

# 近红外光电探测器的发展与应用\*

吴国安<sup>†</sup> 罗林保<sup>†</sup>

(合肥工业大学电子科学与应用物理学院 微纳功能材料与器件实验室 合肥 230009)

2017-08-29收到

<sup>†</sup> email: luolb@hfut.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20180301

## Development and application of near infrared photodetectors

WU Guo-An LUO Lin-Bao<sup>†</sup>

(Laboratory of Micro/Nano Functional Materials and Devices of School of Electronic Science and Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**摘要** 近红外光电探测器在军事和国民经济中应用广泛,如航空航天、光通信、工业控制、近红外成像等领域。文章首先讲述了近红外光电探测器的发展历史、工作原理和基本应用情况。通过比较各类光电探测器的性能参数,可以看出基于纳米材料的近红外光电探测器具有很高的响应度、探测率和响应速度。然后,文章将着重介绍近红外光电探测器在光纤通信、无人驾驶、模式识别和光电耦合等领域的发展情况及相关原理。最后,文章对近红外光电探测器的发展前景进行了展望。未来近红外光电探测器将全面应用于各大领域,但是高端的材料生长技术、高效的光电转化方法以及大规模光电器件集成工艺等方面的不足依旧是限制纳米光电探测器发展的主要因素。

**关键词** 近红外, 光电探测器, 光纤通信, 无人驾驶, 模式识别, 光电耦合

**Abstract** Near infrared (NIR) photodetectors have been widely used in the fields of military and national economy including aeronautics and astronautics, optical communication, industrial control, NIR imaging and so on. In this paper, we first introduce the development history, working principle and fundamental applications of NIR photodetectors. Compared with NIR photodetectors made of other materials, the devices composed of nanomaterials can exhibit excellent performance in terms of higher responsivity, larger detectivity and faster response speed. Then, we present the current development status and related operating principle of the NIR photodetectors for applications in the areas of optical communication, automatic drive, identification and optoelectronic coupler. Finally, an outlook of the future development of NIR photodetectors is delivered. With the development of science and technology, NIR photodetectors will be extensively applied in more practical fields in the future. However, there are still some obstacles for development of the NIR photodetectors such as advanced growth of materials, efficient conversion of photons to electricity and large-scale integration of optoelectronic devices, etc.

**Keywords** near infrared, photodetectors, optical communication, automatic drive, identification, optoelectronic coupler

\* 国家自然科学基金(批准号: 61575059; 61675062)、中央高校基础研究基金(批准号: 2012HGXC0003; 2013HGCH0012; 2014HGCH0005)资助项目

## 1 引言

1982年4月—6月,英国和阿根廷之间爆发了马尔维纳斯群岛战争<sup>[1]</sup>。4月13日夜间,英国攻击阿根廷据守的最大据点斯坦利港。当时3000名英军的所有枪支、火炮都配备有红外夜视仪,能够在黑夜中清楚地发现阿根廷军目标。而阿根廷军队缺乏夜视装备,不能有效地发现英军目标,处境十分被动。最终,英国军队在夜视装备的引导下,成功地攻下了斯坦利港据点,14000名阿根廷军士不得不向英军投降<sup>[2]</sup>。这是一场由于夜视装备优势赢得的兵力悬殊的战斗。红外夜视仪是红外光电探测器的一种具体应用,可以分为主动红外夜视仪和被动红外夜视仪两大类,但两者的基本原理都是光电探测。图1(a),(b)分别是红外夜视仪的实物图和实际效果图,现在已经广泛装备于各国军队,是军队夜间作战的有力工具。

光是电磁波的一种表现形式,根据电磁波波长和频率的不同,电磁波可以分为无线短波、红外线、可见光、紫外线、X射线以及 $\gamma$ 射线等波段<sup>[3]</sup>,如图2所示。其中,红外线是介于可见光和无线电波之间的波段。根据国际标准化组织(ISO 20473)分类,红外线又可以分为近红外(波长范围

780 nm—3  $\mu\text{m}$ )、中红外(波长范围3—50  $\mu\text{m}$ )以及远红外(波长范围50—1000  $\mu\text{m}$ )。近红外作为电磁波谱的重要组成部分,应用范围十分广泛,包括军事上的航海、夜视、航空航天、武器探测以及民用的光通信、医疗成像、大气探测、污染检测以及气象学等<sup>[3]</sup>。

## 2 近红外光电探测的发展历史

1800年,英国科学家赫胥尔利用三棱镜将太阳光分解为不同颜色的光,并使其照射在不同的水银温度计上测试加热效果,发现位于红光外侧的那支温度计升温最快,由此发现了红外线<sup>[4]</sup>。1917年,美国科学家盖斯首次利用光电导结构成功研制出了亚硫酸铊红外光子探测器。20世纪70年代,制冷型焦平面器件成为研究的热点。制冷型焦平面探测器上排列着阵列化的感光元件,从远处发射的红外线经过光学系统成像在感光元件阵列上,感光元件将光信号转换成电信号并加工处理,最终传送到终端形成图像。为了提高探测目标温度和背景温度之间的对比度,此类探测器需要制冷处理,称之为第二代红外探测技术。20世纪90年代,红外技术正在经历第三次革命,以微测辐射热计和热释电探测器为代表的非致冷红外成像技术取得了重大突破<sup>[4]</sup>。微测辐射热计通常由惠斯通电桥组成,电桥的两个臂是两条相同的薄铂条或者其他半导体材料。当其中的一条铂条或者半导体材料受到微弱辐射的照射时,其电阻会发生微小的变化,通过检测电阻的变化就可以计算出辐射量的大小。热释电探测器

指的是能将温度的变化转换为电学信号的一类器件,由于红外线的热效应现象明显,所以该类器件的光—热—电转化效率很高。随着科学技术的不断发展,现阶段对近红外光电探测器性能的要求更加严格,低功耗、高灵敏度、易于集成和多元阵列化成为衡量光电器件的关键参数。

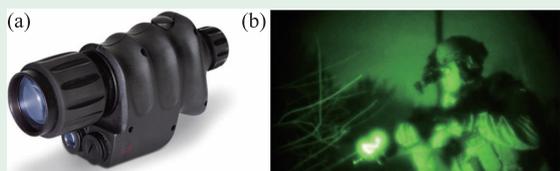


图1 红外夜视仪 (a)实物图;(b)效果图

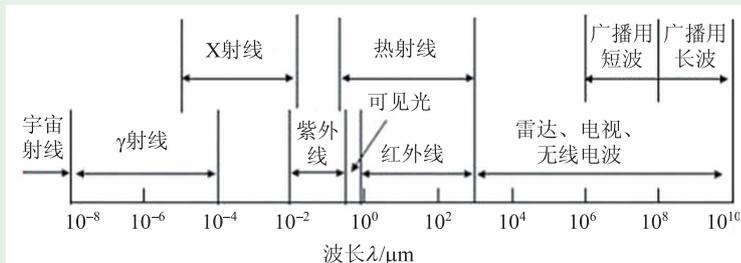


图2 电磁波谱

### 3 近红外光电探测的分类及原理

近红外光电探测器根据不同的分类标准可以分为很多类型，常见的分类有：(1)按照探测的物理机制不同可以分为两大类：基于各种光电效应的光子探测器和利用温度变化实现探测的热探测器；(2)按照探测器的空间分辨率不同，分为非成像型光电探测器和成像型光电探测器；(3)按照探测材料尺寸的不同，分为体材料探测器、薄膜材料探测器和纳米材料探测器；(4)按照器件结构的不同，分为真空光电器件、光电导探测器、PN结探测器、PIN结光电探测器、雪崩二极管探测器、肖特基结探测器以及金属—半导体—金属结构探测器等。

光电效应又可以分为外光电效应和内光电效应。根据爱因斯坦光电效应方程式，当特定波长的光辐射到金属表面时，金属会吸收光子并发射电子，称之为外光电效应。内光电效应指的是，当特定波长的光辐射与半导体相互作用时，半导体内部受束缚的电子受到激发，从而改变半导体导电性能的物理现象<sup>[5]</sup>。热电效应指的是受热物体中的电子随着温度梯度的变化由高温区往低温区移动时，所产生的电荷或者电流堆积的一种现象<sup>[6]</sup>。

基于外光电效应的近红外光电探测器件一般为真空光电器件，比如真空光电管、充气光电管、光电倍增管、像增强管以及摄像管等。此类器件的优点是具有很高的探测灵敏度和很快的响应速度，非常适合探测微弱光信号以及快速脉冲弱光信号。但是缺点也很明显，比如需要真空工作环境以及高压系统，这使得器件体积较大、使用起来不够灵活。另外，真空光电器件的性能还受到光阴极材料的限制。基于热电效应的近红外光电探测器利用近红外线的热效应来实现光—热—电的转换，所以该类光电探测器对波长的选择性较差。另外近红外线使得物体温度变化需要一定的时间，因此该类探测器的响

应速度较慢。相比于前两种物理机制的光电探测器，基于内光电效应的近红外光电探测器种类繁多，例如光敏电阻、光电池、光电二极管、光电三极管、光电晶体管等。此类器件的特点是结构简单、体积小、探测灵敏度高、光谱选择性好以及响应速度快。

目前，近红外光电探测器的研究热点主要是半导体纳米材料光电探测器。所谓纳米材料，指的是尺寸大小在1—100 nm之间的材料。1 nm是10亿分之一米( $10^{-9}$  m)，大约是人的头发丝直径(取值100  $\mu$ m)的10万分之一。纳米材料的主要特点是尺寸小、表面能高、表面原子所占比例很大以及比表面积很大，因此具有和宏观材料迥然不同的物理性质，包括表面效应、小尺寸效应、量子尺寸效应以及宏观量子隧道效应<sup>[7]</sup>。与基于体材料和薄膜材料的近红外光电探测器相比，纳米材料光电探测器的优势表现在：(1)纳米材料尺寸很小，符合光电子器件小型化、集成化的发展趋势；(2)当纳米材料的尺寸和与其相互作用的近红外光的波长相比拟时，会引发一些很奇特的光电现象；(3)纳米材料巨大的比表面积能够吸收更多的近红外辐射，这是将近红外光转化为电信号的基础；(4)纳米材料由于尺寸小使得探测器件中的电荷传输时间大大减少，这将在很大程度上提高探测器的响应速度；(5)纳米材料的电阻大，其光电器件的暗电流一般能控制在纳安级别甚至更小。

### 4 近红外光电探测器的商品化产品

目前商业化的近红外光电探测器主要以Si基、Ge基以及InGaAs基产品为主。根据近红外

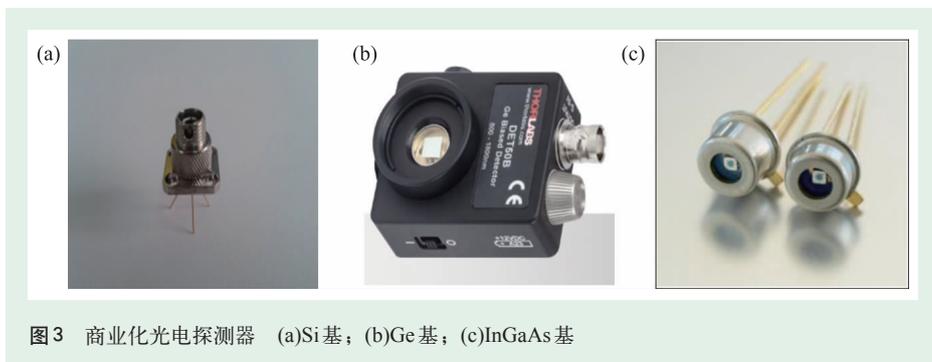


图3 商业化光电探测器 (a)Si基；(b)Ge基；(c)InGaAs基

光电探测器应用领域的不同, 各类探测器性能的侧重点也有所不同, 大致分为高灵敏度探测器、快速响应探测器以及高探测率探测器等几大类。北京敏光科技有限公司产品型号为LSSFPD-2.5的Si基近红外光电探测器3 dB带宽高达2.5 GHz, 上升时间为150 ps, 十分适合高速探测领域。美国Thorlabs公司的Ge基近红外光电探测器在10 V偏压下, 暗电流低至0.3 nA, 对应1550 nm波段的响应度为0.85 A/W。该款探测器的噪声等效功率

低至0.5 pW/Hz<sup>1/2</sup>, 十分适合弱光的探测。德国First Sensor公司的InGaAs基近红外光电探测器在5 V偏压下的暗电流为1 nA, 对应1550 nm波段的响应度为0.95 A/W。在5 V偏压下, 上升时间为15 ns, 噪声等效功率为0.2 pW/Hz<sup>1/2</sup>, 结电容值为70 pF, 该探测器的综合性能十分优异。图3是上述三家公司光电探测器的产品实物图, 分别为Si基、Ge基以及InGaAs基近红外光电探测器。表1为各种近红外光电探测器的性能参数对比。

表1 不同材料的商品化近红外光电探测器

公司	材料	光谱范围	暗电流	响应度	上升时间	噪声等效功率
北京康冠世纪光电科技有限公司	Si	300—1100 nm	—	0.6 A/W@950 nm	1.5 μs	0.28 pW/Hz <sup>1/2</sup>
德国 First Sensor	Si	900 nm	0.05 nA	0.64 A/W@900 nm	10 ns	6.3 pW/Hz <sup>1/2</sup>
北京敏光科技有限公司	Si	350—1050 nm	20 pA	0.4 A/W@905 nm	150 ps	—
美国 Thorlabs	Si	200—1100 nm	0.3 nA	0.4 A/W@730 nm	1 ns	0.5 pW/Hz <sup>1/2</sup>
美国 Electro-Optical Systems Inc	Ge	800—1800 nm	—	0.9×10 <sup>7</sup> V/W	—	0.45 pW/Hz <sup>1/2</sup>
美国 Judson	Ge	800—1800 nm	0.1 μA	—	—	0.51 pW/Hz <sup>1/2</sup>
美国 Thorlabs	Ge	800—1800 nm	0.3 nA	0.85 A/W@1550 nm	455 ns	0.5 pW/Hz <sup>1/2</sup>
北京康冠世纪光电科技有限公司	InGaAs	850—1650 nm	—	0.9 A/W@1550 nm	3 ms	—
德国 First Sensor	InGaAs	1550 nm	1 nA	0.95 A/W@1550 nm	15 ns	0.2 pW/Hz <sup>1/2</sup>
北京敏光科技有限公司	InGaAs	800—1700 nm	0.1 nA	0.9 A/W@1550 nm	—	—
美国 Thorlabs	InGaAs	800—1700 nm	55 nA	1.04 A/W@1590 nm	25 ns	0.13 W/Hz <sup>1/2</sup>

注: —表示该项参数无

## 5 近红外光电探测器的应用领域

### 5.1 光纤通信

随着信息技术的快速发展, 人们对光纤通信的速度和容量的要求越来越高。相比于传统的电缆通信, 光纤通信具有信息容量大、传播距离远、信号质量高、抗电磁干扰能力强以及成本低等优势<sup>[8]</sup>。理论和实验表明, 波长为850 nm、1310 nm以及1550 nm的近红外光在光纤中传输损耗最小, 因此这三种近红外波段又称为通信波段。光纤通信利用近红外光在光纤中发生全发射的原理进行光信号的传输, 主要由光发射机、光接收机、中继器以及调制解调器等组成。其中, 光接收机的基本原理就是光电探测。光纤通信系

统在工作时, 首先将要传输的信息通过调制器加载到高频的光信号中。高频光信号在光纤中经过长距离的传输可能会发生衰减, 此时需要中继器将衰减的高频光信号重新放大到原先的水平以增加传输的距离, 最后经过光接收机和解调器实现光电信号的转换和信号的复原, 就可以得到需要传输的原始信息。光纤通信系统要求光接收机的灵敏度高、响应速度快、噪声小以及稳定可靠。

### 5.2 无人驾驶技术

近些年来, 无人驾驶汽车和无人机产业发展十分迅速(图4)。作为无人驾驶和无人机产业的关键技术, 测距、红外成像以及夜视等技术的发展十分重要。

传统的测距手段主要有超声波测距和射频电

磁波测距等。自从20世纪60年代激光器诞生以来,激光测距显现出巨大的优势,主要是因为激光的准直性好、抗电磁干扰能力强等特点。考虑到激光波长的穿透能力、抗干扰能力以及对人眼的伤害等方面原因,激光测距仪一般选择近红外波段,波长为1500 nm左右最佳<sup>[9]</sup>。激光测距仪一般由激光发射部件、激光接收部件以及电源部件三大部分组成,其中激光接收部件就需要近红外光电探测器来实现。激光测距仪的工作原理是利用脉冲激光向目标发射单次激光脉冲或者激光脉冲串,计数器测量激光到达目标并从目标反射回来的时间,由于激光在空气中传播的速度一定,所以就能计算出距离的大小。

无人驾驶汽车工作时需要对周围环境进行判断,比如对行人车辆的判断、对红绿灯的判断以及对行驶路况的判断。同样,无人机也要对特定空域环境进行判断。传统的可见光图像处理技术虽然可以解决以上问题,但是由于干扰源较多以及夜间环境限制等原因,无人驾驶设备一般采用近红外成像技术进行工作环境的成像分析。一般地,无人机或者无人驾驶汽车都带有近红外激光器和近红外摄像机,工作时首先由近红外激光器向周围环境发射近红外辐射,再由多个红外摄像机进行成像信息采集,最后通过数据加工处理得到周围环境的形貌图信息。

夜间行驶以及飞行技术是无人驾驶技术的重要组成部分。相比于白天的工作环境,夜间环境复杂多变。为了让无人机或者无人驾驶汽车能正常在夜间工作,准确可靠的夜视技术必不可少。近红外夜视仪利用近红外光电探测原理,将夜间环境中的近红外线或物体向外辐射的近红外线分布情况转变为电信号分布的图像信息,然后将图像信息提供给无人驾驶系统的数据处理模块,就可以实现无人驾驶系统全天候工作的能力。

### 5.3 生物模式识别技术

随着信息技术的不断发展,信息安全问题日益引发人们的关注。传统的信息保护方式(如数字密码、图案密码等)由于其可靠性不高以及容易遗忘等特点,逐渐被安全性更好的生物识别手段所代替。由于每个人的生物体特征(如指纹、虹膜、声音以及面部)在一定时期内都十分稳定,所以利用生物体特征进行身份识别更加友好、安全、精确和可靠。目前,基于生物模式识别技术广泛应用于电子商务、门禁系统、金融、网络系统以及公安刑侦等各种领域<sup>[10]</sup>。

近红外光电探测器在生物识别系统中主要用于信息采集的部分。首先,近红外光对生物特征(如指纹、眼睛虹膜以及面部)进行扫描,再由近红外光电探测器阵列进行生物特征的成像,然后计算机系统对特征参数的提取(包括指纹的纹路图案、虹膜的内外直径大小以及面部识别中器官的相对位置等参数),最后和预先存档的特征数据库中的数据进行比对就可以确认生物体的身份(图5)。

### 5.4 光电耦合器

随着微电子技术的不断发展,电子设备上集成的电路模块越来越紧密,因此电信号之间的干

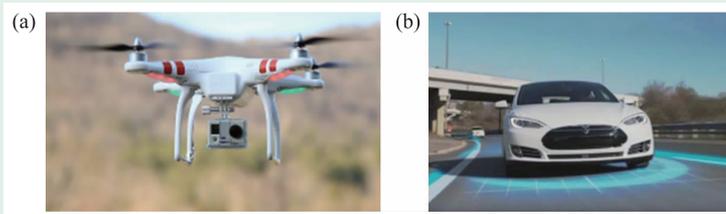


图4 无人驾驶系统 (a)无人机;(b)无人驾驶汽车



图5 生物模式识别 (a)虹膜识别;(b)指纹识别;(c)面部识别

扰问题逐渐凸显。作为光电隔离领域的代表性器件,光电耦合器拥有体积小、寿命长、无触点、能有效隔离噪声以及抗干扰能力强等优点<sup>[1]</sup>。光电耦合器是一种以光为媒介实现电—光—电信号转换的器件,主要由发光源和光电探测器组成。发光源部分主要以电信号驱动的发光二极管为主,由于发光材料的限制,发光的波长一般为近红外光。探测器部分则以光敏电阻、光电二极管以及光电三极管为主。整个光电耦合器将发光源和光电探测器封装在一个密闭的壳体内,彼此之间用透明绝缘体隔离形成两端器件。在电—光—电转换的过程中,输入端和输出端互相隔离,因此具有良好的电绝缘能力和抗干扰能力。

## 6 总结和展望

本文简单回顾了近红外光电探测器的发展历史、探测原理以及基本应用状况。从材料的选择角度看,各种各样的半导体材料(比如硅、锗、硅锗、砷化铟镓以及磷化铟等)都可以用来进行近红外波段的探测。相比于体材料和薄膜材料,基于纳米材料的近红外光电探测器具有不可比拟的性能优势。近年来,纳米材料近红外光电探测器的研究取得了很大的进步,但是面临的问题和挑战依然还有很多,主要有以下几个方面。

### (1) 高质量的材料生长技术

近红外光电探测器的性能取决于材料的形貌、品质、导电率和尺寸等关键参数。虽然近年来在纳米材料可控合成方面取得了长足的发展,

但是尺寸、形貌和化学成分高度可控的纳米材料的合成依然是限制纳米光电器件走向应用的主要因素之一。此外,不同半导体材料的外延生长技术还不够成熟。受到半导体晶格失配以及热失配等因素的制约,高质量的外延半导体材料工艺复杂、难以大规模集成。

### (2) 光电转化效率提高方法

探测材料对近红外光的充分吸收是实现高效光电转换的基础。目前,采用超大比表面积的纳米结构材料虽然能大幅度提高近红外光的吸收能力,但是仍不能满足高性能近红外光电探测器的要求。基于局域表面等离子共振效应的探测器件能将入射光局域在光吸收层表面附近,通过优化吸收层表面贵金属颗粒的种类、形貌、大小以及排列方式等参数,能很好地调整共振吸收峰的位置和强度。但是该领域的研究内容还不够丰富,基本理论还不够系统全面。

### (3) 单元探测器的集成技术

单元近红外光电探测器的功能十分有限,要想实现近红外成像等关键技术,需要将单元探测器组装成探测器阵列。制备探测器阵列的难点在于需要成熟可靠的加工手段来实现纳米材料的精确转移、规则布线以及电信号绝缘等工艺。目前,只有半导体硅的加工工艺最为成熟,其他半导体材料的集成工艺复杂、成本较高,短期内难以实现大规模的商业化生产。

**致谢** 感谢合肥工业大学谢超博士与作者的讨论。

## 参考文献

- [1] 柳圭如. 红外技术, 1983, 5(6): 61
- [2] 李德刚. 红外, 2011, 32(10): 40
- [3] Chen H Y, Liu H, Zhang Z M *et al.* Adv. Mater., 2016, 28(3): 403
- [4] Rogalski A. Prog. Quantum Electron., 2003, 27(2-3): 59
- [5] Liang F X, Wang J Z, Li Z P *et al.* Adv. Optical Mater., 2017, 5(14): 14
- [6] 李翔, 周园, 任秀峰等. 电源技术, 2012, 36(01): 142
- [7] Klimov V I, Mikhailovsky A A, Xu S *et al.* Science, 2000, 290(5490): 314
- [8] 应德芳. 河南科技, 2014, (06): 61
- [9] 郑大青, 陈伟民, 陈丽等. 光电子·激光, 2015, 26(02): 303
- [10] Hong L, Wan Y F, Jain A. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 1998, 20(8): 777
- [11] Nickels P, Matsuda S, Ueda T *et al.* IEEE J. Quantum Electron., 2010, 46(3): 384