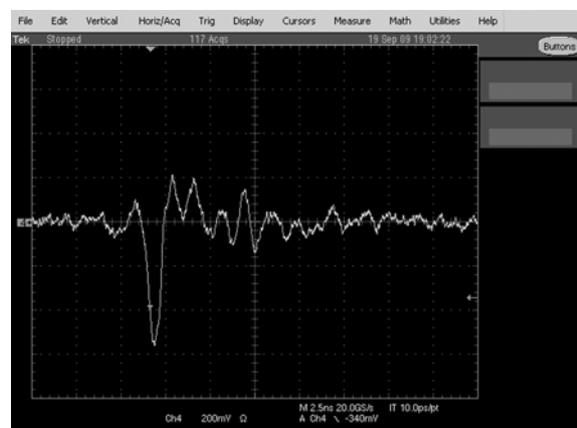


图 4 示波器在 25 ns 内的采样波形

Fig. 4 Sampling waveform in 25 ns by oscilloscope

实验所用单光子源为衰减激光脉冲模式,脉冲宽度为 $20 \mu\text{m}$,激光器中心波长为 1550 nm ,每个脉冲平均发出 0.01 个光子。高速门控电路的脉冲重复频率为 1.6 GHz 。实验中通道数 N 为 8 ,提供 8 通道光开关时序切换控制功能。死时间通过 FPGA 设定为 50 ns ,由于信号的分频, 8 个 APD 依次进入死时间,所以 APD 阵列的死时间为其 $1/8$,即 6.25 ns 。

实验平台搭建完毕后,将计数器的数字信号输出接在示波器上,通过示波器接收和记录光子计数。为了使实验结果更加精确,在得到原始数据后,添加一个光子数阈值,将小于一定额度的光子数忽略不计,只保留较为明显的光脉冲信号。

图 3 和图 4 是示波器采样图,实验采集数据经处理后得到图 5。

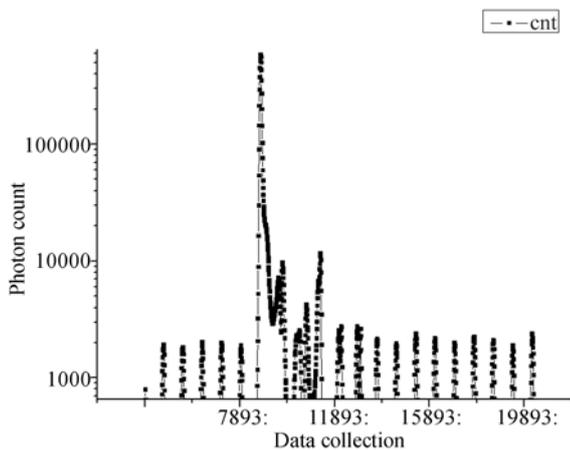


图 5 示波器采集到的计数数据

Fig. 5 Count data collected by oscilloscope

由于使用计数器作为信号纪录单位,因此所有探测结果均以计数方式表示。没有信号光子到

达 APD 时的计数为暗计数 N_D ,有信号时计数为 N ,实际光子计数为 N_P 。 $N = N_D + N_P$ 。门脉冲重复频率 $f = 1.6 \text{ GHz}$,测量计数时间为 t 。暗计数率是每个门脉冲内的暗计数个数,即:

$$P_D = \frac{N_D}{t \times f} \quad (1)$$

光子计数率为:

$$P_P = \frac{N_P}{t \times f} \quad (2)$$

探测效率为:

$$DE = \frac{1}{n} \ln \frac{1 - P_D}{1 - P_P} \quad (3)$$

其中 n 是每个光脉冲的平均光子数^[16]。计算可得 $P_D = 5.92 \times 10^{-5}$, $DE = 10.0\%$,重复频率为 1000 MHz 。

5 结 论

本文提出一种并行雪崩光电二极管阵列红外单光子探测系统:使用分立的多个 APD 器件组成的并行 APD 阵列将单光子信号转换成雪崩电信号,利用直流偏置电压电路使并行 APD 阵列工作于盖革模式,利用高速脉冲门控时序信号电路以及多通道光开关实现并行 APD 阵列的通道时序切换功能,减小了 APD 器件的死时间。并行 APD 阵列结构的红外单光子探测系统的工作速度高达 2 GHz ,重复频率达到 1000 MHz 以上,该系统克服了探测器的后脉冲效应,有效提高探测器的工作频率和探测效率。使用 1.6 GHz 的脉冲门控信号频率进行测量, 8 通道的并行 APD 阵列结构的红外单光子探测系统暗计数率为 5.92×10^{-5} ,探测效率为 10.0% 。

参考文献:

- [1] 孙志斌,马海强,吴令安,等. 近红外单光子探测器[J]. 物理学报,2007, 56(10): 5790-5795.
SUN ZH B, MA H Q, WU L A, et al.. A single-photon detector in the near-infrared range [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(10): 5790-5795. (in Chinese)
- [2] 韩宇宏. 量子通信中单光子探测器的研制及相关问题的研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2010.

- HAN Y H. *Research and Development of Single-photon Detector Used in Quantum Communication and issues Related*[D]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010. (in Chinese)
- [3] 刘登宽,陈思井,尤立星,等. 超导纳米线单光子探测器的光耦合结构[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(6): 1496-1501.
LIU D K, CHEN S J, YOU L X, et al.. Fiber coupling of superconducting nanowire single-photon detectors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1496-

1501. (in Chinese)
- [4] DIXON A R, DYNES J F, YUAN Z L, *et al.*. Ultra-short dead time of photon-counting InGaAs avalanche photodiodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 231113: 94.
- [5] WU X C, GU Y L, YAN F, *et al.*. High uniformity, stability, and reliability large-format InGaAs APD arrays [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies*, America: Optical Society of America, 2007: CMII2.
- [6] YUAN Z L, SHARPE A W, DYNES J F, *et al.*. Multi-gigahertz operation of photon counting InGaAs avalanche photodiodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 071101: 96.
- [7] RESTELLI A, BIENFANG J C, MIGDALL A L. Single-photon detection efficiency up to 50% at 1310 nm with an InGaAs/InP avalanche diode gated at 1.25 GHz [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 141104: 102.
- [8] RENKER D. Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2006, A567: 48-56.
- [9] COVA S, GHIONI M, LACAITA A, *et al.*. Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection [J]. *Applied Optics*, 1996, 35 (12): 1956-1976.
- [10] RIBORDY G, GAUTIER J D, ZBINDEN H, *et al.*. Performance of InGaAs/InP avalanche photodiodes as gated-mode photon counters [J]. *Applied Optics*, 1998, 37 (12): 2272-2277.
- [11] HADFIELD R H. Single-photon detectors for optical quantum information applications [J]. *Nature Photonics*, 2009, 230: 696-705.
- [12] NAMEKATA N, SASAMORI S, INOUE S. 800 MHz single-photon detection at 1550-nm using an InGaAs/InP avalanche photodiode operated with a sine wave gating [J]. *Optics Express*, 2006, 14 (21): 10043-10049.
- [13] 高家利, 汪科, 曹秋玲. 基于 InGaAs/InP APD 的单光子探测器设计与实现 [J]. *光电子技术*, 2015, 35 (2): 131-134.
- [14] GAO J L, WANG K, CAO Q L. Design and Realization of the single-photon detector based on InGaAs/InP APD [J]. *Optoelectronic Technology*, 2015, 35 (2): 131-134. (in Chinese)
- [14] 李水峰, 熊予莹, 李日豪, 等. 红外 InGaAs/InP 单光子探测器暗计数的研究 [J]. *量子光学学报*, 2007, 13 (2): 141-145.
- [14] LI SH F, XIONG Y Y, LI R H, *et al.*. Dark count probability for InGaAs/InP single-photon detector at infrared wavelengths [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2007, 13 (2): 141-145. (in Chinese)
- [15] WU Q L, HAN Z F, LIU Y, *et al.*. Single photon detector module based on avalanche photodiodes [J]. *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging, SPIE*, 2007, 66: 66211G.
- [16] 刘云. 红外单光子探测器的研制 [D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2007.
- [16] LIU Y. *Development of Infrared Single Photon Detector* [D]. Anhui: University of Science & Technology of China, 2007. (in Chinese)

作者简介:



李 臻(1992—),男,山西长治人,博士研究生,2014年于中国科学技术大学获得学士学位,主要研究方向为光电量子器件和智能照明。E-mail: zain@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:



徐 军(1978—)男,江苏连云港人,讲师,2000年、2002年、2006年于中国科学技术大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要研究方向为光电器件与传感测量。E-mail: xujung@ustc.edu.cn