

可用于多波段融合的超结构/阻挡杂质带 复合结构探测器 (特邀)

崔慧源, 陈雨璐*, 王晓东*

(中国电子科技集团公司第五十研究所, 上海 200331)

摘要: 太赫兹辐射是指频率在 $30\ \mu\text{m}\sim 1\ \text{mm}$ 范围内的电磁波, 具有穿透性强、安全性高、特征性强及定向性好等特点, 因此, 太赫兹技术在天文观测、安全监控、物质鉴定及生物医学等领域具有广阔的应用前景。阻挡杂质带探测器具有灵敏度高、阵列规模大、探测谱段宽等核心优势, 是太赫兹辐射探测的优良选择。阻挡杂质带探测器目前主要采用三种材料体系, 分别为 Si、Ge、GaAs。基于这三种材料体系的阻挡杂质带探测器可实现在 $3\sim 500\ \mu\text{m}$ 的超宽波段探测。超结构是由亚波长结构单元构成人工复合结构, 在光电探测器上引入超结构, 利用等离子激元共振、偶极共振调控特性, 可以将电磁场能量强烈的局域在金属/探测器界面位置。因此, 超结构与阻挡杂质带结合, 可有效调控探测峰位、缩小探测峰半高宽、强化光谱分辨能力, 并有望大规模应用于 $3\sim 500\ \mu\text{m}$ 的多波段融合探测。同时, 超结构与阻挡杂质带探测器结合, 可进一步提高器件响应率, 减小器件尺寸, 降低工艺难度。文中简要叙述了阻挡杂质带探测器的工作机理, 介绍了国内外阻挡杂质带探测器的研究历史及研究现状。最后, 在探测器波段调控、光谱分辨、增强吸收等角度详细介绍了 Si、Ge、GaAs 基超结构/阻挡杂质带复合结构探测器的研究现状, 并结合目前该技术发展瓶颈问题, 在高纯材料生长、光场局域效应机理研究等方面提出了下一步的研究展望。

关键词: 阻挡杂质带; 太赫兹; 光电探测器; 超结构

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211012

Multiband fusion detection based on superstructure/ blocking-impurity-band combination detector (Invited)

Cui Huiyuan, Chen Yulu*, Wang Xiaodong*

(The 50th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 200331, China)

Abstract: Terahertz radiation refers to electromagnetic waves with a wavelength range of $30\ \mu\text{m}\sim 1\ \text{mm}$, characterized by strong penetration, high safety, strong specificity and good orientation. Therefore, terahertz technology has broad application prospects in the fields of astronomical observation, safety monitoring, substance identification and biomedicine. Blocking-impurity-band detector has the advantages of high sensitivity, large array size and wide detection spectrum, which is an excellent choice for terahertz radiation detection. At present, the blocking-impurity-band detector is mainly based on three material systems, namely Si, Ge and GaAs. Si, Ge and GaAs-based blocking-impurity-band detectors can be used for ultra-wide band detection from $3\ \mu\text{m}$ to $500\ \mu\text{m}$. Superstructure is an artificial composite structure composed of subwavelength structural units. By introducing superstructure into the photoelectric detector, the electromagnetic field energy will be strongly localized at the interface between the metal and the detector through plasmon resonance and dipole resonance modes. So, the combination of superstructure and blocking-impurity-band detector can effectively regulate the detection peak, reduce the full width at half maximum (FWHM) of detection peak and enhance the spectral resolution ability. So it is expected to

收稿日期: 2020-11-12; 修订日期: 2020-12-07

基金项目: 中国电科集团项目资助

be widely used in multiband fusion detection of 3-500 μm . At the same time, the combination of the two technologies can further improve the response rate of the device, reduce the size of the device and reduce the process difficulty. This paper briefly described the working mechanism of the blocking-impurity-band detector. And the research history and status of blocking-impurity-band detector at home and abroad are also introduced. Finally, the superstructure/blocking-impurity-band detector was described in detail in terms of band regulation, spectral resolution and absorption enhance. Combining with the bottleneck problem of this technology, the future research prospect was proposed in the aspects such as high purity material growth and the mechanism of local effect of light field.

Key words: blocking-impurity-band; terahertz; photodetector; superstructure

0 太赫兹技术应用

太赫兹辐射是指波长在 30 μm ~1 mm (0.3 THz~10 THz) 范围内的电磁波, 具有穿透性强、安全性高、特征性强及定向性好等特点, 因此, 太赫兹技术在天文观测、安全监控、物质鉴定及生物医学等领域受到各国科学家的广泛重视^[1-2]。在天文观测方面, 早在 1983 年, 欧洲航天局就发射了第一颗红外天文卫星 (IRAS), 各大国也陆续发射了宇宙背景探测者 (COBE) 卫星、红外线太空天文台 (ISO) 等一系列红外天文卫星。其中, 第一颗 IRAS 卫星使用 12、25、60、100 μm 四种波段探测器, 描绘了 96% 的天空^[3]。美国约翰·霍普金斯大学应用物理实验室设计的中段空间试验卫星上所搭载的载荷 SPIRIT III 采用工作波段为 3.6、4.5、5.8、8.0 μm 四种探测器, 进行多波段探测; NASA 发射的广角红外探测望远镜 (WISE) 的探测器工作波段为 3.3、4.7、12、23 μm , 基于探测器光谱响应特征、目标辐射特性和大气吸收窗口等进行天文观测。

除了在天文观测方面, 太赫兹辐射探测在生物大分子检测以及违禁物品识别等民用领域也具有广阔的应用前景。核酸和蛋白等生物大分子的弱相互作用 (如氢键、范德华力等)、骨架振动和偶极子旋转等正好处于太赫兹波段, 因此太赫兹波可以探测到其他

电磁波无法获得的生物大分子组成、结构和功能等信息。如图 1 所示, 利用太赫兹光谱技术可对脱氧核酸 (DNA) 的特征峰进行识别检测^[4]。

同时, 基于太赫兹波对水的敏感性进行太赫兹成像, 检测生物组织样本含水量及分布的差异可以用于生物诊断。如图 2 所示, 对比肝癌细胞组织的数码照

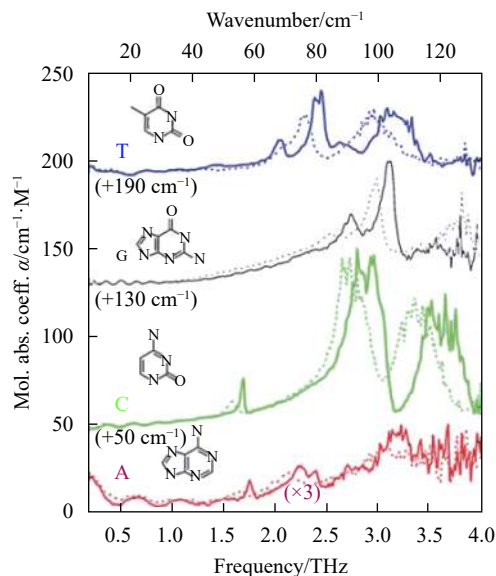


图 1 脱氧核酸 (DNA) 碱基对的特征峰

Fig.1 Characteristic peaks of deoxyribonucleic acid (DNA) base pairs

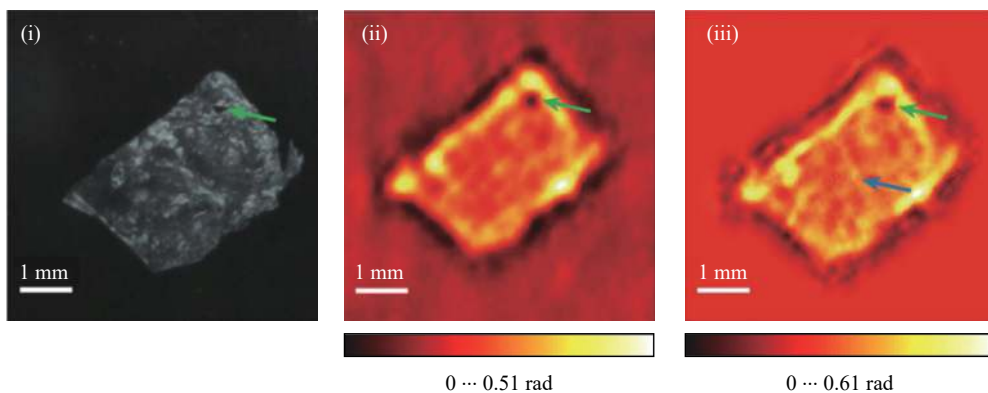


图 2 人的肝癌组织细胞的太赫兹全息图@2.52 THz

Fig.2 Terahertz hologram of a human liver cancer cell@2.52 THz

片 (i), 太赫兹全息图像 (ii, iii)@2.52 THz 能够发现在肝癌细胞组织中明显的纤维化, 为癌症的诊断治疗提供重要的依据和指导^[5]。

1 阻挡杂质带探测器简介

太赫兹辐射探测的核心之一便是光电探测器, 其工作机理在于利用半导体材料载流子在杂质能级、导带、价带之间的跃迁, 实现与能隙相匹配的光波探测。目前国内发展较为成熟的天文应用红外探测器, 以碲镉汞与碲化铟等窄带隙半导体材料为主。碲化铟类探测器, 目前焦平面阵列规模已做到 2 048×2 048, 在 32 K 工作温度下, 器件暗电流可低至 0.01e⁻/s, 探测器典型探测波段为 1.5~5.5 μm^[6]; 对于碲镉汞类探测器, 通过改变其组分配比可实现带隙调控, 进而实现探测波段调控。但是当组分差异过大时, 结晶质量下降, 引入较多缺陷, 造成暗电流急剧上升。通常, 碲镉汞类探测器长波限为 15 μm^[7]。

阻挡杂质带 (Blocked-Impurity-Band, BIB) 探测器

本质上属于杂质能级电子跃迁的光电导类探测器的范畴, 因在吸收层上增加了一层高纯阻挡层而得名。典型器件结构如图 3(a) 所示。BIB 探测器探测原理基于杂质光电导, 在吸收层材料中, 通过掺杂引入浅杂质能级, 在深低温的工作环境下, 大部分载流子被冻结在其电子轨道上, 只有小部分载流子可以通过在杂质能级间跳跃电导的形式参与导电; 当受到辐照时, 被冻结的载流子吸收光子能量, 跃迁至导带, 形成自由电子, 于是半导体材料的导电性增加, 在外加偏压作用下, 形成光响应电流, 完成了光信号到电信号的转化过程。对于上述工作机理, 可以看出, 在无光照的情况下, 杂质能级上的跳跃电导是其暗电流的主要来源, 因此, 在吸收层上通过外延等手段引入一层高纯阻挡层, 以形成 BIB 结构, 在阻挡层处杂质能级不连续, 跳跃电导被抑制, 暗电流急剧下降。n 型掺杂的 BIB 器件工作状态下能带示意图如图 3(b) 所示。BIB 器件具有极低的暗电流及极高的灵敏度^[8-10]。

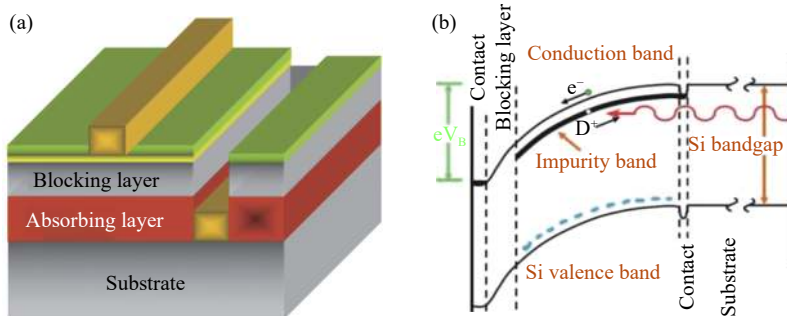


图 3 阻挡杂质带探测器结构示意图及能带示意图

Fig.3 Schematic diagram of structure and energy band of BIB detector

n 型掺杂的 BIB 探测器, 其杂质能级与导带之间的能隙 (即杂质的激活能) 对应于探测谱段。因此, 利用不同杂质元素在不同半导体材料体系内的激活能差异, 可以实现多谱段的 BIB 探测器。目前研究较多的为硅 (Si)、锗 (Ge)、砷化镓 (GaAs) 材料体系, 在 Si 中, 通过 In、Ga、As、P 等元素的引入, 可以实现 3~40 μm 波段的探测^[11]; 在 Ge 中, 通过 Ga、Be、Zn 等元素的引入, 可以将探测波长向长波波段延伸至 200 μm^[9]。而对于 GaAs 体系, Si 杂质的激活能仅为 6 meV, 可将长波探测进一步延伸至 500 μm^[10, 12], 如图 4 所示。相比传统的红外探测器, 阻挡杂质带探测器具有宽谱段覆盖的绝对优势。目前, BIB 探测器成为天基光谱成像系统的首选, 在欧美发达国家已取得广泛应用。例

如, 美国宇航局 NASA 成功发射的斯皮策望远镜 (Spitzer Space Telescope, SST) 搭载了 Si、Ge、GaAs

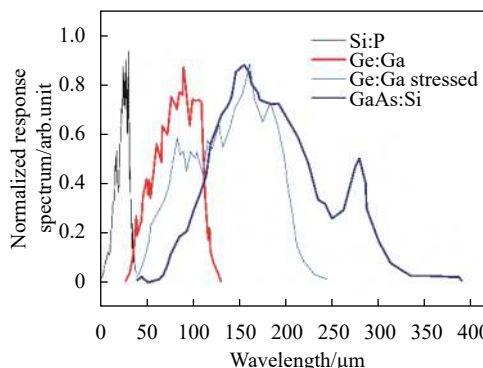


图 4 典型 Si、Ge、GaAs 基阻挡杂质带探测器覆盖谱段

Fig.4 Typical detection spectrum of Si-, Ge- and GaAs-based BIB detectors

基 BIB 探测器, 利用 BIB 探测器的“全谱段”覆盖能力 (Si 基: 5~40 μm ; Ge 基: 37.5~214 μm , GaAs 基: 150~500 μm), 实现天基多波段融合探测应用。

2 超结构与 BIB 集成以实现多波段融合探测

单色探测技术已经有成熟的发展及应用。然而目标物体多种结构单元、组分具有不同的光谱辐射, 因此, 多波段融合探测可以更准确、更清晰、更全面的获取目标信息。多波段融合焦平面阵列器件是指在单一基体材料体系上集成芯片, 实现对多个波段光谱的同时探测, 因此, BIB 探测器大阵列规模、宽响应波段的自身优势成为了太赫兹光谱多波段融合探测的热点。

超结构是由亚波长结构单元构成人工复合结构, 主要通过结构单元中特殊电磁模式的激发, 实现自然材料所不具备的超常物理性质。在光电探测器上引入超结构, 利用等离激元共振、偶极共振调控特性, 可以将电磁场能量强烈的局域在金属/探测器界面位置。不同超结构可调控单一像元的响应峰位, 实现器件选择性增强吸收且波段可调, 达到在单一器件上实现多波段融合探测的目的。同时, 传统的 BIB 结构, 受吸收系数限制, 重掺杂的吸收层需要达到相当的厚度以保证吸收效率, 吸收层厚度需要达到几十 μm 甚至 100 多 μm , 重掺杂下, 单晶内部会出现大量晶格畸变等本征点缺陷, 一方面引起大的暗电流, 导致器件信噪比降低, 另一方面, 晶格失配现象会随外延生长厚度增大而放大, 导致基体材料出现一系列问题, 影响到器件制备。通过具有偏振功能及等离激元共振增强特性的金属超结构的引入, 并进行一体化片上集成, 使得光场被局域, 在减薄吸收层的基础上又可增强器件对入射光的吸收效率。

因此, 结合 BIB 器件超宽谱段探测的优势, 超结构/阻挡杂质带复合结构探测器将可实现在 3~500 μm 的多波段光谱分辨能力, 在多波段融合探测上具有极大的应用潜力。下面将分别对超结构技术、BIB 技术以及两者集成技术的研究现状展开论述。

3 太赫兹波段超结构的研究进展

在太赫兹波段, 科学家研究了多种超结构来实现选择性增透及波段调控。国际上对于超结构在太赫

兹波段探测器上的应用研究已经有了丰富的研究基础, 金属光栅 (Metallic Wires)、对棒和十字架结构 (Pairs of Rods and Crosses)、渔网结构 (Fishnet Structures) 与开口环谐振结构 (Split-Ring Resonators, SRRs) 等多种形式的超结构已经被理论设计及实验证明^[13]。超结构的单元尺寸一般略小于工作波长, 在长波长条件下具有等效介电常数与折射率, 并且, 上述电磁特性主要依赖于超结构本身的谐振特性, 与通常意义上的光子晶体、电磁带隙材料有本质的区别。超结构的出现打破了天然材料的众多限制, 为科学家们解决实际问题提供了新的理念。在众多结构中, 金属光栅结构简单, 仿真设计时采用二维周期性结构便可以实现, 工艺实施相对稳定, 因此发展较快; SRRs 结构较为典型, 也是研究最多的亚波长结构单元。早在 1999 年, J. B. Pendry^[14] 等科学家就在理论上提出了 SRRs 结构的存在, 并且文中通过两个直径不同、开口方向相反的同心环构成基本结构单元, 验证了负介电常数与负磁导率的存在, 同时也说明了人工制备的亚波长超结构单元可以产生不寻常的电磁调控效果。文中强调, 通过改变非磁性金属薄片结构参数可以对特定波段获得大范围的透过率, 可有效地减少探测器尺寸。理论被 D. R. Smith^[15] 等科学家于 2000 年在实验上进一步证实, 相关结果发表在《Physics Review Letters》上, 引用量高达 6000 多次。Stefan Linden^[16] 等科学家 2004 年在《Science》上报道, 成功制备了 U 型开口金属环, 通过改变 SRRs 尺寸及周期性参数, 有规律性的调控了反射及吸收特性, 并观察到了特定频率范围内折射率为负值的现象 (如图 5)。

同年, T. J. Yen^[17] 等科学家通过内外双 SRRs 结构的制备, 在实验上验证了太赫兹超结构调控电介质电磁响应频率的作用, 结构示意图及电磁响应图如图 6 所示。文中强调, 超材料的光学调制效果比天然材料大超过一个数量级, 在全太赫兹波段的可拓展性为生物、安全成像、生物分子指纹、遥感探测等许多应用带来了希望。

2012 年, Scalari^[18] 等科学家在《Science》上发表文章, 重点研究了太赫兹光如何在超结构作用下产生局域现象, 并对入射光子的分布与传输实现调控。随着时间推移, 国内外多家研究单位陆续开始对多种超结构在太赫兹谱段的共振增强特性展开研究^[19-22], 研究变量也更细化。并且不仅局限于单一结构, 如图 7 所示,

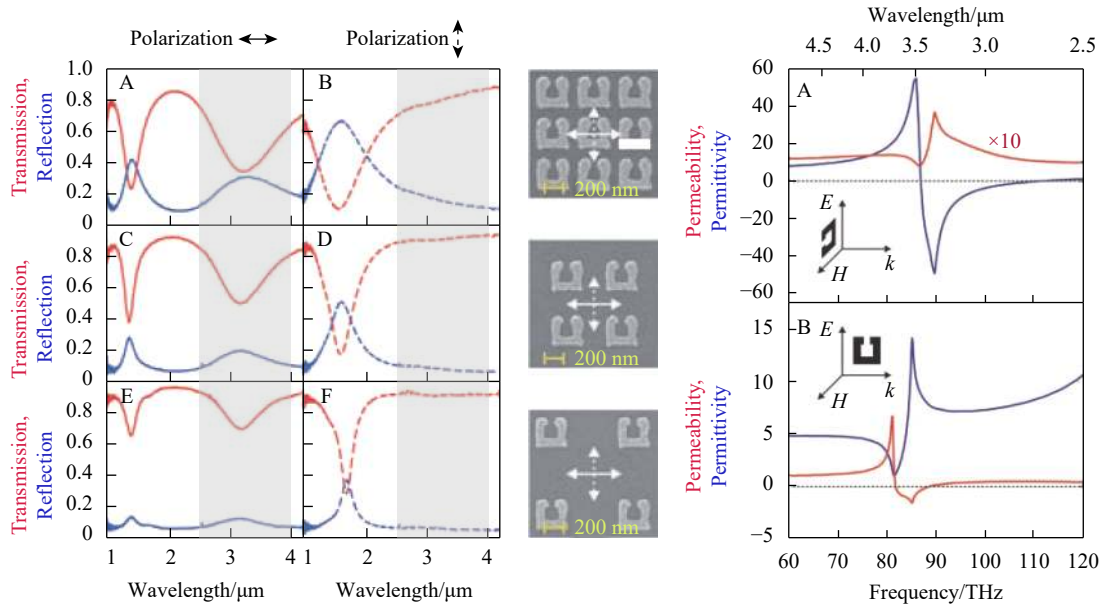


图 5 U 型环结构示意图及随波长变化的光谱信息

Fig.5 Schematic diagram of U-shaped ring structure and spectral information with different wavelength

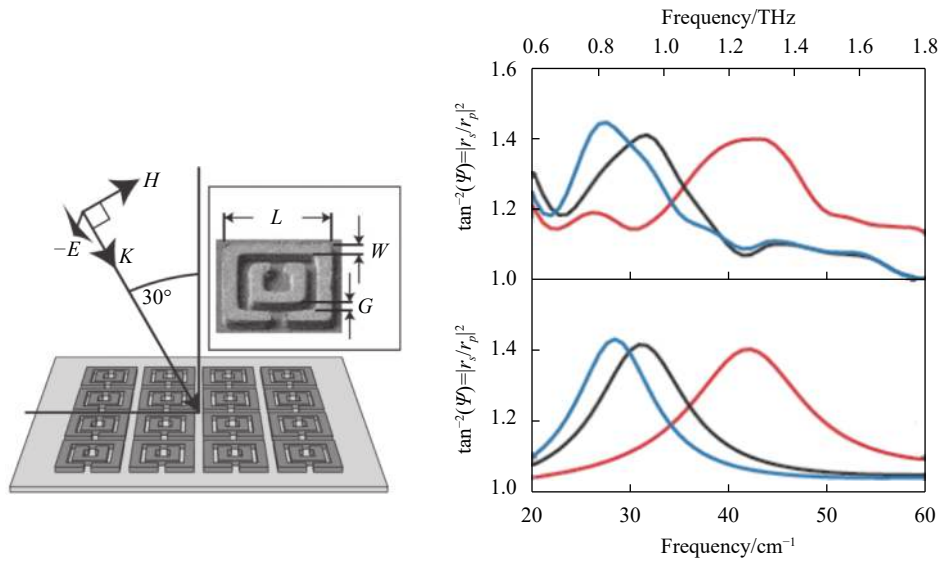


图 6 双 SRRs 结构示意图及电磁响应图

Fig.6 Schematic diagram of dual SRRs structure and electromagnetic response

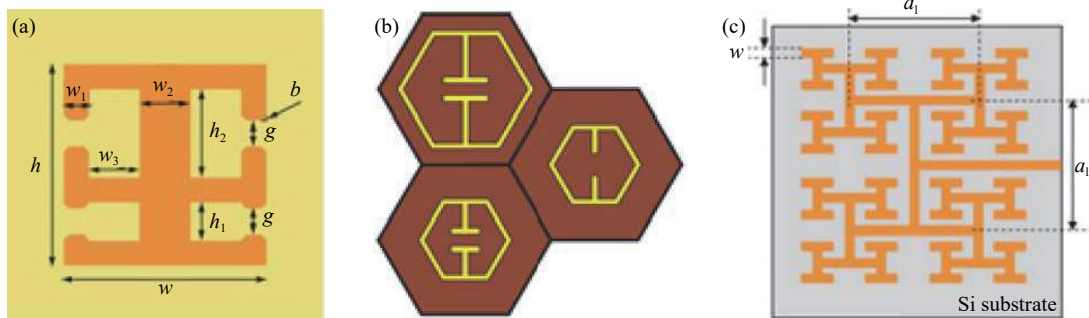


图 7 多个超结构集成于单元器件结构示意图^[23-25]

Fig.7 Schematic diagram of multiple superstructures integrated into one cell device

研究者们通过将两个或者多个不同超结构封装在单个单元中,形成多结构参数开口环、六边形金属环等复杂结构,实现了多谱段共振响应,拓展了共振带宽。

4 阻挡杂质带探测器的研究进展

阻挡杂质带探测器目前被国际上认可的体系主要有 Si、Ge、GaAs 三种,结合不同掺杂元素,可以分别实现 3~40 μm、30~200 μm、50~500 μm 的长波段探测。

国外对于 BIB 的研究起步很早,1980 年, Petroff 和 Stapelbroek 制备了首个高性能的 Si 基 BIB 单元探测器。此后,随外延生长技术及半导体工艺的不断优化进步,阻挡杂质带探测器得到快速发展,并陆续有相关实验及器件工作机理分析报道。1992 年, James E. Huffman^[26] 等报道了 Si:Sb 阻挡杂质带探测器的研制成果,器件主体结构为 17 μm 厚的吸收层与 3.5 μm 厚的阻挡层,吸收层掺杂浓度达到 $1\sim 8\times 10^{17}/\text{cm}^3$ 以实现高的响应,响应波段覆盖 2~40 μm; 1997 年, B. A. Aronson^[27-28] 报道了 P 型 B 元素掺杂的 Si 基阻挡杂质带探测器,分析了电荷输运机理,并深入研究了器件的 IV 特性; 1999 年, D. G. Esaev 报道了 Si:As 阻挡杂质带探测器,研究了随温度、偏压变化的暗电流趋势变化,从能带理论出发,分析了趋势变化原因。几种典型 Si 基 BIB 响应谱图如图 8 所示。

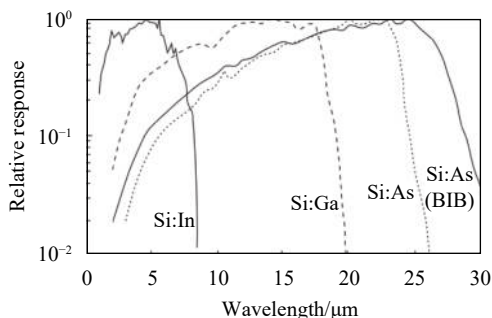


图 8 不同元素掺杂的 Si 基 BIB 探测器响应波段

Fig.8 Response spectra of Si-based BIB detectors with different elements doped

由于 Sb、Ga、B 等杂质在 Ge 单晶中具有更低的激活能,因此 Ge 基阻挡杂质带探测器可以对更长波产生光电响应。Ge 基 BIB 探测器起源于比较成熟的 Ge 基非本征光电导型探测器,早在 1983 年发射的 IRAS 卫星上, Ge 基非本征光电导探测器就已得到了

应用,它可以分为应力型和非应力型两种。非应力型器件的探测波段为 40~120 μm,应力型器件需要在普通非本征光电导器件上施加单轴应力,这使得该器件的探测波段可以向长波方向移动,如图 9 所示。单元型 Ge 基 BIB 探测器首先在 1988 年由加州理工学院的 Watson^[29] 研制成功,探测波长可以延伸至 220 μm; 2002 年,美国加利福尼亚大学的 Eugene E. Haller^[30] 团队利用液相外延技术在 Ge 中生长含 Sb 的低掺杂阻挡层,再利用离子注入形成吸收层,制备了平面型 Ge 基阻挡杂质带探测器,器件响应波段覆盖 30~150 μm; 2008 年, Haller^[31] 团队又通过在 Ge 中离子注入 B 元素作为吸收层,注入浓度 $4\times 10^{16}/\text{cm}^3$,通过金属化生长电极,探测器的响应波长覆盖 30~170 μm。

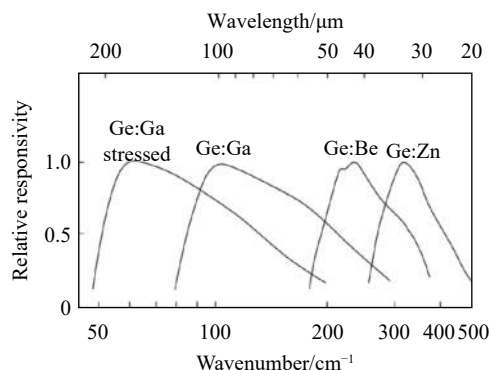


图 9 不同元素掺杂的 Ge 基 BIB 探测器响应波段

Fig.9 Response spectra of Ge-based BIB detectors with different elements doped

同时,相关研究成果也迅速推向实际应用领域,1989 年美国宇航局 (NASA) 发射的宇宙背景探险号 (COBE)、1995 年欧洲航天局发射的红外空间天文台 (ISO)、2003 年发射升空的斯皮策空间望远镜 (SST) 以及 2009 年 NASA 发射的广角红外探测望远镜 (WISE) 等天文装置均使用了 Si:As 以及 Si:Sb 不同阵列规模的阻挡杂质带探测器;但由于材料质量及器件可重复性等方面的问题,Ge 基 BIB 探测器多年来发展缓慢(最大阵列规模仅 6×6、最小像元尺寸达 500 μm),至今仍未取代 Ge 基非本征光电导,在天基 THz 探测任务中获得应用。

化合物半导体 GaAs 在材料质量上的问题显然比 Ge 更明显,复杂的结晶配位方式使得 GaAs 禁带内缺陷种类及密度更难控制。美国加州大学的 Rei-

chertz^[32] 等人的大量实验结果表明, GaAs 基 BIB 探测器的探测波长在 200~800 μm (0.37~1.5 THz) 之间, 探测峰值在 450~460 μm (0.66 THz) 附近。GaAs 基探测器目前以光电导类为主, BIB 型发展难度较大, 至今各大国仍处在攻关阶段。

国内对于 BIB 探测器的研究起步相对较晚, 中国电子科技集团第五十研究所、中科院上海技术物理研

究所以及浙江大学是国内较早开展硅基 BIB 探测器研制的单位。对于 Si 基 BIB 探测器, 中国电子科技集团第五十研究所通过一系列技术改进, 器件噪声等效功率达到 10^{-16} W/Hz^{1/2} 量级, 暗电流低至 8×10^{-17} A, (如图 10 所示)^[33]。同时, 中国电子科技集团第五十研究所积极开展阵列型 BIB 探测器及配套深低温读出电路、成像系统的研制工作, 目前已取得显著成果。

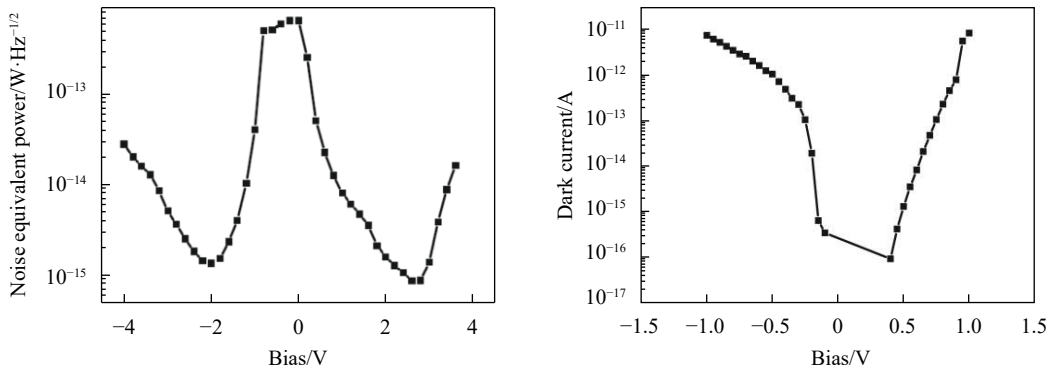


图 10 Si 基 BIB 探测器的噪声等效功率及暗电流图

Fig.10 Noise equivalent power(NEP) and dark current diagram of Si-based BIB detector

浙江大学吴惠栋教授团队在 2018 年报道了 Ge:S 的平面型探测器的相关研究成果, 器件吸收谱段覆盖 2~10 μm, 峰值响应波长在 5~7 μm 附近。并且, 如图 11 所示, 团队发现 Ge 基 BIB 探测器在 ±2 V

偏压范围内都可以工作, 且在阻挡层厚度为 5~9 μm, 在阻挡层一侧加负偏压 (RBM) 时, 器件响应率要明显高于阻挡层加正偏压 (FBM), 为 BIB 器件工作方式提出了新的思路^[34]。

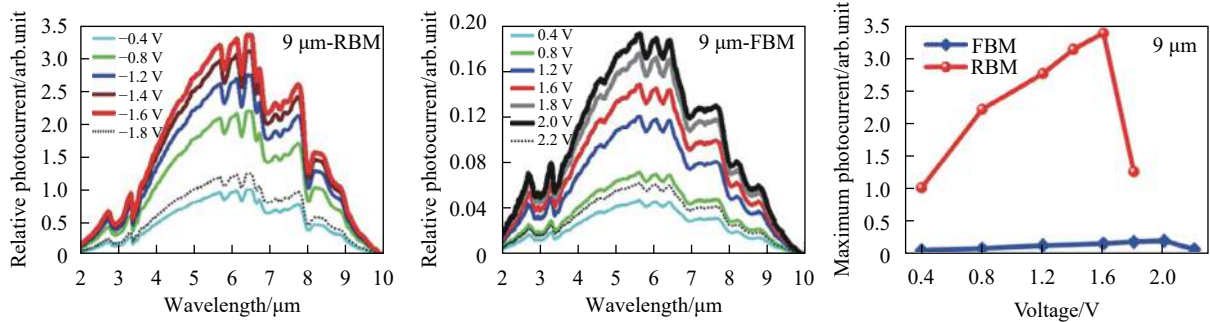


图 11 Ge 基 BIB 探测器响应率与正负偏压的关系

Fig.11 Relationship between response rate and bias of Ge-based BIB detector

对于 GaAs 基 BIB 探测器, 由于材料生长相关问题, 国内目前还未见成熟的器件报道。中国电子科技集团第五十研究所王晓东团队基于 Sentaurus TCAD 商用软件仿真平台, 从器件底层物理模型入手对 GaAs 基 BIB 器件展开了一系列的建模仿真研究, 深

入分析了器件暗电流、电场、电流密度起源等物理问题, 并对阻挡层厚度、补偿掺杂浓度等关键参数对器件性能的影响展开了系统研究, 为器件制备工作奠定了丰富的理论基础^[10, 35], 器件模型及暗电流曲线如图 12 所示。

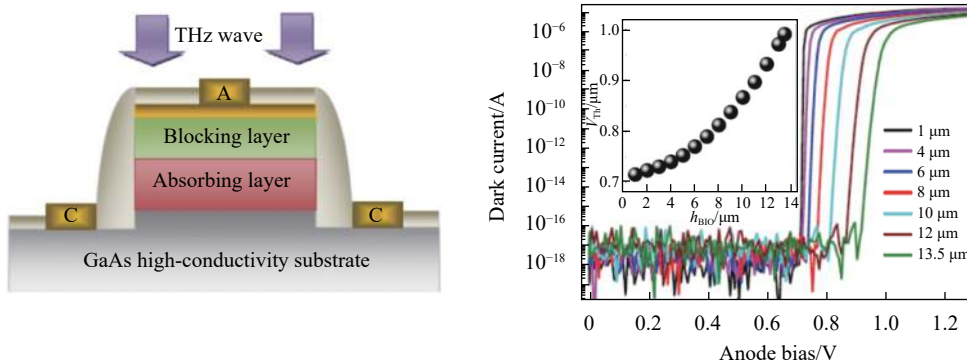


图 12 GaAs 基 BIB 器件结构示意图及暗电流曲线

Fig.12 Schematic diagram and dark current of GaAs-based BIB detector

5 超结构/阻挡杂质带探测器的研究进展

下文将针对 Si、Ge、GaAs 三种材料体系, 分别介绍基于三种材料体系的超结构/阻挡杂质带复合结构探测器的研究现状。

5.1 Si 基超结构/阻挡杂质带探测器的研究进展

浙江大学吴惠桢教授团队是国内最早开展 Si 基超结构/阻挡杂质带探测器研究工作的团队, 其团队在外延型、矩形离子注入型, 叉指离子注入型三种 BIB 器件上集成了二维孔状金属阵列 (two-dimensional hole arrays, 2DHA)^[36] 超结构, 以探索超结构对不同结构类型阻挡杂质带探测器光电响应的影响。2DHA 结构如图 13 所示。其团队分别研究了 2DHA 集成后, 外延型、矩形离子注入型、叉指离子注入型三种器件的响应波段、响应率等关键参数。首先, 通过金属材料透射特性的对比, 选择了 Al 作为超结构介质材料。随后, 团队制备了 25、50、75、90 nm 四种厚度的金属阵列结构, 通过透过率图的测试发现, 50 nm 的样品具有最高的透过率, 厚度更大时, 金属引起的耗散会随之加大, 而厚度更小时, 金属/空气界面的等离子共振模式与金属/Si 界面的等离子共振模式会强烈耦合, 影响样品的透过率, 因此, 2DHA 超结构的材料、厚度等基本属性也由此确定。

将超结构与 Si 基阻挡杂质带探测器集成后, 对于外延性器件 (结构示意图如图 14), 2DHA 超结构是集成在了器件上表面, 即器件阻挡层一侧。由于阻挡层有 5~10 μm 厚, 因此, 2DHA 引起的等离子共振模式与有源区即吸收层交叠微弱, 集成后的器件相比参照器件仅实现了滤波功能, 在共振波长之外的光响

应被明显抑制。团队研究了共振波长随周期变化的图谱 (图 15), 周期为 7.3 μm 时, 共振波长为 26 μm, 随周期增大至 7.9、8.5 μm, 共振波长向波长方向线性移动, 展现出了良好的可控性规律。光电响应测试谱图显示, 集成器件谱图半高宽相比于参照器件降低了一半以上, 为光谱分辨的需求奠定了基础。

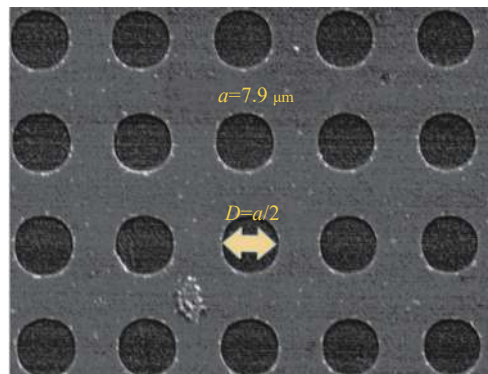


图 13 二维孔状金属阵列扫描电子显微镜

Fig.13 SEM image of 2DHA

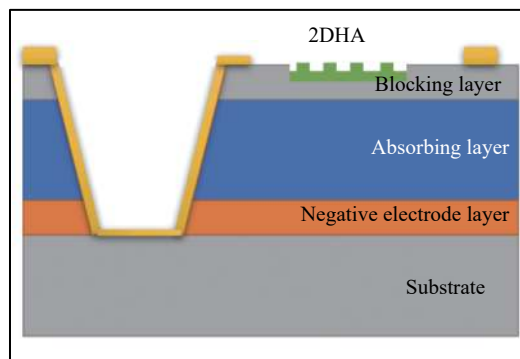


图 14 外延型 2DHA/BIB 器件结构示意图

Fig.14 Schematic diagram of extension-type 2DHA/BIB detector

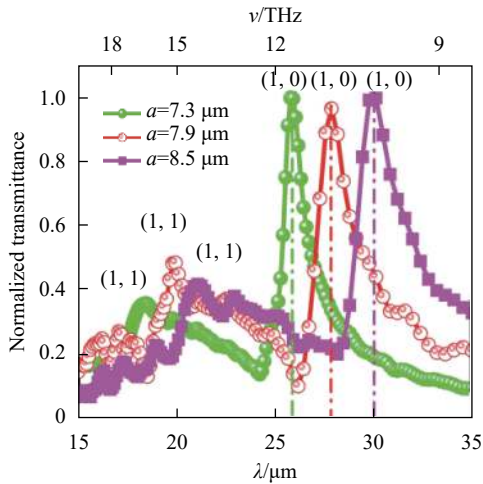


图 15 探测器吸收率与 2DHA 周期的关系

Fig.15 Relationship between absorption rate and 2DHA cycle parameters of 2DHA/BIB detector

对于两种离子注入型器件, 器件结构如图 16 所示, 2DHA 在器件上表面, 与离子注入形成的吸收层 (Absorption Layer, AL) 直接接触, 等离激元共振模式与有源区实现了良好的交叠。因此, 尽管 80% 的光敏元面积被孔状金属阵列覆盖, 集成后的矩形离子注入器件光电响应仍然提升了 25%~35%, 而又指电极型光电相应提高了两倍。对于外延型与离子注入型器件在响应率提升上的差异, 朱贺结合 FDTD Solution 仿真软件做了理论仿真并给与了解释: 当入射光沿某方向极化时, 被束缚的局域电场在器件深度方向会进入表面约 0.8 μm, 对于外延型器件, 2DHA 结构与 7 μm 阻挡层接触直接接触, 因此, 局域电场未能与吸收层实现交叠; 而对于离子注入型器件, 2DHA 结构与 1 μm 的吸收层直接接触, 局域电场可与吸收层实现良好交叠, 可实现光电转化效率的提高, 提升器件响应率^[36-37]。

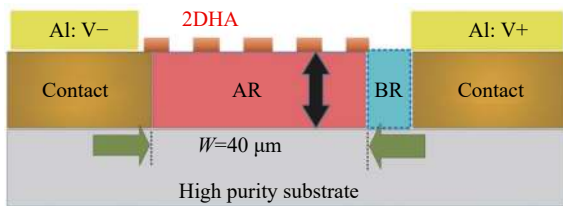


图 16 离子注入型 2DHA/BIB 器件结构示意图

Fig.16 Schematic diagram of Ion-implanted-type 2DHA/BIB detector

5.2 GaAs 基超结构/阻挡杂质带探测器的研究进展

对于 GaAs 基器件与超结构的耦合研究, 杨雄等

人基于 FDTD Solution 商业软件, 从光电导型结构入手, 到埋层背电极结构, 直至台面式阻挡杂质带结构, 对 GaAs 基超结构/阻挡杂质带复合结构探测器的吸收特性及光场分布特性展开了系统的建模仿真研究^[38-39]。首先, 对于光电导结构器件吸收层上集成了条形金属光栅结构^[38], 示意图如图 17 所示, 在光栅间距 $w=20 \mu\text{m}$ 、光栅厚度 $d=100 \mu\text{m}$ 、光栅周期 $p=100 \mu\text{m}$ 条件下, 其吸收率与参照器件对比得到明显提升。同时, 对于该条件下 15、30、50 μm 吸收层厚度的器件模型, 吸收峰值都发生了从 255 μm 至 360 μm 的转变, 如图 18 所示。在此基础上, 研究了在光栅周期 $p=100、112.5、125 \mu\text{m}$ 条件下的吸收峰情况, 结果发现 (图 19), 吸收峰的反射谷随光栅结构周期对的增大出现了明显的红移, 这意味着吸收谱段的可控性。值得一提的是, 文中发现, 通过光栅的引入, GaAs 基器件的吸收峰可向更长波突破, 这意味着更宽的波段选择。不仅限于光栅周期, 研究发现光栅厚度也具有调控吸收峰的功能, 当厚度小于 50 μm 时, 随厚度增加, 吸收率线性增加, 吸收峰不发生改变, 当厚度大于 50 μm 时, 吸收峰线性红移, 如图 20 所示。上述研究证实, 对器件吸收峰位的影响不仅局限于光栅周期, 在特定范围内的吸收厚度同样可以做到。

更进一步, 陈雨璐等人在埋层背电极结构的 GaAs 基探测器上开展了研究^[39], 同时, 为了进一步提高吸收率, 以减少吸收层厚度, 提出了新的 C 形开口金属环及异性开口金属环结构, 器件截面结构及开口环示意图如图 21 及图 22 所示。发现当环结构尺寸进行适当的选择后, 可在极小的 GaAs 厚度上实现理想的吸收率。埋层背电极结构的优势在于, 重掺杂高

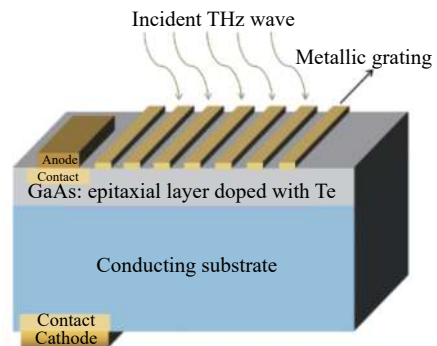


图 17 光栅/GaAs 基 BIB 器件结构示意图

Fig.17 Schematic diagram of grating/GaAs BIB detector

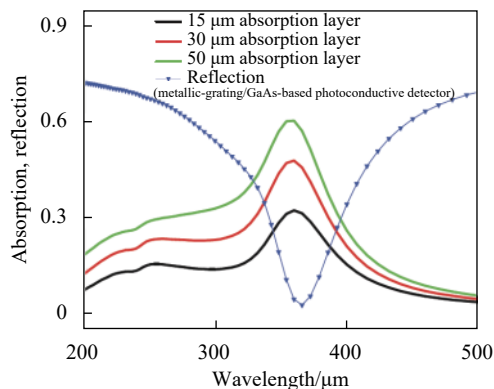


图 18 器件吸收特性与吸收层厚度的关系

Fig.18 Relationship between absorption characteristics and absorption layer thickness of detector

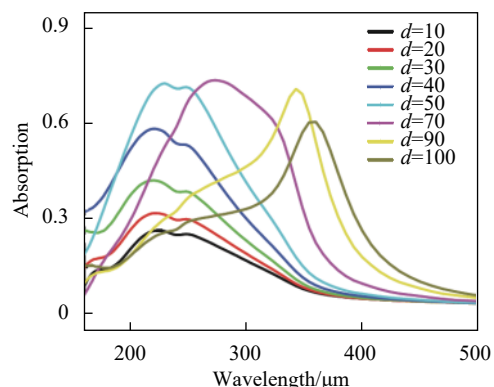


图 19 器件吸收特性与光栅周期的关系

Fig.19 Relationship between absorption characteristics and grating period of detector

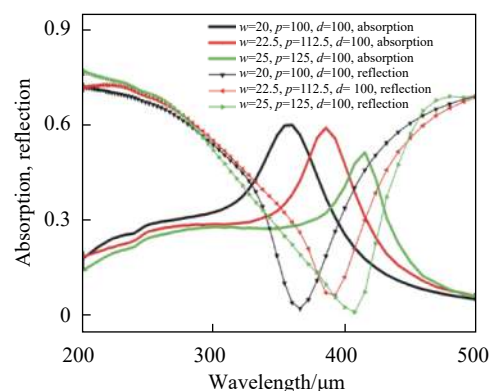


图 20 器件吸收特性与光栅厚度的关系

Fig.20 Relationship between absorption characteristics and grating thickness of detector

导电的埋层与表层周期性的金属环结构配合形成谐振腔，将光场有效的局域在中间吸收层内，从而极大的增强了吸收。研究发现，在参数金属环周期 $p=88$

μm 、金属厚度 $h=1 \mu\text{m}$ 、金属条宽度 $w=8 \mu\text{m}$ 下，集成器件相比于参照器件，吸收率具有超过 10 倍的增强，如图 23 所示。同时，在 $159 \mu\text{m}$ 与 $416 \mu\text{m}$ 处出现两个新的吸收峰。结合 FDTD 电场分布研究发现， $416 \mu\text{m}$ 处的吸收峰来源于偶极共振，而 $159 \mu\text{m}$ 处的吸收峰主要来源于谐振腔的光学干涉，因此，在改变谐振腔中间的吸收层厚度 t 时，如图 24 所示，也出现了预期当中的吸收峰变化情况。

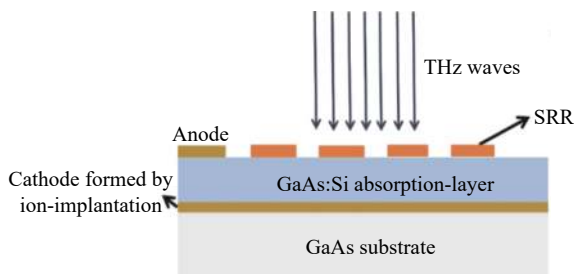


图 21 开口环/GaAs 基光电导体器件结构示意图

Fig.21 Schematic diagram of SRRs/GaAs BIB detector



图 22 开口环结构示意图

Fig.22 Schematic diagram of SRRs structure

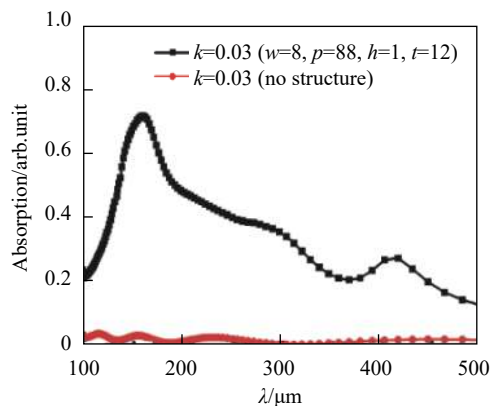


图 23 开口环的集成对器件吸收特性的影响

Fig.23 Influence of SRRs on the absorption characteristics of detector

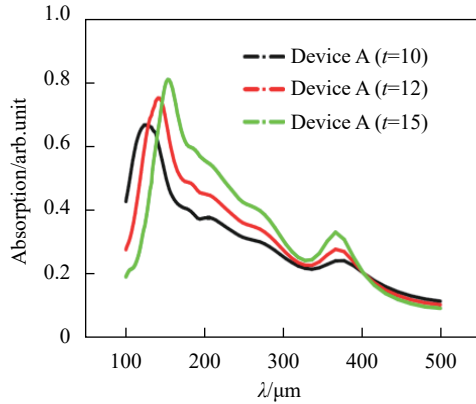


图 24 吸收峰随吸收层厚度变化曲线

Fig.24 Relationship between absorption peak and thickness of absorption layer

基于上述研究基础,杨雄等人将超结构与 GaAs 基 BIB 器件整合在一起进行了研究,在台面式埋层 BIB 结构阻挡层上集成了金属光栅,器件结构示意图如图 25 所示。金属光栅在器件上表面与电极区和吸收层相结合形成谐振腔,诱导光场局域化,增强了吸收。当光栅间距 $w=20\ \mu\text{m}$ 、光栅厚度 $d=100\ \mu\text{m}$ 、光栅周期 $p=100\ \mu\text{m}$ 时,吸收谱拓展为 3 个峰,如图 26 所示,第一个在 $137.9\ \mu\text{m}$ 处, FDTD 电场局域信息显示主要由经典光学干涉增强导致;第二个在 $264\ \mu\text{m}$ 处,是属于 GaAs 本身电子跃迁引起的吸收峰;第三个在 $366.7\ \mu\text{m}$ 处, FDTD 显示光场增强超过 8 倍,可能是由于等离子体共振引起。GaAs 基器件的建模仿真及理论分析已经具有一些阶段性进展,但是由于在重掺杂吸收层上外延高纯 GaAs 材料生长的技术难度较大,国内对 GaAs 基 BIB 的研究仍有很长的路要走,高质量的材料生长、良好的深低温电极接触工艺是主要制约因素。

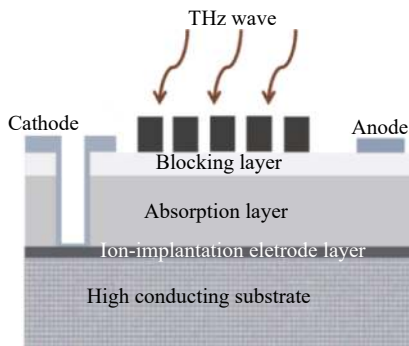


图 25 开口环/GaAs 基 BIB 器件结构示意图

Fig.25 Schematic diagram of SRRs /GaAs-based BIB detector structure

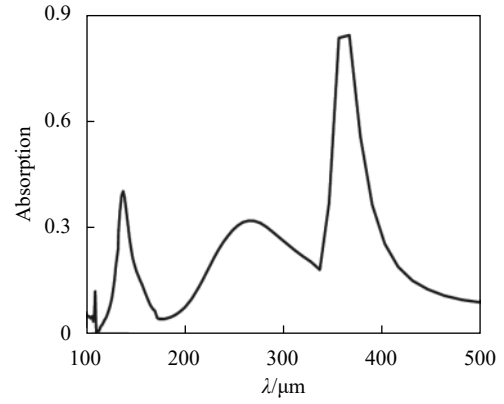


图 26 开口环集成后器件吸收峰图

Fig.26 Absorption peak of detector after SRRs integration

5.3 Ge 基超结构/阻挡杂质带探测器的研究进展

Ge 作为单质型半导体材料,早期由于提纯难度相对较小,是发展最早的半导体材料,然而,高质量的 Ge 薄膜外延生长技术是一大难题,尤其是高纯度本征层的生长。因此,正如前文所述,Ge 基 BIB 探测器目前发展速度落后于 Si 基,相应的 Ge 基 BIB 器件与超结构的集成工作至今未见报道,具有很大的研究价值与研究空间。同时,虽然在 $30\sim 40\ \mu\text{m}$ 光谱范围内, Si 基探测器仍然可以较好的工作,然而波长大于 $40\ \mu\text{m}$ 后,缺乏合适的掺杂元素应用于 Si, Ge:Ga 探测器理论上仍是 $40\sim 120\ \mu\text{m}$ 光谱范围内最佳低背景光子探测器,因此,Ge 基超结构/阻挡杂质带探测器的研制工作需要进一步的向前推进。

6 结论

综上,超结构/阻挡杂质带复合结构探测器在多波段融合探测上展现出了其独特的优势与巨大的潜力,谱段覆盖广、阵列规模大、灵敏度高等都是其相对于其他结构探测器的核心优势。然而,该项技术在国内制约因素仍然在于基础材料生长,尤其是在重掺杂吸收层上生长高质量、高纯度的本征层。其次,对太赫兹辐射探测器件的工作机理、超结构的电场局域特性等底层物理基础理论仍需深入研究,以指导具体工艺细节参数制定,提高响应率、缩小响应峰半高宽、提升目标信息探测准确度。

参考文献:

[1] Goracy K, Pilawka R, Chady T, et al. Use of terahertz-frequency

- radiation for studying polymer composites for mechanical damages [J]. *Przemysl Chemiczny*, 2013, 92(3): 362-364.
- [2] Ouchi T, Kajiki K, Koizumi T, et al. Terahertz imaging system for medical applications and related high efficiency terahertz devices [J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2014, 35(1): 118-130.
- [3] Young Erick T. Space Infrared detectors from IRAS to SIRTf [C]// International Symposium on Optics, Imaging and Instrumentation. 1993: 96-108.
- [4] Pickwell-Macpherson E, Wallace V P. Terahertz pulsed imaging-a potential medical imaging modality? [J]. *Photo-diagnosis & Photodynamic Therapy*, 2009, 6(2): 128-134.
- [5] Yang X, Zhao X, Yang K, et al. Biomedical applications of terahertz spectroscopy and imaging [J]. *Trends in Biotechnology*, 2016, 34(10): 810-824.
- [6] Cao W, Ye B. Near infrared focal plane arrays for astronomy [J]. *Progress in Astronomy*, 1998, 16: 103-109.
- [7] Norton P. HgCdTe infrared detectors [J]. *Opto-Electronics Review*, 2002, 10(3): 159-174.
- [8] Wang X D, Wang B B, Hou L, et al. Analysis of dark current and spectral response mechanisms for Si-based block-impurity-band detectors operating at terahertz regime [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, 48(2): 1-10.
- [9] Garcia J C, Haegel N M, Zagorski E A. Alternate operating mode for long wavelength blocked impurity band detector [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(4): 39-74.
- [10] Wang X D, Chen Y L, Chen X Y, et al. Dark current transport mechanism associated with acceptor concentration in GaAs-based blocked-impurity-band (BIB) detectors [J]. *Optical & Quantum Electronics*, 2018, 50(11): 419.
- [11] Geist J. Infrared absorption cross section of arsenic in silicon in the impurity band region of concentration [J]. *Applied Optics*, 1989, 28(6): 1193.
- [12] Cardozo B L, Reichertz L A, Beeman J W, et al. Characterization of liquid phase epitaxial GaAs for blocked-impurity-band far-infrared detectors [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2005, 46(5): 400-407.
- [13] Tao H, Padilla W J, Zhang X, et al. Recent progress in electromagnetic metamaterial devices for terahertz applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(1): 92-101.
- [14] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques*, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [15] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(18): 4184.
- [16] Linden S, Enkrich C, Wegener M, et al. Magnetic response of metamaterials at 100 terahertz [J]. *Science*, 306(5700): 1351-1353.
- [17] Yen T J, Padilla W J, Fang N, et al. Terahertz magnetic response from artificial materials [J]. *Science*, 2004, 303(5663): 1494-1496.
- [18] Scalari G, Maissen C. Ultrastrong coupling of the cyclotron transition of a 2D electron gas to a THz metamaterial [J]. *Science*, 2012, 335: 1323-1326.
- [19] Kroll J, Darmo J, Unterrainer K. High-performance terahertz electro-optic detector [J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(12): 763-764.
- [20] Watts C M, Liu X, Padilla W J. Metamaterial Electromagnetic Wave Absorbers [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(23): OP98-120, OP181.
- [21] Lee S H, Choi M, Kim T T, et al. Switching terahertz waves with gate-controlled active graphene metamaterials [J]. *Nature Materials*, 2012, 11(11): 936-941.
- [22] Liu M, Hwang H Y, Tao H, et al. Terahertz-field-induced insulator-to-metal transition in vanadium dioxide metamaterial [J]. *Nature*, 2012, 19(487): 345-348.
- [23] Yu Yuan, Christopher Bingham, Talmage Tyler, et al. A dual-resonant terahertz metamaterial based on single-particle electric-field-coupled resonators [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(19): 191110.
- [24] Bingham C, Tao H, Liu X, et al. Planar wallpaper group metamaterials for novel terahertz applications [J]. *Optics Express*, 2008, 16(23): 18565-18575.
- [25] Miyamaru F, Saito Y, Takeda M W, et al. Terahertz electric response of fractal metamaterial structures [J]. *Physical Review B*, 2008, 77(4): 5124.
- [26] Huffman J E, Crouse A G, Halleck B L, et al. Si:Sb blocked impurity band detectors for infrared astronomy [J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 72(1): 273-275.
- [27] Aronzon B A, Kovalev Y D, Kozlov A M, et al. Current-voltage characteristics of Si:B blocked impurity-band structures under conditions of hopping-transport-limited photoresponse [J]. *Semiconductors*, 1998, 32(2): 174-180.
- [28] Esaev D G, Sinita S P, Chernyavskii E V. Current-voltage characteristics of Si:As-based photodetectors with blocked hopping conductivity [J]. *Semiconductors*, 1999, 33(5): 574-577.

- [29] Watson D M, Huffman J E. Germanium blocked-impurity-band far-infrared detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 1988, 52(19): 1602-1604.
- [30] Bandaru J, Beeman J W, Haller E E. Far-infrared absorption in Sb-doped Ge epilayers near the metal-insulator transition [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(19): 3536-3538.
- [31] Beeman J W, Goyal S, Reichertz L A, et al. Ion implanted Ge:B far infrared blocked impurity band detectors [J]. *Scientific & Technical Information Technical Reports*, 2006, 51(1): 1-19.
- [32] Reichertz L A, Beeman J W, Cardozo B L, et al. Development of a GaAs-based BIB detector for sub-mm wavelengths[C]//SPIE Astronomical Telescopes Instrumentation, 2006, 6275: 62751S.
- [33] Chen Y, Wang B, Zang Y, et al. The high-performance imaging verification of Si:P blocked impurity band detector for very-long-wave-infrared spectral range [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2020, 56(3): 1-6.
- [34] Zhu J Q, Zhu H, Xu H L, et al. Ge-based mid-infrared blocked-impurity-band photodetectors [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 92: 13-17.
- [35] Wang X D, Wang B B, Chen X Y, et al. Roles of blocking layer and anode bias in processes of impurity-band transition and transport for GaAs-based blocked-impurity-band detectors [J]. *Infrared physics and Technology*, 2016, 79: 165-170.
- [36] Zhu H, Weng Z P, Zhu J Q, et al. Surface plasmon enhanced Si-based BIB terahertz detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(5): 053505.
- [37] Zhu H, Xu J T, Wang M, et al. The effect of infrared plasmon on the performance of Si-based THz detectors [J]. *Journal of Materials Science Materials in Electronics*, 2016, 28: 839-844.
- [38] Yang X, Wang B B, Chen Y L, et al. Wavelength-selective enhancement of terahertz absorption of metallic grating/GaAs-based hybrid photoconductive detector [J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 125(15): 151604.
- [39] Chen Y L, Yang X, Tong W L, et al. The simulation on absorption properties of metamaterial/GaAs/electrode layer hybrid structure based Terahertz photoconductive detector [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, 51(4): 1-9.



第一作者简介：崔慧源 (1994-), 工程师, 硕士, 研究方向为太赫兹波段探测器仿真设计、探测器基体材料缺陷检测与分析等。曾获“研究生国家奖学金”、“优秀毕业生”等奖项。以第一作者在 *J Alloy Compd*、*J Mater Sci* 等期刊发表多篇学术论文



通讯作者简介：陈雨璐 (1990-), 2016年毕业于复旦大学物理系, 博士。现为中国电子科技集团公司第五十研究所高级工程师, 中国电科五十所太赫兹探测领域专家, 目前从事太赫兹探测技术研究。2019年入选上海市科技系统岗位能手、2017年入选“上海市青年科技扬帆计划”。以第一作者或通讯作者在 *Appl. Phys. Lett.*, *Sci. Rep.*, *Nanotechnology* 等国际权威期刊发表 SCI 学术论文 10 余篇, EI 论文 2 篇, 申请发明专利 7 项, 授权 2 项。主持国防科技项目、国家自然科学基金、上海市青年科技英才扬帆计划等项目



通讯作者简介：王晓东 (1986-), 高级工程师, 博士。受聘为“中国电科五十所太赫兹领域专家”及“中国电科五十所青年科技委委员”, 作为项目负责人, 承担了“十三五”国家重点研发计划、“十二五”国家军口 863 计划、国家自然科学基金、中央军委国防科技项目、上海市启明星计划等科研项目。天基探测器方面, 带领团队研制的天基太赫兹遥感芯片, 实现了噪声等效功率 (NEP) 10^{-16} W/Hz^{1/2} 量级的高灵敏探测。学术方面, 作为第一作者或通讯作者在 *Nanotechnology*、*IEEE Trans. Electron Dev.* 等国际权威期刊共发表学术论文 30 余篇, 获授权国家发明专利 18 项