

紫外-红外双色集成探测器的发展与现状

李淑萍¹, 何 涛², 付 凯³, 于国浩³, 张晓东³, 熊 敏³, 张宝顺³

(1. 苏州工业园区服务外包职业学院, 江苏 苏州 215123; 2. 南京理工大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 210094;
3. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215123)

摘要: 随着军事和民用对高集成度、多色化光电探测的不断需求, 在近几十年内, 紫外-红外 (UV-IR) 双色集成探测器从无到有, 从彼此独立的紫外和红外探测器的简单集成发展到如今量子阱结构、键合结构等新型集成技术, 但不同的光敏材料或系统带来较大的晶格失配问题仍然限制了其发展与应用。本文阐述了紫外-红外双色集成探测技术在发展过程中的主要问题, 并以时间和紫外探测技术为线索简述了紫外-红外双色集成探测器的发展历史及研究现状。

关键词: 双色探测器; 紫外-红外; 氧化物; III族氮化物

中图分类号: TN215, TN23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2018)11-1033-09

Development and Status of Ultraviolet-Infrared Dual-Band Integrated Detectors

LI Shuping¹, HE Tao², FU Kai³, YU Guohao³, ZHANG Xiaodong³, XIONG Min³, ZHANG Baoshun³

(1. Suzhou Industrial Park Institute of Services Outsourcing, Suzhou 215123, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
3. Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China)

Abstract: Demand has been continuous for highly integrated and multi-band photoelectric detection in military and civilian applications. In recent decades, ultraviolet-infrared (UV-IR) dual-band integrated detectors have been gone through from scratch and have continuously developed from the simple integration of separate UV and IR detectors to new integrated technologies such as quantum-well structures and bonding structures. However, the problem of large lattice mismatches caused by different photosensitive materials or systems has hindered the development and application of the technology of monolithic integration. In this paper, we describe the main issue, process, and research status of the development of the UV-IR dual-band integrated detectors based on history and UV detection technology.

Key words: dual-band detectors, ultraviolet-infrared, oxides, III nitrides

0 引言

在光学与电子信息领域中, 有一个重要的组成部分是光电信息的利用, 而光电探测器则是人类利用光电信息的基础。光电探测器, 尤其红外探测器和紫外探测器, 如今已经广泛应用于军事和民用等各个方面。红外探测器的应用为人们的日常生活带来了极大的便捷, 常见的有红外感应, 例如感应水龙头、感应门和感应灯等等, 除此之外还有矿产资源勘探、无损探伤、气体分析、红外成像、火警预警、红外精确制导、航空探测以及气象卫星等其他应用^[1-4]; 紫外探测器在早

期主要应用于紫外告警、紫外通信、紫外制导等军事领域, 随后, 紫外探测器也逐渐出现在紫外消毒、火灾探测、紫外固化和聚合、生物医学、光谱分析及粒子探测等其他领域^[5-8]。然而, 随着人们对集成度需求的不断提高、实际应用环境的复杂化以及红外干扰技术的快速发展, 单色探测器越来越无法满足实际应用的需要。因此, 为了有效地抑制背景的复杂度对探测器的影响, 提高探测器对目标的探测效果, 降低在预警、搜索和跟踪系统中的虚警率, 提高系统的性能和在各种军事及民用平台上的通用性^[9], 研究人员把红外探测器和紫外探测器集成到一起, 形成能同时探测

收稿日期: 2018-01-20; 修订日期: 2018-08-08。
作者简介: 李淑萍 (1972-), 女, 山西汾阳人, 副教授, 主要从事微纳器件工艺的研究。E-mail: lisp@siso.edu.cn。
通信作者: 张宝顺 (1968-), 男, 吉林人, 研究员, 目前主要从事 GaN 基电力电子器件研究。E-mail: bszhang2006@sinano.ac.cn。
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (11404372); 2017 年江苏省高职院校教师专业带头人高端研修资助项目 (2017GRGDYX041)。

紫外和红外波段的紫外-红外双色集成探测器,这也成为了光电探测器发展的一个重要方向。

从20世纪紫外-红外双色集成探测器被提出以来,集成紫外-红外的双色探测技术在国内外都得到了巨大的发展,尤其近些年宽禁带半导体外延生长技术发展完善,高晶体质量紫外光敏材料的外延生长问题得以解决,紫外探测技术更是蓬勃发展,但目前紫外-红外双色集成探测器仍然没有很好的普及,其中晶格不匹配带来的紫外-红外光敏材料或探测系统集成困难、集成器件后红外探测系统的探测性能弱,以及双色集成探测器结构复杂等问题成为限制其发展的主要原因。本文简述了紫外-红外双色集成探测技术发展过程中出现的主要问题和解决方案,并以时间和紫外探测技术为线索,阐述了紫外-红外双色集成探测器的发展状况与近些年新材料、新技术出现带来的新的发展方向。

1 紫外-红外双色集成探测器目前的主要问题

紫外-红外双色集成探测器是由紫外探测系统和红外探测系统两者集成,能同时探测紫外和红外波段的光电探测器。通常将能探测100~400 nm光波长范围的光电探测器称为紫外探测器,目前常用于制备日盲紫外探测器的宽带隙材料有铝镓氮(AlGaIn)、金刚石、氧化锌(ZnO)以及 β -氧化镓($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$)等^[10-14],其主要工作原理都是利用宽禁带材料的导带与价带之间的带间跃迁来实现紫外探测。而红外探测器发展至今,已经到了第三代红外探测技术,其中以带间跃迁的碲镉汞红外探测器、子带间跃迁的量子阱红外探测器和微带间跃迁的II类超晶格红外探测器为代表^[15-17]。

紫外探测器和红外探测器这些单波段探测技术迅速发展,但以紫外-红外集成芯片为核心的紫外-红外双色集成探测器却一直以较慢的步伐在缓慢前进。在半导体材料体系中,红外光敏材料和紫外光敏材料由于对应响应波段不同,一般在能带带隙上具有很大的差异,进而往往对应着大的晶格常数的差异,难以进行紫外-红外集成双色探测器的制备。但随着新材料新技术的发展,到目前已经出现了一些新的解决方案:①通过类似键合的方法将紫外和红外两种光敏材料或者两种探测系统集成起来,避免了因晶格不匹配带来的外延生长的问题,但其中需要解决不同材料或系统键合的技术问题和键合材料或系统本身对两种光波长的吸收和透过问题;②通过量子阱结构与宽带隙的紫外光敏材料集成外延生长,前者通过子带跃迁实现红外响应,后者通过宽带隙的带间跃迁实现紫外

响应。

2 紫外-红外双色集成探测器的发展和现状

探测器发展史中最早开始的是热探测器,其历史可以追溯到1800年W. Herschel在温度计实验中发现红外光^[18],而最早的光电探测器则开始于1873年W. Smith发现硒的光电导效应^[19]。而最早的双色探测器则是出现在上世纪70年代,1972年,霍尼韦尔公司制备出采用体材料、胶粘接的多色 HgCdTe 夹层光电导探测器^[20];1973年,宗兰^[21]制备出多色 HgCdTe 光电探测器。同时期,研究人员也提出了将其他各种波段相结合而制备出能够同时探测多波段光谱的多色探测器的想法,如短波红外-长波红外、紫外-可见光、紫外-近红外等。总体来说,双色探测器的发展由于受到集成中某种单色探测器的发展、材料生长和器件工艺等条件的共同限制,总体发展慢于同时期单色探测器,而紫外-红外双色集成探测器又依托于双色探测器技术的发展,造成了紫外-红外双色集成探测器直到近20年才得到较大的发展。此外,由于近些年宽禁带半导体外延生长技术发展完善,高晶体质量紫外光敏材料的生长问题得以解决,紫外探测技术的发展相对于红外探测来说更为成熟,因此下文以时间和紫外探测系统的发展为主要线索来概述紫外-红外双色集成探测器的发展过程及现状。

2.1 20世纪

20世纪70年代,随着各种双色探测器概念的出现,紫外-红外双色集成探测器也逐渐得到了人们关注。第一次实际运用紫外-红外双色集成探测器是在1977年美国在阿富汗战争中运用的“尾刺”导弹中,其导引头上就安装了硫化镉-碲化铟(CdS/InSb)探测器^[22],虽然探测器称为紫外-红外双色夹心探测器,但当时集成技术不完善,实际上还是两个独立的探测器。而国内最早出现则是,1987年张烽生等人^[23]设计研究出了 $\text{p}^+/\text{p}/\text{n}$ 结构的硅光伏探测器,其采用的 p^+/p 前表面高低结能够有效地减少表面损失和增大紫外波段的响应率,同时也大大减少了表面发射区的复合电流分量,所制备器件应用光谱范围为190~1150 nm。而当时优秀的红外光敏材料——碲镉汞材料多用于研究红外双色探测器^[12, 24-25]。

总的来说早期关于紫外-红外双色集成探测器的研究,由于集成技术限制、高质量紫外光敏材料制备困难等原因,还只处于初步探索阶段。

2.2 21世纪

进入21世纪的近20年来,紫外-红外双色集成探测器技术得到了较快发展。高晶体质量紫外光敏材料

的生长外延问题被逐渐解决，新的紫外光敏材料在不断地涌现，如氧化物材料和Ⅲ族氮化物材料等，研究人员在紫外光敏材料的选择上逐渐拓宽了视线，但目前红外探测技术由于量子效率低、工作温度低等原因仍然制约着其发展。

2.2.1 氧化物材料

氧化物材料是较早出现作为紫外探测器的光敏材料之一。1996 年 ZnO 材料作为氧化物材料被发现，在室温下会发生光泵紫外受激发射^[26]，另外与氮化镓（GaN）相比，ZnO 具有激子束缚能大、更好的抗辐射损伤及可进行湿法化学处理等优点，因此 ZnO 材料迅速成为替代 GaN 的首选材料^[27]。

2003 年，I. S. Jeong 等人^[28]研制出了 n-ZnO/p-Si 紫外-可见光双色探测器，他们利用 n-ZnO 作为紫外光敏材料和 p-Si 作为可见光光敏材料制备成紫外增强型光电二极管，实现了在一个器件上同时检测紫外和可见光两个波段，相应波段为 310~650 nm，其结构示意图如图 1 所示^[28]。2004 年，王丽玉等人^[27]采用平面工艺在 p 型硅（p-Si）背底上利用电子束蒸发制备 Al 欧姆电极，并且在 p-Si 外延层上利用溅射制备掺杂 Al 的 ZnO 薄膜，再蒸发 Al 作为有源区欧姆电极，制备成 n-ZnO/p-Si 异质结紫外增强型光电探测器，相对于前者，器件在 200~400 nm 紫外光响应明显增强，另外在可见光部分（如 468、525 nm 处）也有明显的光谱峰值响应。2007 年，朱慧群等人^[29]采用直流反应溅射法制备了高响应度的 n-ZnO/p-Si 紫外至近红外增强型广谱光电探测器，他们采用缺氧法在 n-ZnO 薄膜内有效引入氧空位，这种氧空位可以有效地增强紫蓝波段的光响应，使探测器既具有 ZnO 探测器在紫外波段高灵敏度的光相应能力，又具有 Si 探测器在可见光部分的优势，且克服了 Si 探测器在紫蓝光区光响应较弱的缺点，其在紫外区（310~388 nm）的响应度达到 0.75~1.38 A/W，紫蓝光区（400~430 nm）的光响应也大大增强，400~800 nm 波段的响应度稳定在 0.9 A/W。2010 年，邵佳锋等人^[30]成功制备出低成本的氧化锌/硫化铅（ZnO/PbS）紫外-红外双色集成探测器，他们采用具有低有效质量特点的 PbS 量子点敏化过的纳米多孔结构 ZnO 薄膜作为光敏材料，测试结果显示探测器响应光谱范围为 500~1400 nm，并且可以通过增加 PbS 量子点的尺寸，增加探测器的光谱响应范围到 2.9 μm，探测器结构示意图如图 2 所示。

ZnO 材料虽然在加入 Mg 组分下其禁带宽度范围可以达到 3.3~7.8 eV^[31]，但 ZnO 材料作为紫外-红外探测部分中的紫外光敏材料，需要在强光和低噪声背景下才能有较好的探测效果，响应度较低。在近几年，

另一种氧化物——β-Ga₂O₃ 材料由于其禁带宽度高达 4.2~5.2 eV，能够探测日盲紫外波段（200~280 nm），且成本低、物理化学性质稳定，在国内外相继出现了一些β-Ga₂O₃ 日盲紫外探测器的报道。2016 年，X. Z. Liu 等人^[32]报道了采用分子束外延（Molecular Beam Epitaxy, MBE）外延生长的β-Ga₂O₃ 日盲紫外探测器，在 20 V 偏压和 254 nm 波长光照下，光电流为 438 nA，光暗电流比达到 10⁴，最大响应度为 259 A/W。2017 年，F. Alema 等人^[33]报道了通过 MBE 在 β-Ga₂O₃（010）衬底上同质外延 Ge 掺杂 β-Ga₂O₃ 薄膜制备而成的垂直型 β-Ga₂O₃ 肖特基结构日盲紫外探测器，其探测器结构示意图和光学显微镜照片如图 3 所示，在 1 V 偏压下，暗电流约为 100 fA，在 230 nm 波长下响应度为 0.09 A/W，量子效率为 52%。β-Ga₂O₃ 材料的出现也为氧化物材料紫外-红外双色集成探测器带来了新的可能。

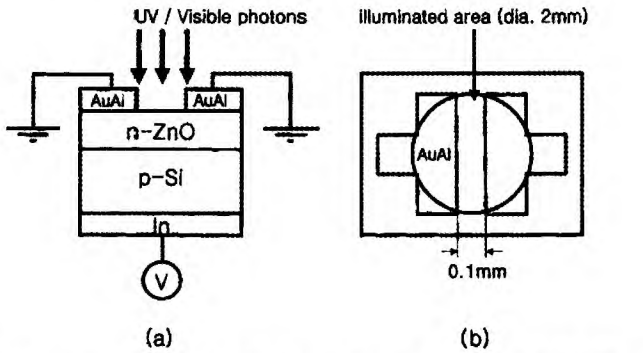


图 1 I. S. Jeong 等人报道的 n-ZnO/p-Si 紫外-可见光双色探测器：(a)探测器结构示意图；(b)俯视结构示意图

Fig.1 Schematic illustrations of (a) cross-sectional and (b) plan views of n-ZnO/p-Si photodiode reported by I. S. Jeong et al.

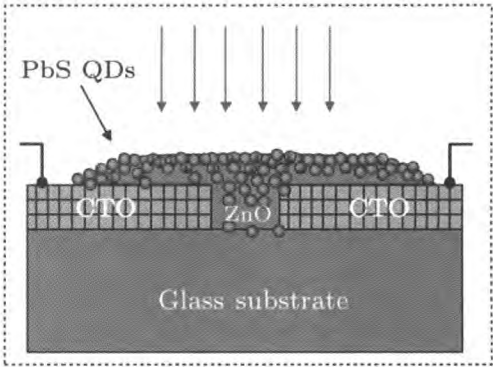


图 2 邵佳锋等人报道的 ZnO/PbS 紫外-红外双色集成探测器结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the ZnO/PbS ultraviolet-infrared dual-band detectors reported by SHAO Jiafeng et al.

2.2.2 Ⅲ族氮化物材料

在 20 世纪末，Ⅲ族氮化物在当时得到较大发展，

研究人员多以 GaN 为紫外探测系统中的光敏材料进行研究, GaN 基三元合金 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 材料是波长范围连续的直接带隙半导体, 其带隙会随材料 Al 组分的变化而在 3.4~6.2 eV 连续变化, 带隙变化对应的波长范围为 200~365 nm^[34], 由于当时没有合适的衬底与 AlGaIn 材料相匹配, 造成其薄膜出现大量缺陷, 严重影响其性能, 对器件工艺也造成了极大挑战。但在 20 世纪之后随着外延技术越来越完善, III 族氮化物半导体材料的生长难题逐渐被解决, III 族氮化物材料又重新进入人们的视野当中, 研究人员开始尝试将具有优秀紫外波段响应特性的 III 族氮化物材料运用到紫外-红外双色集成探测器上, 其晶格常数与禁带宽度关系如图 4 所示。

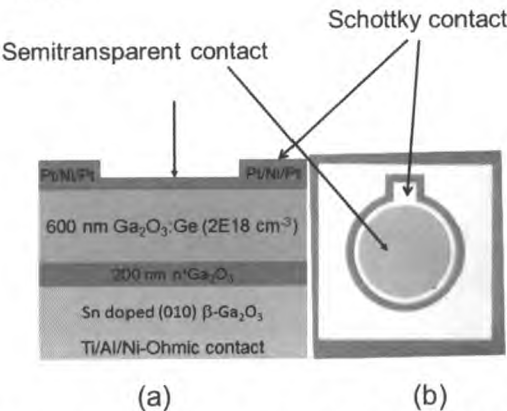


图 3 F. Alema 等人报道的垂直型 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 肖特基结构日盲紫外探测器: (a) 探测器结构示意图; (b) 光学显微镜照片

Fig.3 (a) Schematic diagram and (b) microscope photograph of vertical $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ Schottky structure ultraviolet detectors reported by F. Alema et al.

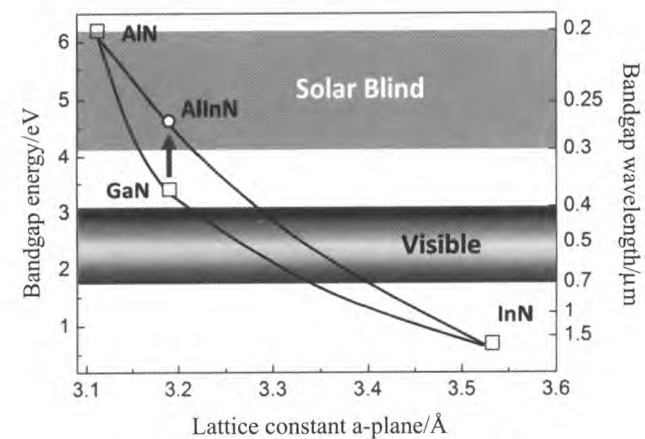


图 4 III 族氮化物合金的晶格常数和禁带宽度

Fig.4 Lattice constants and band gap of III nitrides

2004 年, D. Starikov 和 C. Boney 等人^[35]通过 p 型氮化镓/n 型铟镓氮 (p-GaN/n-InGaN) 异质结和 p-Si/n-Si 结分别作为紫外和红外探测系统, 成功制备出叠层式紫外-红外双色集成探测器, p-GaN/n-InGaN

异质结在 225~365 nm 波段有较好响应, 而 p-Si/n-Si 结则在 250~1100 nm 均有响应。2006 年, G. Ariyawansa 等^[36-38]利用高 Al 组分的 $\text{Al}_{0.026}\text{Ga}_{0.974}\text{N}$ 和 AlGaIn/GaN 异质结分别实现紫外和红外探测, 成功制备出叠层式 AlGaIn/GaN 紫外-红外双色集成探测器, 其紫外响应峰在 360 nm 处, 红外波段则在 8~14 μm 有较好响应。在随后两年里, 他们又对 AlGaIn 中 Al 组分以及器件结构进一步进行优化, 提高了探测器在紫外和红外光波段的器件响应度和灵敏度, 其探测器结构示意图和光谱响应图如图 5 所示。2008 年, D. Hofstetter 等^[39]制备出了 AlGaIn/GaN/AlN 紫外-近红外双色探测器, 他们同样利用 AlGaIn 作为紫外-红外双色集成探测器中的紫外光敏材料, 而用 AlN/GaN 异质结作为响应红外波段的红外探测系统, 另外, 他们采用了并列式结构将紫外和红外探测器系统集成在蓝宝石衬底同一平面上, 其探测器结构示意图和光学显微镜照片如图 6 所示。

2008 年, 李献杰等人^[40]提出采用钛酸锶钡 (BST) 热释电容结构来进行红外探测, 制备出基于 AlGaIn/GaN 材料体系和 BST 铁电薄膜材料复合的单片集成红外-紫外双色探测器, 二者用多孔 SiO_2 实现热隔离。2009 年, 张燕^[41]利用锆钛酸铅 (PZT) 铁电薄膜的热电转化功能来实现红外信号的电学响应, 制备出了新型的 AlGaIn/PZT 材料紫外-红外双色集成探测器的原型器件。2013 年, 矫淑杰等人^[42]报道了利用高 Al 组分 AlGaIn 和多周期 AlGaIn/GaN 异质结分别实现紫外和红外探测, 实现了 AlGaIn/GaN 紫外-红外双色集成探测器, 但由于自由载流子的吸收与波长成正比, 探测器在中短波红外的信号非常弱。随后在 2014 年齐利芳等人^[43]又提出通过 AlGaIn/GaN 异质结界面自由电子吸收和功函数内部光致发射效应来完成红外光探测, AlGaIn 势垒层带间吸收实现紫外探测, 采用分子束外延 (MBE) 技术在蓝宝石衬底上依次生长 $\text{n}^+\text{-GaN}$ 下电极层、i 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 势垒层和 $\text{n}^+\text{-GaN}$ 发射极层, 制作了 AlGaIn/GaN 异质结单片集成紫外-红外双色集成探测器, 器件结构示意图如图 7 所示。

国内外许多相关报道都基本实现了紫外-红外双色集成探测器的原型器件, 其中紫外探测系统大多都利用高 Al 组分 AlGaIn 的带间跃迁来实现, 具有较好的紫外响应, 但红外探测系统的器件性能仍然需要进一步提高, 因而亟待需要一种新的研究思路来实现红外-紫外双色探测器。1987 年, B.F. Levine 等人^[44]报道了第一个砷化镓/铝镓砷 ($\text{GaAs/Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) 量子阱红外探测器。在这之后, 量子阱红外探测器逐渐进

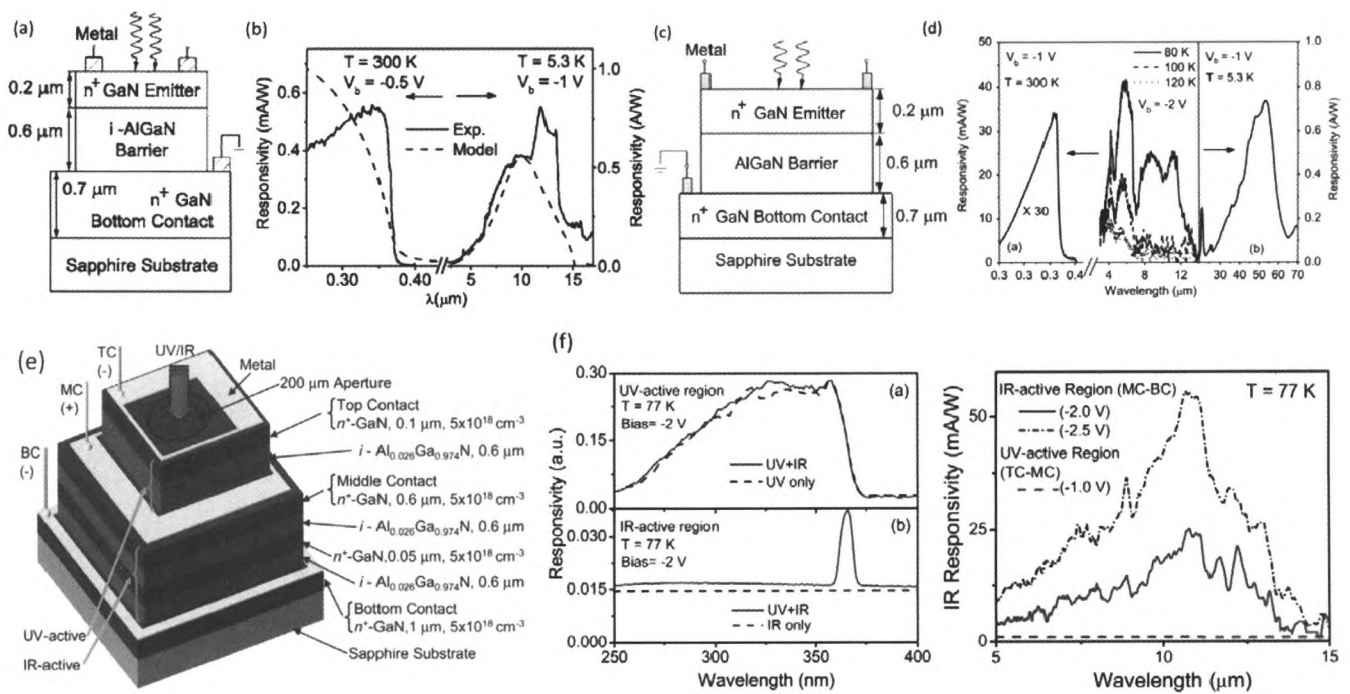


图5 G. Ariyawansa 等人分别于不同时间制备的叠层式 AlGaIn/GaN 紫外-红外双色集成探测器结构示意图及其光谱响应图: (a)、(b)为2006年; (c)、(d)为2007年; (e)、(f)为2008年

Fig.5 Schematic diagrams and UV/IR dual-band response of the AlGaIn/GaN ultraviolet-infrared dual-band detectors reported by G. Ariyawansa et al. in (a)(b) 2006, (c)(d) 2007 and (e)(f) 2008

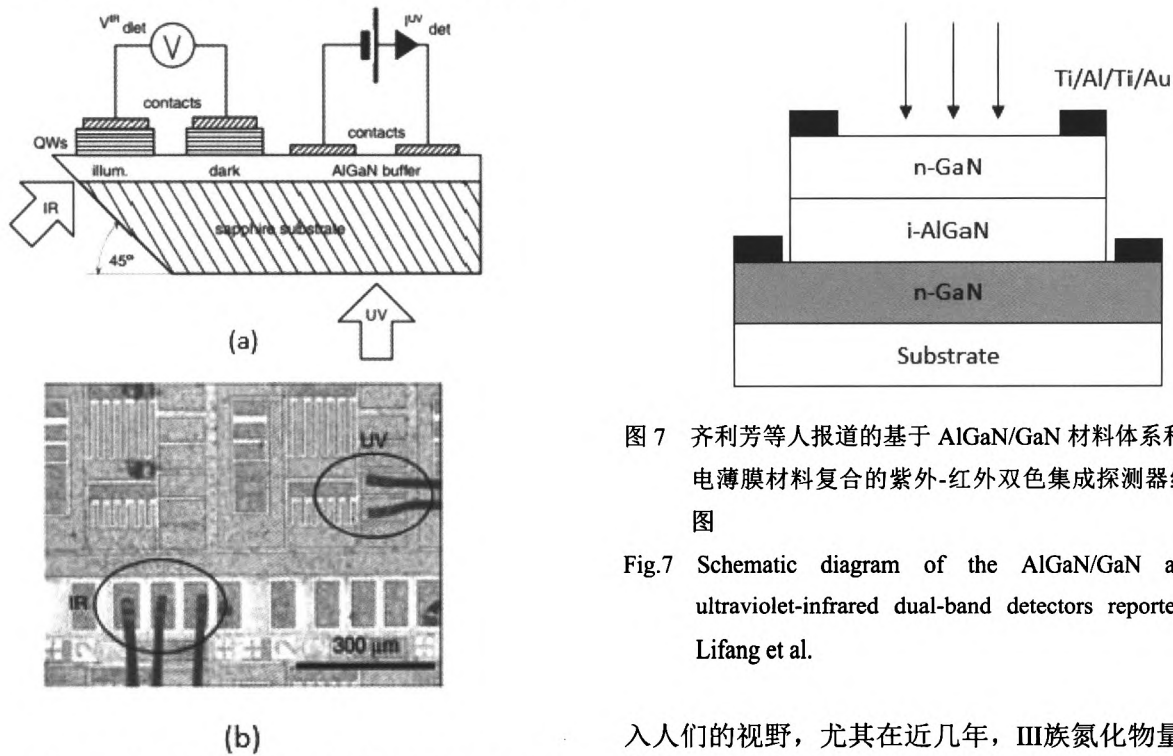


图6 D. Hofstetter 等人制备出的并列式 AlGaIn/GaN/AlN 紫外-近红外双色探测器: (a)探测器结构示意图; (b)探测器光学显微镜照片

Fig.6 (a) Schematic diagram and (b) microscope photograph of the AlGaIn/GaN/AlN ultraviolet-near infrared dual-band detectors reported by D. Hofstetter et al.

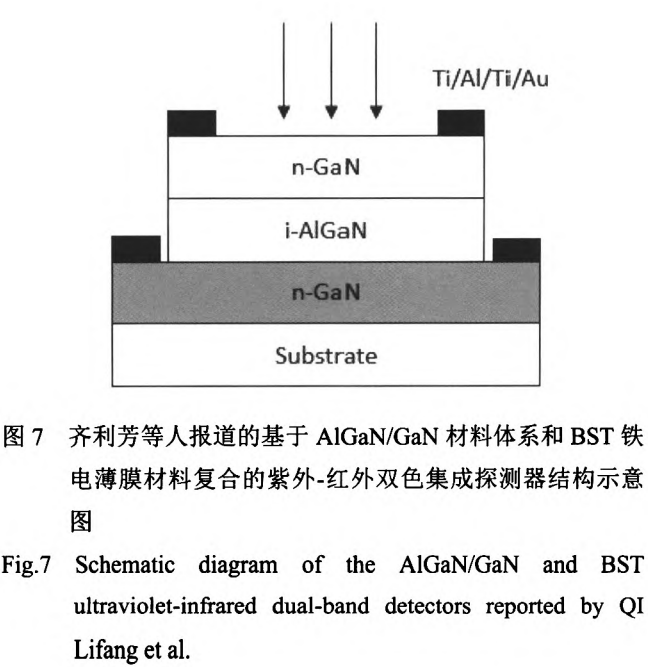


图7 齐利芳等人报道的基于 AlGaIn/GaN 材料体系和 BST 铁电薄膜材料复合的紫外-红外双色集成探测器结构示意图

Fig.7 Schematic diagram of the AlGaIn/GaN and BST ultraviolet-infrared dual-band detectors reported by QI Lifang et al.

入人们的视野, 尤其在近几年, III族氮化物量子阱红外探测器得到了飞速发展^[45]。2015 年, 荣兴等人^[46]报道了多周期阶梯量子阱 (step-QWs) 红外探测器, 他们在普通的重复周期 AlGaIn/GaN 量子阱间加入一层 16 nm 的 Al_{0.25}Ga_{0.75}N 势垒层, 通过这一层势垒层来拉平量子阱结构的导带, 成功解决了 AlGaIn/GaN 量子阱内存在极化电场的问题, 有利于垂直方向上载

流子传输，确保了材料沿着 c 轴外延生长时高晶体质量，同时也降低了暗电流，探测器结构示意图和能带图如图 8 所示。由于 AlGa $_x$ N 基紫外探测和 AlGa $_x$ N/GaN 量子阱红外探测二者光敏材料具有非常好的兼容性，能够通过一次外延生长实现高晶体质量的紫外-红外探测器结构，所以 III 族氮化物量子阱红外探测器性能的提高，也为日后 AlGa $_x$ N 基紫外探测和 AlGa $_x$ N/GaN 量子阱红外探测集成的紫外-红外双色集成探测器打下了坚实的基础。

另外，以石墨烯（Graphene）为代表的二维材料的出现和成功制备^[47]为各领域的发展注入了新的活力，也为紫外-红外双色集成探测器的发展带了新的方向。单原子层石墨烯从红外到可见光的波段范围的吸收可达 2.3%^[48]，而达到同样的吸收效率需要 15 nm 厚的 Si 材料或 20 nm 厚的 GaAs 材料。同时，石墨烯材料还具有非常高的载流子迁移率（室温下可超过

200000 cm²/Vs^[49]）和光生载流子倍增效应^[50-51]，因而是极具应用前景的高响应频率、高响应度和宽响应光谱光电探测材料。在 2013 年张永哲等人^[52]通过引入缺陷中间态能带的方法将单层石墨烯光电探测器的响应度提高到了 8.61 A/W，并实现了对可见、近红外和中红外波段的探测。2015 年，刘翌寒等人^[53]提出通过单层石墨烯的红外相应特性来实现红外光探测，采用金属有机化学气相沉淀法（MOCVD）和化学气相沉淀法（CVD）生长技术对高 Al 组分 AlGa $_x$ N 和单层石墨烯材料进行纵向集成成功制备了日盲紫外-近红外双色探测器，其在紫外波段响应峰位 263 nm 处，红外波段则在 1.15 μ m 处，其探测器结构示意图和光学显微镜照片如图 9 所示。二维材料作为红外光敏材料可以通过外延生长或转移法与紫外探测器纵向集成，二者具有较好的兼容性，二维材料在紫外-红外探测领域也有着巨大的应用前景。

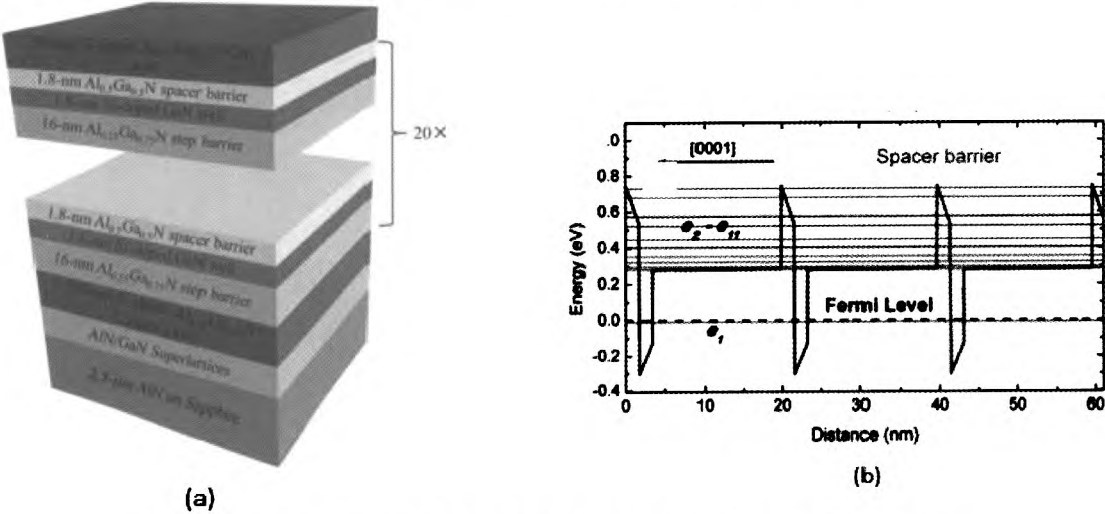


图 8 荣兴等人报道的阶梯量子阱红外探测器：(a)结构示意图；(b)能带示意图

Fig.8 (a) Schematic diagram and (b) conduction band profile of the AlGa $_x$ N/GaN step-QWs ultraviolet-infrared dual-band detectors reported by RONG Xing et al.

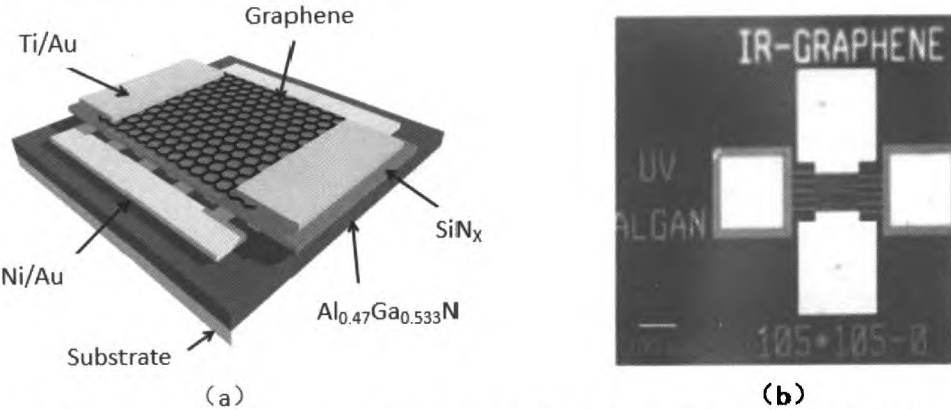


图 9 刘翌寒等人报道的 AlGa $_x$ N/Graphene 紫外-红外双色集成探测器：(a)结构示意图；(b)器件光学显微镜图

Fig.9 (a) Schematic diagram and (b) microscope photograph of the AlGa $_x$ N/Graphene ultraviolet-infrared dual-band detectors reported by LIU Yihan et al.

2.2.3 其他紫外光敏材料

紫外-红外集成双色探测系统中新型紫外光敏材料除了主流的氧化物材料和III族氮化物材料之外，还有其他许多具有紫外波段响应特性的材料存在，如 SiC 和 CdS 等^[54-59]。2014 年，X. Liu 等人^[56]通过溶胶-凝胶法将 CdS、CdSe 和 CdSe 纳米线与氧化铟锌 (IZO) 结合，发现这些纳米线不仅能提升 IZO 透明薄膜晶体管的迁移率，还使得器件在可见光波段具有较好光响应，在紫外-可见光双色探测技术上有着较大的应用潜力；2017 年，李庆等人^[58]报道了基于新型的时域有限差分光子学分析方法联合有限元电学分析方法研究 Pt/CdS 紫外与 InSb 红外双色焦平面阵列探测器，发现超薄 Pt 金属膜与 CdS 形成肖特基结可以获得较大的紫外光响应，并且能更好地耦合红外光，模拟出基于 Pt/CdS 和 InSb 键合结构的光伏型紫外-红外焦平面探测器，其器件结构以及归一化光谱响应如图 10 所示。这些新型紫外光敏材料研究进展的不断加

速，与红外探测系统结合，为紫外-红外集成探测技术的发展提供新的思路与途径。

3 结论

自 20 世纪 70 年代多波段探测器概念提出以来，在近 50 年间报道了多种通过不同的工作原理、光敏材料以及器件结构成功制备出各种类型的紫外-红外双色集成探测器，这也是光电探测器往着焦平面、大列阵、多色化、小体积、集成化趋势发展的集中体现。虽然目前紫外-红外探测技术中晶格不匹配带来的紫外-红外光敏材料或探测系统集成困难、集成器件后红外探测系统的探测性能弱以及双色集成探测器结构复杂等问题仍然制约着其向着商业化、民用化快速发展，但量子阱材料、二维材料等新型光敏材料以及键合结构等新型集成技术的出现都将会为紫外-红外双色集成探测器进一步发展提供新的契机。

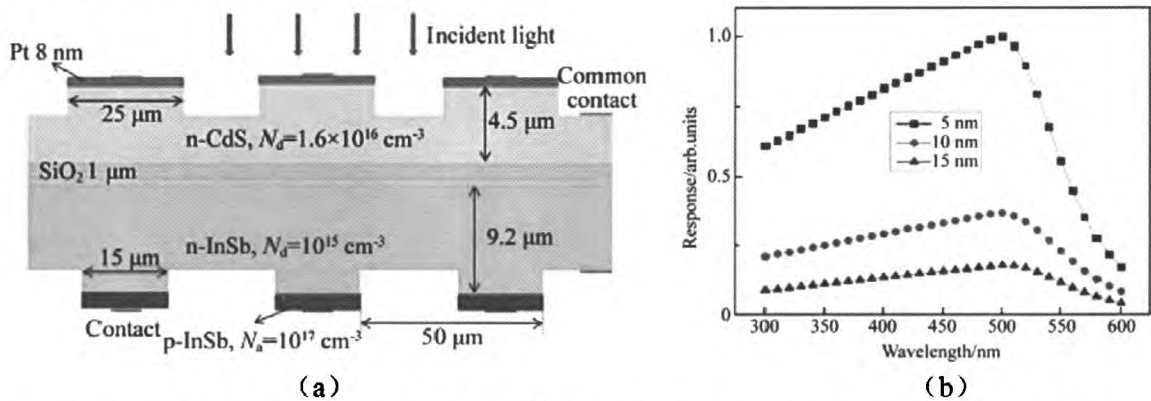


图 10 李庆等人报道的基于 Pt/CdS 和 InSb 紫外-红外焦平面探测器：(a)结构示意图；(b)归一化光谱响应

Fig.10 (a) Schematic diagram and (b) spectral response of ultraviolet- infrared focal-plane array detector based on Pt/CdS and InSb junctions reported by LI Qing et al.

参考文献：

[1] 龚海梅, 邵秀梅, 李向阳, 等. 航天先进红外探测器组件技术及应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3129-3140.
GONG Haimei, SHAO Xiumei, LI Xiangyang, et al. Advanced technology and application of spaceborne infrared detectors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3129-3140.

[2] 宫欣欣. 微纳材料在红外探测器及应变传感器中的应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
GONG Xinxin. The application of micro-nano materials in infrared and strain sensors[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.

[3] 艾璃. 国外红外探测器的发展及其在制导武器中的应用[J]. 红外技术, 1996, 18(3): 5-11.
AI Li. Development of Foreign Infrared Detectors and Their Applications in Guided Weapons[J]. *Infrared Technology*, 1996, 18(3): 5-11.

[4] 赵鸿燕, 倪永平, 王秀萍. 红外探测器的发展及其在空空导弹上的应用[J]. 飞航导弹, 2008(7): 46-49.
ZHAO Hongyan, NI Yongping, WANG Xiuping. Development of infrared detectors and their application to air-to-air missiles[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2008(7): 46-49.

[5] 李慧蕊. 新型紫外探测器及其应用[J]. 光电子技术, 2000, 20(1): 45-51.
LI Huirui. New ultraviolet detector and its application[J]. *Optoelectronic Technology*, 2000, 20(1): 45-51.

[6] XIN X, YAN F, Alexandrov P, et al. Demonstration of 4H-SiC UV single photon counting avalanche photodiode[J]. *Electronics Letters*, 2005, 41(4): 212-214.

[7] 张燕, 龚海梅, 白云, 等. 空间用紫外探测及 AlGaIn 探测器的研究进展[J]. 激光与红外, 2006, 36(11): 1009-1012.

- ZHANG Yan, GONG Haimei, BAI Yu, et al. UV detection applied to space and the research development of AlGaIn detector[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(11): 1009-1012.
- [8] 刘榴娣, 倪国强, 钟生东, 等. 紫外线的应用, 探测及其新发展[J]. *光学技术*, 1998(2): 87-90.
- LIU Liudi, NI Guoqiang, ZHONG Shengdong, et al. Application and detection of ultraviolet and their new development[J]. *Optical Technology*, 1998(2): 87-90.
- [9] 蔡毅. 双色红外探测器的现状与发展[J]. *红外技术*, 1997, **19**(5): 1-4.
- CAI Yi. The status and development of dual-color infrared detector[J]. *Infrared Technology*, 1997, **19**(5): 1-4.
- [10] Gökkavas M, Butun S, Tut T, et al. AlGaIn-based high-performance metal-semiconductor-metal photodetectors[J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2007, **5**(2): 53-62.
- [11] Polyakov V I, Rukovichnikov A I, Rossukanyi N M, et al. Photodetectors with CVD diamond films: Electrical and photoelectrical properties photoconductive and photodiode structures[J]. *Diamond and related materials*, 1998, **7**(6): 821-825.
- [12] 韩舜. MgZnO 薄膜及其紫外光电探测器制备和特性研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2011.
- HAN Shun. The fabrication and characterization of MgZnO thin films and MgZnO based ultraviolet detectors[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [13] Horng R H, HUANG C Y, OU S L, et al. Epitaxial Growth of ZnGa₂O₄: A New, Deep Ultraviolet Semiconductor Candidate[J]. *Crystal Growth & Design*, 2017, **17**(11): 6071-6078.
- [14] 刘万金, 胡小燕, 喻松林. GaN 基紫外探测器发展概况[J]. *激光与红外*, 2012, **42**(11): 1210-1214.
- LIU Wanjin, HU Xiaoyan, YU Songlin. Development overview of GaN-based ultraviolet detector[J]. *Laser & Infrared*, 2012, **42**(11): 1210-1214.
- [15] Bajaj J, Sullivan G, LEE D, et al. Comparison of type-II superlattice and HgCdTe infrared detector technologies[C]//*Proc. SPIE*. 2007, **6542**: 65420B.
- [16] Tidrow M Z, ZHENG L, Barcikowski H, et al. Recent Success on SLS FPAs and MDA's New Direction for Development[C]//*Proc. SPIE*, 2009, **7298**: 72981O-1.
- [17] 史衍丽. 第三代红外探测器的发展与选择[J]. *红外技术*, 2013, **35**(1): 1-8.
- SHI Yanli. Choice and Development of the Third-Generation Infrared Detectors[J]. *Infrared Technology*, 2013, **35**(1): 1-8.
- [18] Herschel W. XIV. Experiments on the refrangibility of the invisible rays of the sun[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1800, **90**: 284-292.
- [19] Smith W. Effect of Light on Selenium[J]. *Nature*, 1873, **7**: 303.
- [20] Lee R E, McDermott P S, Pan E S. Method for making an infrared sensor: U.S. Patent 3,642,529[P]. 1972-2-15.
- [21] 宗兰. 多色 HgCdTe 光电探测器[J]. *激光与红外*, 1973, **2**: 011.
- ZONG Lan. Multi-color HgCdTe Photodetector[J]. *Laser & Infrared*, 1973, **2**: 011.
- [22] Morrison P H, S. Amberntson D. Guidance and control of a cannon-launched guided projectile[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1977, **14**(6): 328-334.
- [23] 张烽生, 朱晓刚, 胡淑纯, 等. 紫外-可见-近红外硅光伏探测器[J]. *传感器与微系统*, 1987(s1): 31.
- ZHANG Fengsheng, ZHU Xiaogang, HU Shuchun, et al. Ultraviolet-visible-near-infrared silicon photodetector[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 1987(s1): 31.
- [24] 苏培超, 余旭彬, 马晖, 等. 双色红外探测器研究[J]. *红外技术*, 1991, **13**(2): 3-8.
- SU Peichao, YU Xubin, MA Hui, et al. Studies of two-color infrared detectors[J]. *Infrared Technology*, 1991, **13**(2): 3-8.
- [25] 徐国森. 三通道中、长波碲镉汞 / 微型滤光片组合探测器[J]. *红外与激光工程*, 1994, **4**: 6.
- XU Guosen. Three-channel medium and long wave cadmium telluride/microfilter combined detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1994, **4**: 6.
- [26] 范正风. 多元光导碲镉汞的双波段红外探测器[J]. *激光与红外*, 1995, **25**(1): 48-51.
- FAN Zhengfeng. Multi-element PC MCT and dual-channel IR detectors[J]. *Laser & Infrared*, 1995, **25**(1): 48-51.
- [27] YU P, TANG Z K, WONG G K L. Room temperature stimulated emission from ZnO quantum dot films[C]//*Proc. 23rd Inter. Conf. on the Physics of Semiconductors. World Scientific*, 1996, **2**: 1453-1456.
- [28] 王丽玉, 谢家纯, 林碧霞, 等. n-ZnO/p-Si 异质结 UV 增强型光电探测器的研究[J]. *电子元件与材料*, 2004, **23**(1): 42-44.
- WANG Liyu, XIE Jiachun, LIN Bixia, et al. Study on n-ZnO/p-Si heterojunction UV enhanced photoelectric detectors[J]. *Electronic Components and Materials*, 2004, **23**(1): 42-44.
- [29] Jeong I S, Kim J H, Im S. Ultraviolet-enhanced photodiode employing n-ZnO/p-Si structure[J]. *Applied physics letters*, 2003, **83**(14): 2946-2948.
- [30] 朱慧群, 丁瑞钦, 庞锐, 等. n-ZnO/p-Si 紫外至近红外增强型广谱光探测器[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(10): 1173-1175.
- ZHU Huiqun, DING Ruiqin, PANG Rui, et al. Preparation of ultraviolet-visible-enhanced photodetector employing n-ZnO/p-Si structure[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2007, **18**(10): 1173-1175.
- [31] Jia-Feng S, Perera A G U, Jayaweera P V V, et al. Low-cost UV-IR dual band detector using nonporous ZnO film sensitized by PbS quantum dots[J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, **27**(2): 027302.
- [32] LIU X Z, GUO P, SHENG T, et al. β -Ga₂O₃ thin films on sapphire pre-seeded by homo-self-templated buffer layer for solar-blind UV photodetector[J]. *Optical Materials*, 2016, **51**: 203-207.

- [33] Alema F, Hertog B, Osinsky A, et al. Vertical solar blind Schottky photodiode based on Homoepitaxial Ga_2O_3 thin film[C]//*Proc. of SPIE*, 2017, **10105**: 101051M-1.
- [34] 黄瑾, 洪灵愿, 刘宝林, 等. AlInGa_N/Ga_N PIN 紫外光电探测器的研制[J]. *半导体光电*, 2008, **29**(5): 669-672.
- HUANG Jin, HONG Linyuan, LIU Baolin, et al. Development on AlInGa_N/Ga_N PIN ultraviolet photodetectors[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, **29**(5): 669-672.
- [35] Starikov D, Boney C, Pillai R, et al. Dual-band UV/IR optical sensors for fire and flame detection and target recognition[C]//*Sensors for Industry Conference, Proceedings the ISA/IEEE*, 2004: 36-40.
- [36] Ariyawansa G, Rinzan M B M, Alevli M, et al. GaN/AlGa_N ultraviolet/infrared dual-band detector[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(9): 091113.
- [37] Perera A G U, Ariyawansa G, Rinzan M B M, et al. Performance improvements of ultraviolet/infrared dual-band detectors[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2007, **50**(2): 142-148.
- [38] Jayasinghe R C, Ariyawansa G, Dietz N, et al. Simultaneous detection of ultraviolet and infrared radiation in a single Ga_N/GaAl_N heterojunction[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(21): 2422-2424.
- [39] Hofstetter D, Theron R, Baumann E, et al. Monolithically integrated AlGa_N/Ga_N/Al_N-based solar-blind ultraviolet and near-infrared detectors[J]. *Electronics Letters*, 2008, **44**(16): 986-988.
- [40] 李献杰, 赵永林, 齐丽芳, 等. Ga_N/BST 单片集成紫外红外双色探测器的研制[J]. *半导体技术*, 2008(S1): 238-240.
- LI Xianjie, ZHAO Yonglin, QI Lifang, et al. Monolithically integrated Ga_N/BST ultraviolet-infrared dual color photodetector[J]. *Semiconductor Technology*, 2008(s1): 238-240.
- [41] 张燕, 王妮丽, 孙璟兰, 等. 新型的 AlGa_N/PZT 材料紫外/红外双波段探测器[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(2): 210-212, 255.
- ZHANG Yan, WANG Nili, SUN Jinglan, et al. New AlGa_N/PZT ultraviolet/infrared dual-band detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(2): 210-212, 255.
- [42] JIAO S, WANG D, GUO F, et al. Demonstration Of Ga_N/AlGa_N Heterojunction For Dual Band Detection[C]//*AIP Conference Proceedings. AIP*, 2011, **1399**(1): 149-150.
- [43] 齐丽芳, 李献杰, 唐卓睿, 等. AlGa_N/Ga_N 异质结单片集成紫外/红外双色探测器[J]. *半导体技术*, 2014, **39**(8): 575-578.
- QI Lifang, LI Xianjie, TANG Zhuorui, et al. Monolithically Integrated UV/IR dual-color photodetector with AlGa_N/Ga_N heterojunction structure[J]. *Semiconductor Technology*, 2014, **39**(8): 575-578.
- [44] Levine B F, Choi K K, Bethea C G, et al. New 10 μm infrared detector using intersubband absorption in resonant tunneling GaAlAs superlattices[J]. *Applied Physics Letters*, 1987, **50**(16): 1092-1094.
- [45] 史衍丽. 国外量子阱红外焦平面探测器的发展概况[J]. *红外技术*, 2005, **27**(4): 274-278.
- SHI Yanli. Development status of quantum well infrared photodetectors in the euramerican countries[J]. *Infrared Technology*, 2005, **27**(4): 274-278.
- [46] RONG X, WANG X Q, CHEN G, et al. Mid-infrared Photoconductive Response in AlGa_N/Ga_N Step Quantum Wells[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 14386.
- [47] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, **306**(5696): 666-669.
- [48] Nair R R, Blake P, Grigorenko A N, et al. Fine structure constant defines visual transparency of graphene[J]. *Science*, 2008, **320**(5881): 1308-1308.
- [49] Morozov S V, Novoselov K S, Katsnelson M I, et al. Giant intrinsic carrier mobilities in graphene and its bilayer[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **100**(1): 016602.
- [50] Winzer T, Knorr A, Malic E. Carrier multiplication in graphene[J]. *Nano Letters*, 2010, **10**(12): 4839-4843.
- [51] Tielrooij K J, SAJJCW S, Centeno A. A. Pesquera, AZ Elorza, M. Bonn, LS Levitov, and FHL Koppens[J]. *Nat. Phys.*, 2013, **9**: 248.
- [52] ZHANG Y, LIU T, MENG B, et al. Broadband high photoresponse from pure monolayer graphene photodetector[J]. *Nature Communications*, 2013, **4**: 1811.
- [53] 刘翌寒, 曹伟, 李绍娟, 等. 一种基于 AlGa_N 和石墨烯的紫外-红外双色探测器[J]. *发光学报*, 2015, **36**(10): 1167-1170.
- LIU Yihan, CAO Wei, LI Shaojuan, et al. AlGa_N and graphene based UV-IR dual-color detectors[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(10): 1167-1170.
- [54] GUO X, Beck A L, HUANG Z, et al. Performance of low-dark-current 4H-SiC avalanche photodiodes with thin multiplication layer[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2006, **53**(9): 2259-2265.
- [55] CHEN X, ZHU H, CAI J, et al. High-performance 4H-SiC-based ultraviolet p-i-n photodetector[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, **102**(2): 024505.
- [56] LIU X, JIANG L, ZOU X, et al. Scalable Integration of Indium Zinc Oxide/Photosensitive - Nanowire Composite Thin - Film Transistors for Transparent Multicolor Photodetectors Array[J]. *Advanced Materials*, 2014, **26**(18): 2919-2924.
- [57] MIAO J, HU W, GUO N, et al. High-Responsivity Graphene/InAs Nanowire Heterojunction Near-Infrared Photodetectors with Distinct Photocurrent On/Off Ratios[J]. *Small*, 2015, **11**(8): 936-942.
- [58] 李庆, 白杰, 吕衍秋, 等. 基于 Pt/CdS 与 InSb 光伏型紫外-红外焦平面探测器的双色探测机理(英文)[J]. *红外与毫米波学报*, 2017, **36**(4): 385-388.
- LI Qing, BAI Jie, LV Yanqiu, et al. Analysis of ultraviolet and infrared dual-color focal-plane array detector based on Pt/CdS and InSb junctions[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, **36**(4): 385-388.
- [59] QIN Q, ZHU X, YANG W. The Development of Pt/CdS Schottky Barrier Ultraviolet Detector[J]. *Infrared Technology*, 2006, **28**(4): 234.