



长波红外焦平面材料及器件专题·论文

天文用阻挡杂质带红外探测器

廖开升^{①②}, 刘希辉^{①②}, 黄亮^{①②}, 李志锋^①, 李宁^{①*}, 戴宁^①

① 中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海 200083;

② 中国科学院大学, 北京 100049

*联系人, E-mail: ningli@mail.sitp.ac.cn

收稿日期: 2013-09-14; 接受日期: 2013-12-04

国家自然科学基金(批准号: 61290304)和中国科学院上海技术物理研究所创新专项基金(编号: Q-DX-64)资助项目

摘要 低温目标红外辐射的灵敏探测和成像在航天和深空探测中具有重要的应用价值. 300 K 以下低温目标的辐射强度很弱, 辐射特征波长位于中远红外区. 阻挡杂质带红外探测器是中远红外探测器中重要的一员, 具有覆盖波段宽、灵敏度高、暗电流低、抗辐射性能高等优点, 能够胜任空间技术和天文探测在中远红外波段探测的苛刻要求. 本文以红外天文探测对红外探测器的应用需求作为出发点, 主要就国内外红外天文学、红外天文探测器发展概况, 阻挡杂质带红外探测器发展历史及其材料、器件结构等方面做了简要综述, 并简明扼要地介绍了阻挡杂质带探测器的器件物理模型.

关键词 红外天文学, 天文用红外探测器, 阻挡杂质带探测器, 远红外

PACS: 05.45.-a, 45.50.Jf, 45.50.Pk, 95.55.Pe, 96.12.De

doi: 10.1360/SSPMA2013-00060

1 引言

红外天文正在蓬勃兴起, 是未来实测天文发展的重点, 这与天文学以及整个物理学的发展现状相关. 由于从宇宙尘埃到巨大恒星它们的温度范围约为 3–1500 K, 辐射能量主要集中于红外区, 并且红外线的波长较可见光长, 可穿透宇宙尘埃. 因此追溯宇宙早期生命、探索暗物质和暗能量、研究太阳构成、星际介质、银河系结构、红外星系和类地行星以及寻找地外生命都无不与红外天文探测直接相关.

自 1983 年发射第一颗红外天文卫星, 经过 30 年的发展, 国外空间天文用红外探测器已经从单元器

件发展到红外焦平面器件^[1], 最大规模达到 2k×2k, 探测波段从短波红外到亚毫米波(1–200 μm), 在此基础上基本实现了天文学从伽马射线、红外线到无线电波段的全谱巡天探测.

天文观测对象的特殊性: 宽谱、低背景、弱信号, 这就要求天文用红外探测器具有较宽的波段覆盖、极高的灵敏度、长的积分时间和极低的暗电流. 国外目前主流天文用红外探测器是 5 μm 以下采用碲镉汞(HgCdTe)或者锑化铟(InSb)红外焦平面探测器; 5 μm 以上采用阻挡杂质带(Blocked Impurity Band, BIB)红外焦平面探测器, 其中硅掺砷(Si:As)覆盖 5–20 μm ,

引用格式: 廖开升, 刘希辉, 黄亮, 等. 天文用阻挡杂质带红外探测器. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 360–367

Liao K S, Liu X H, Huang L, et al. Blocked impurity band infrared detector for astronomy (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2014, 44: 360–367, doi: 10.1360/SSPMA2013-00060

硅掺锑(Si:Sb)覆盖 20–40 μm , 锗掺镓(Ge:Ga)覆盖 40–70 μm , 应变锗掺镓(Ge:Ga)覆盖 70–200 μm . 阻挡杂质带(Blocked Impurity Band, BIB)红外探测器一开始是在 20 世纪冷战期间, 以太空导弹防御为应用背景下, 由美国 Rockwell Science Center 的研究人员研制发明的. 后来随着空间技术发展需要和天文研究需求, 不断推动着 BIB 探测器的更新和升级, 使之被广泛用于天文光子探测和成像探测. BIB 探测器具有覆盖波长宽、暗电流低、光电导增益高、响应速度快、抗辐射性能高的优点. 它是利用杂质光电导实现探测的, 由于杂质电离能较小, 因此能对较长波红外有响应. BIB 器件结构上巧妙地引入了一层本征阻挡层, 较之非本征探测器在提高掺杂浓度改善吸收性能的同时也极大地降低了器件暗电流. 根据掺杂半导体衬底的不同, 和同一衬底掺杂杂质的不同, BIB 探测器可获得不同的光谱响应. 此外, 由于重掺杂效应, BIB 器件中的杂质能级扩展成为杂质带, 进一步减小了杂质电离能, 可实现更长波长的红外线探测^[2]. BIB 探测器的掺杂半导体主要是硅、锗和砷化镓. 尤其硅材料容易获得大直径高纯度的均匀硅单晶, 且硅器件工艺成熟, 对硅基 BIB 大面积焦平面阵列的制备及与后期硅读出电路的集成兼容有利. 由于具备更好的均匀性、稳定性和覆盖波长宽, 这也使得诸如 Si:As 等 BIB 焦平面器件跻身天文上 5 μm 以上主流探测器.

2 国内外红外天文学发展概况

自 1983 年由美国国家航空航天局主持发射第一颗红外天文卫星(IRAS)以来, 30 年间欧美陆续发射了宇宙背景探测者卫星(COBE)、红外线太空天文台(ISO)、斯皮策空间望远镜(SST)等系列红外天文卫星, 获得了一系列有价值的观测结果, 其中第一颗 IRAS 卫星在轨运行期间以 12 μm , 25 μm , 60 μm 和 100 μm 的 4 种波长描绘了 96% 的天空, 由于探测波长较长, 有利于发现温度更低的目标, 包括冷的恒星、红外星系、星云、星际分子、白矮星和行星等. 在轨运行期间就探测到约 245889 个红外辐射源, 使天文观测目标的数量增加了 70%, 它在原始星云、演化晚期恒星、红外卷云、极亮红外星系、银河系相互作用及中心区域的特征等一系列重大发现宣告红外天文学真正进入天体物理学研究的主战场.

IRAS 的成功得益于配置在其上的高性能非本征

硅、锗多元光子探测器, 覆盖了 12 μm , 25 μm , 60 μm 和 120 μm 4 个波段. 配置在 IRAS 的红外探测器基本情况如表 1 所示^[1].

与国外发展的红外天文相比, 我国的红外天文研究状况相对落后. 在 1981 年云南天文台和北京师范大学等单位合作, 在云南天文台 1 m 望远镜上安装了单元红外探测器. 1985 年北台和南仪厂合作建成 1.26 m 口径、配置了单元探测器的红外望远镜, 陆续取得一定的成果. 其后国内红外天文观测设备方面进展缓慢, 迄今在中国仍无一套自主研发的天文用红外阵列探测器系统投入日常观测^[3].

红外天文观测设备的核心是红外探测器, 红外天文学的兴衰与红外探测器的发展息息相关. 制约我国红外天文探测发展的主要原因是其中的一些关键技术, 包括高灵敏度红外探测器技术、低温冷光学技术、深低温致冷技术等未获得突破, 现有仪器和关键元部件的性能指标达不到天文探测的要求.

近年来, 红外天文探测在国家层面上正在不断受到重视. 2007 年国家科技部和中国科学院支持的丽江 2.4 m 光学/红外望远镜建成, 配备有数套红外面阵相机, 可进行 1–5 μm 高分辨光谱和成像观测. 2011 年国家重点基础研究发展计划抚仙湖 1 m 红外太阳望远镜完成, 配备多套近红外探测器. 十二五期间我国将在南极安装 2.5 m 口径的光学红外望远镜. 同时, 每年的自然基金和相关基金都有对红外天文探测和红外天文卫星研制方面项目的支持, 其中包括对上海技术物理研究所、国家天文台、上海小卫星中心的研究课题的支持, 对南极红外测光望远镜和红外天文望远镜的支持. 另外, 国内天文领域的国家天文台、上海天文台、云南天文台等均向国内的红外探测器研究单位提出天文用红外探测器的需求, 但国内现有的红外探测器水平不能满足这些用户的要求.

3 国内外红外天文探测器发展概况

1800 年英国著名天文学家赫谢耳(Herschel)在研

表 1 IRAS 上配置的红外探测器基本情况^[1]

Table 1 Infrared detectors on IRAS [1]

波段 (μm)	探测器类型	探测器数量	探测器大小 (mm^2)
12	Si:As	16	1.0×1.78
25	Si:Sb	15	1.0×1.78
60	Ge:Ga	16	1.5×1.5
100	Ge:Ga	15	1.25×1.25

究太阳光谱的热效应时发现了红外辐射. 之后的整个 19 世纪内红外探测技术发展较为缓慢, 主要发明了温差电辐射探测器和测辐射热计, 都是利用红外辐射的热效应. 到了 20 世纪, 尤其是二次世界大战期间, 红外光电探测器方面得到重要发展. 当时德国研制出了 PbS 薄膜型光电导探测器, 并利用这种探测器做了一系列军用红外探测系统. 20 世纪五六十年代半导体物理学的大力发展, 红外探测器的发展得到新的推动. 50 年代美国加州理工学院 Gerry Neugebauer 等人首先研制出用 PbS 单元探测器测量热辐射的光度计. 60 年代德州仪器的 Frank 研制出 8–14 μm 大气窗口的 Ge:Hg 探测器, 但由于工作温度太低使用不便, 随后被更合适的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 探测器所替代. 70 年代 InSb 取代 PbS 成为主要红外探测器.

利用这些新型半导体材料制成的红外探测器, 许多红外波段的巡天工作迅猛开展起来. 新的天文学发现反过来又进一步刺激了红外设备的升级^[4]. 天文上常用的红外探测器如表 2^[5]. 图 1 所示为常用天文用红外探测器工作波段和工作温度^[6].

InSb 材料要比 HgCdTe 材料发展成熟得多. InSb 红外探测器是 70 年代发展起来的, 属 III-V 族化合物, 其典型的波长响应范围约在 1.5–5.5 μm , 量子效率可高达 80% 以上. InSb 光伏红外探测器广泛用于地基红外天文学和空间红外望远镜. 第一张用 InSb 阵列拍摄到的红外天文图像在 1984 年在 NASA 组织的红外探测器技术讨论会上首次亮相, 本次使用的 InSb 阵列仅有 32×32 像素. 之后随着材料工艺制备的不断成熟, 以及钝化处理、SFD 读出、多重采样等技术的发展大大改善了探测器的性能. 在美国国立光学天文台和海军天文台的支持下, 1994 年, 由圣巴巴拉研究中心和 Raytheon 公司完成了 Aladdin 的计划, 生产了 1024×1024 的 InSb 天文用阵列^[7]. 目前, 大规模阵列的 InSb 焦平面阵列具有非常小的暗电流, Raytheon 公司的 Orion 2048×2048 的 InSb 焦平面阵列工作在 32 K 时, 暗电流仅为 0.01 e^-/s , 读出噪声 6 $\text{e}^- \text{RMS}$, 量子效率高达 80%, 响应波长 0.6–5.5 μm .

表 2 天文上常用红外探测器主要性能参数^[5]
Table 2 Characteristics of the infrared detectors for astronomy [5]

参数	Si:PIN	HgCdTe	InSb	IBC
典型暗电流(e^-/s)	<1000, 300 K	<1	<1	<1
量子效率(%)	60–80	90–95	70–95	35–60
响应波长范(μm)	0.4–1.1	0.4–15	0.4–5.5	2–28
最优工作温(K)	220–300	77	30	4–10

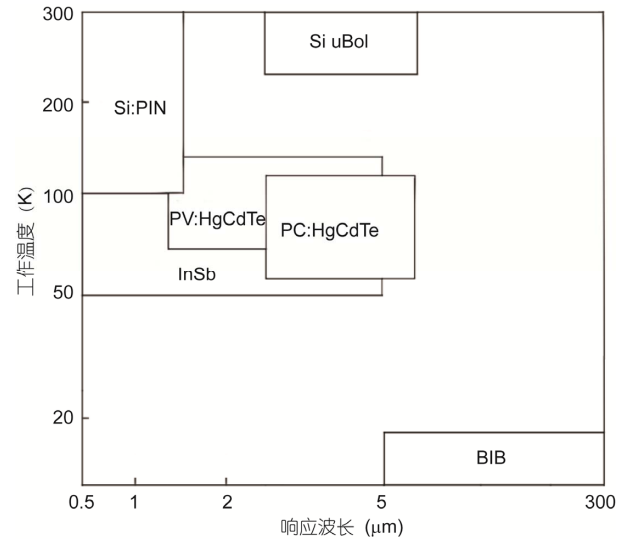


图 1 天文用红外探测器覆盖波长范围及其相应工作温度^[6]
Figure 1 Covered wavelength range and operating temperature of infrared detectors for astronomy [6].

三元半导体 HgCdTe (MCT)属 II-VI 族化合物, 窄禁带半导体. 与 InSb 等简单的 III-V 族化合物相比, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 最大的优势在于可通过调节 x 的值, 材料的禁带宽度 E_g 在 0–1.65 eV 范围内连续可调, 从而获得不同的长波限. 原则上可以调整 x 的值使其响应波长范围落在 1.24–18 μm . 但其典型的波长响应范围约 0.8–2.5 μm , 相应的量子效率约为 55%–70%, 通过衬底剥离技术可将探测器量子效率提高到 90% 以上.

第一个用于天文观测的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 阵列仅有 32×32 像元, 但读出噪声有 1100 e^- , 暗电流有 800 e^-/s . 目前, 国际上红外探测器优秀的供应商包括美国的雷声视觉系统(Raytheon VisonSystem), 特利丹影像传感(Teledyne Imaging Sensors)和 DRS 技术公司(Diagnostic/Retrieval Systems, Inc), 法国的索芙拉蒂(SOFRADIR), 以色列的 Semiconductor Devices (SCD), 加拿大的 INO 等, 其中 Teledyne Imaging System(前身为 Rockwell Scientific Co.)和 Raytheon Vison Systems 的 HgCdTe 红外探测器, 波长覆盖为 0.6–5.0 μm , 读出噪声一般小于 10 e^- , 暗电流优于 0.1 e^-/s , 通过衬底剥离技术将探测器量子效率提高到了 90%, 器件规模为 2048×2048 并向 4096×4096 扩展.

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光伏型阵列在应用于长波探测时会产生很大的暗电流, 且此暗电流很难通过降低工作温度而得到很好的抑制, 从而限制了器件的灵敏度.

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 阵列探测的长波限为 $15\ \mu\text{m}$, 此时其暗电流已经无法满足天文观测低噪声环境对探测器的苛刻要求了.

当前国内碲镉汞红外焦平面探测器读出噪声约 $500\text{--}1000\ \text{e}^-$, (最小)暗电流约 $10000\ \text{e}^-/\text{s}$, 主要工作波段 $1\text{--}5\ \mu\text{m}$. 20 世纪 60–80 年代期间, 国内曾经开展以锗掺汞(Ge:Hg)为代表的杂质跃迁光电导红外探测器的研究, 对材料制备、器件物理和工艺进行了一些探索, 获得了基于体材料的光电导型探测器, 其应用主要是针对 $10\ \mu\text{m}$ 长波大气窗口的探测, 后来随着碲镉汞探测器的兴起被淘汰掉.

BIB 探测器属于非本征杂质带跃迁光电导类型. 体材料非本征红外探测器在完成低背景弱信号作业时, 其探测器性能受温度、光通量、信号频率及先前辐照历史等诸多因素影响, 光电导信号表现出的非线性为后期的光度校准也带来了很大的困难^[2,8,9]. 阻挡杂质带探测器(BIB)是 1979 年由美国 Rockwell International Corporation 的 Petroff 和 Stapelbroek 基于克服体材料非本征探测器上述缺点的基础上提出来的^[10], 并在 1979 年进行了第一次实验验证^[11].

BIB 红外探测器在中远红外区的探测性能优异, 能满足红外天文观测的需求. 1983 发射的首颗红外天文卫星采用了 Si:As 和 Si:Sb 的非本征单元红外探测器. 1989 年发射的 COBE 首次使用 Si:As BIB 探测器. 之后美国的 Raytheon 公司和 DRS 技术公司(Diagnostic/Retrieval Systems, Inc)在 BIB 器件方面做了大量的工作^[12]. NASA 的斯皮策空间望远镜(SST)就采用了 128×128 和 256×256 的 Si:AS 焦平面阵列及 256×256 的 Si:Sb 焦平面阵列. NASA 的广域红外线巡天探测卫星(WISE)得益于其配备的 1024×1024 Si:AS BIB 焦平面探测器, 使得其探测灵敏度比之前的 IRAS, COBE 高一千倍以上. 作为哈勃望远镜的后续机, 詹姆斯韦伯空间望远镜(JWST)中的用于探测中波红外的仪器所采用的红外焦平面阵列也是由 Raytheon Vision System 提供的 1024×1024 Si:As BIB

焦平面探测器. 此外, 平流层红外天文台(SOFIA)其上配置的 Si:Sb BIB 焦平面探测器也达到了 1024×1024 规模. 表 3 是目前 Raytheon 和 DRS Technologies 两家公司 BIB 红外焦平面探测器的主要性能指标^[13].

现阶段国内在 BIB 器件领域尚属空白, 没有经验积累. 由于需要制备大规模凝视型的红外焦平面探测器, 故有源层采用外延结构的材料体系, 保证高阻、低暗电流的特征, 探测器的技术路线与原来的体材料完全不同, 需要重新设计和规划; 现有红外探测器性能表征系统多是基于对地观测等高背景应用条件下的, 测试环境与探测器的实际工作状态比较接近, 探测器的测试结果与实际应用的情况接近, 较能符合实际情况. 而天文空间用红外探测器工作在低红外辐射背景下, 其器件物理和器件设计都要做新的考量, 需要建立低红外辐射背景的测试系统, 以便了解探测器在真实工作环境下的性能指标. 例如, 微弱辐射信号必然导致低光生载流子浓度, 相应地探测器阻抗急剧升高, 这对读出电路的设计提出了新的要求. 另一方面, 由于低背景下极低的光生载流子浓度, 原本在高背景下可以忽略的探测器电极效应也开始起主导作用, 并影响整个探测器的性能, 这就对探测器的电极制备提出了新的挑战. 此外, 低背景下器件对电荷注入效应、扫出效应和介电弛豫也将变得敏感^[8].

4 阻挡杂质带红外探测器

阻挡杂质带(Blocked Impurity Band, BIB)红外探测器, 是杂质带电导器件(Impurity Band Conductor, IBC)的一员, 可实现对波长范围为 $2\text{--}300\ \mu\text{m}$ 的红外线探测. 相对于 IBC 器件, BIB 探测器具有暗电流低、光电导增益高、响应速度快、抗辐照性能高的优点, 已经取代 IBC 探测器成为天文用红外探测器主流器件.

1977 年由美国 Rockwell Science Center 的 Petroff

表 3 高性能 Si:As BIB 红外焦平面阵列主要性能指标^[13]

Table 3 Key performance indicators of advanced Si:As BIB infrared focal plane arrays [13]

探测器	像元数	探测波长 (μm)	像元尺寸 (μm)	工作温度	暗电流	读出噪声	满阱	量子效率
Si:As(DRS Technologies, WISE)	1024×1024	5–25	18	7.8 K	$<5\ \text{e}^-$	$42\ \text{e}^- \text{RMS}$	$>10^5\ \text{e}^-$	$>70\%$
Si:As (Raytheon, JWST)	1024×1024	5–25	25	6.7 K	$1\ \text{e}^-$	$10\ \text{e}^- \text{RMS}$	$2\times 10^5\ \text{e}^-$	$>70\%$

和 Stapelbroek 首次提出^[10], 并在 1979 年研制出了第一个 BIB 探测器^[11]. 早期器件都是基于硅材料来实现的^[14]. 一开始硅基 BIB 器件的研制主要围绕 Si:As 展开^[15,16]. Si:As BIB 探测器的响应波长为 2–30 μm , 大量用于地基天文望远镜及空间望远镜上. 商业化程度已很高的微电子行业中, 集成电路的 N 型掺杂多采用 Si:P, 硅材料中此类掺杂发展已非常成熟, 所以很快 Si:P 也被运用到 BIB 器件上, 并获得截止波长约 34 μm 的优良表现性能^[17].

1984 年提出了第一个 BIB 焦平面器件^[14]. 1988 年提出使用锗来扩展探测波长. 目前 Si 基的 BIB 探测波长覆盖 5–40 μm ^[18,19], Ge 基覆盖 40–200 μm ^[20–25], GaAs 基的 BIB 探测波长可达 300 μm 左右^[26–28]. 然而, 目前大规模凝视型的红外焦平面 BIB 探测器只能通过 Si:As 实现^[29].

简单来说, 传统非本征型光电导(Extrinsic Photoconductive, ESPC)红外探测器需要高的掺杂浓度来改善吸收性能, 但其最大掺杂浓度却受到由此产生的杂质带电导引起的过大暗电流的限制^[6,22,30]. BIB 红外探测器巧妙地在电极和红外吸收层之间引入一个本征层(阻挡层)来阻断杂质带内暗电流的传导, 使之能够有更高的掺杂浓度. BIB 器件阻挡层的结构设计大大降低了器件的暗电流, 也因此 BIB 器件红外吸收层的杂质浓度可以比 ESPC 器件高 2 个数量级(如 Si:As 可达 10^{17} 数量级), 量子效率得到显著提升. 另一方面, BIB 器件掺杂浓度的提升和体积较 ESPC 器件的大为减小, 增强了其对宇宙粒子冲击的调节能力, 有利于地基天文红外探测.

4.1 BIB 器件结构

BIB 探测器中最重要的结构是阻挡层和红外吸收层, 多数 BIB 探测器都是制作在硅和锗体材料上. 探测器的类型一般用多数掺杂剂表明, 如 Si:As, Si:Sb, Ge:Ga 和 Ge:B. 对于 Si, 吸收层的掺杂浓度通常为 $1 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; 而对于 Ge, 其掺杂浓度要低 20 倍. 理想阻挡层是本征的, 所以为了得到良好性能, 该层必须尽可能纯, 厚度介于 3–6 μm 之间.

光电探测器的工作主要取决于吸收层和本征层中少数掺杂剂的浓度, 该浓度应保持在尽可能低的水平. 实际上, 最低少数载流子掺杂浓度由不可避免的本底浓度决定, 最好可以实现小于 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 的低本底浓度. 这些薄层通常采用外延方法生长, 并在生

长过程中引入掺杂, 也可以采用离子注入、中子嬗变的方法掺杂形成吸收层. BIB 器件可以采用正入射, 而采用混成互连的 BIB 焦平面器件采用背面光入射的结构. 在这些结构中, 应使中性区和衬底杂质浓度最小以避免红外吸收层外的无效吸收. 多数的 BIB 光电探测器都使用 Si:As, 采用背面光照. 图 2 为背照式 BIB 结构示意图. 在高纯硅衬底上注入形成背电极层, 然后制备浅施主重掺杂层作为红外吸收层, 再制备一层本征硅阻挡层, 接着生长一层钝化层, 在钝化层上开接触孔制备上电极. 该器件结构属于背照射方式.

另一种结构属于前照式, 如图 3. 像三明治一样, 红外吸收层夹在低阻硅衬底和近本征阻挡层之间. 为了极大地提高量子效率, 红外吸收层厚度一般取 10–45 μm , 其本底浓度也应尽可能低(一般能达到

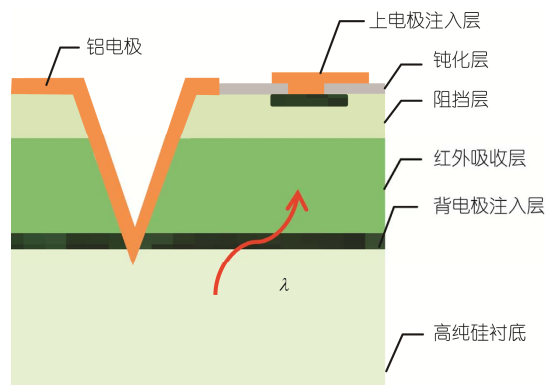


图 2 (网络版彩图)背照式 BIB 器件结构示意图

Figure 2 (Color online) Device structure of back-illuminated BIB detector.

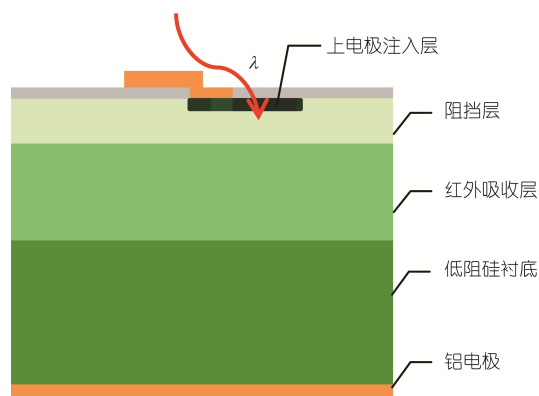


图 3 (网络版彩图)前照式 BIB 器件结构示意图

Figure 3 (Color online) Device structure of front-illuminated BIB detector.

10^{13} cm^{-3} 量级).

此外, 由于硅外延生长比较复杂, 且很难在重掺杂的吸收层上生长高纯的阻挡层. 所以也有人提出了不用外延生长, 只是基于图形曝光, 离子注入, 金属化就能完成器件制备的结构^[20,31,32].

4.2 BIB 器件物理模型

不同于 PbS、MCT 等本征性光电导探测器利用电子从价带到导带的跃迁实现探测, BIB 探测器是利用杂质带吸收, 电子由杂质带到导带的跃迁实现更近红外探测的非本征型光电探测器^[30]. 在 BIB 光电探测器中, 只有耗尽层内吸收的光子才能形成光电流^[33].

此处以 N 型 BIB 器件为例(见图 4). P 型 BIB 器件原理类似. 我们首先讨论没有光照时器件的静电分布. 在长波探测器所需要的低温下, 忽略施主杂质的热离化. 在吸收层内, 多数载流子杂质(施主浓度 N_D)和少数载流子杂质(受主浓度 N_A)都存在, 由于施主能级远高于受主能级, 因此即便是在很低的温度下, 施主上的电子也能够离化到受主能级被受主俘获. 热平衡时, 由电中性条件有: $N_D^+ = N_A^-$. 由于受主浓度低, 相邻受主间隔远, 电子波函数不交叠, 亦不能势垒贯穿, 所以电子一旦被受主捕获就稳稳地被束缚在受主周围形成电离受主 N_A^- , 不能移动; 离化后的施主带正电, 其自身并不能移动. 而施主浓度高, 相邻施主间隔较近, 因此电子可通过波函数交叠或隧穿效应在毗邻的施主间游动, 从中性施主跳跃到相邻电离施主(从能带图来看, 相邻施主电子波函数交叠形成杂质带, 杂质带上的电子可以自由运动, 称之为杂质带效应, 如图 4 所示). 其效果等同于电离施主 D^+ 电荷的反向跳跃(Hopping). 基于此效应, 在红外吸收层 D^+ 电荷变成可“移动”的. 而在阻挡层内部的施主(浓度小于 10^{15} cm^{-3})的平均距离大于 100 nm, 因此, D^+ 电荷无法移动, 杂质带在这一层不连续, 被阻挡. 而导带在吸收层和本征层之间仍是连续的, 所以阻挡层只会阻挡 D^+ 电荷而不会阻挡导带电子的输运. 对 N 型的红外吸收层, 需要在阻挡层一侧电极加正偏压(类比二极管, 把用这样的方法加上的电压称之为反向偏压), 阻断电极 D^+ 电荷的注入. 若在另一侧加正偏压(正向偏压), 杂质能带中的电子迅速被电极收集, 将产生很大的暗电流, 即 BIB 探测器具有单向性, 类似于二极管特性.

当没有红外光入射到探测器上时, 阻挡层一侧施加正偏压, D^+ 电荷从有源吸收层扫到负电极, 由于阻

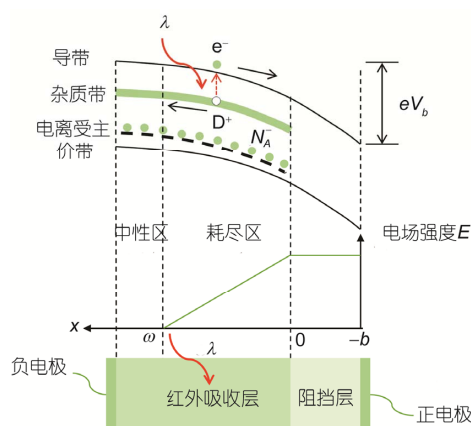


图 4 (网络版彩图) N 型 BIB 在反向偏压下能带结构示意图和电场分布图

Figure 4 (Color online) Energy band diagram and electric field distribution of an n-type BIB detector operating at reverse bias.

挡层阻碍注入新的 D^+ 电荷, 从而形成一个 D^+ 电荷耗尽区, 耗尽区的宽度取决于偏置电压和受主浓度. 由于离化受主不能移动, 在耗尽区形成一个负的空间电荷层, 如图 4 所示. 未被耗尽的吸收层部分, 我们称之为中性区.

由泊松方程易得其耗尽层宽度可表示为

$$\omega = \left[\left(2\varepsilon_{\text{Si}}\varepsilon_0 V / qN_A^- \right) + b^2 \right]^{1/2} - b.$$

其中 $\varepsilon_{\text{Si}} = 11.5 (T = 4 \text{ K})$; V 为外加偏压; N_A^- 为受主浓度, b 为阻挡层厚度.

当红外光入射到探测器上时, 吸收层的中性施主吸收一个红外光子产生一个 D^+ 电荷和一个导带电子. 在外加电场作用下, 电子被扫出阻挡层并被正电极收集, 同时阻挡层阻止正电极向吸收层注入新的 D^+ 电荷; D^+ 电荷沿着相反方向跳跃并在负电极处被注入电子中和. 这里特别说明一下吸收层中耗尽区和中性区对光电流贡献的差异(见图 4 所示). 在耗尽区, D^+ 电荷耗尽, 该层导带以下没有空的电子态, 因此, 没有电子陷阱, 电子收集效率很高. 电子吸收光子跃迁到导带, 电子和 D^+ 电荷迅速被电场扫至耗尽区两侧. 由于耗尽区和阻挡层的导带是连续的, 所以电子可以直接到达正电极, 形成信号电流. 而在中性区, 跃迁到导带的电子寿命短, 容易退激发被 D^+ 电荷捕获, 很难形成信号电流. 可见由于耗尽层电场的存在, 使得光生载流子能迅速转换为光电流. 因此, 为了提高量子效率, 红外吸收层厚度的临界值应取

到耗尽层的厚度,从而有利于提高器件的电子收集效率,降低器件产生一复合噪声,增大器件光电导增益(≈ 1 ,小偏压下).

综上所述,就工作原理而言,BIB探测器类似于光伏(Photovoltaic, PV)探测器.当能量大于掺杂离子热离化能(此处热离化是指杂质基态跃迁到导带底)的红外光子入射到探测器上时,产生电子-空穴对(此处空穴是指N型BIB中 D^+ 电荷)参与导电.同时,在耗尽区具有同PV器件类似的优点,即光生载流子不易受陷阱(N型BIB器件中主要指施主电离杂质 D^+)捕获.

5 结论

红外探测器的发展经历的一百多年的时间,目前已经研制出多种规格和种类的红外探测器,满足

从军事到民用的不同应用要求.但中、短波长红外探测器的重要应用和最高水平的应用主要还是在军事技术上,其发展主要受到军事技术需要的驱使和引导;军事技术、空间技术发展和天文研究需求推动了长波红外探测器的研制和升级,天文用长波红外焦平面器件代表着长波红外探测器件发展的最高水平.

本文简要综述了红外天文学的发展概况及天文用红外探测的发展历史,并主要针对国际上天文用 $5\mu\text{m}$ 以上主流探测器——BIB探测器进行了较为详细的介绍.美国和俄罗斯对该类探测器研究相对成熟,但相关文献却并不多见,国内在该探测器领域尚属起步,仍有很多工作要做.我们目前正在开展Si:P, Si:AsBIB探测器的研制及其相关光电特性的表征工作,以期能够对BIB探测器探测机理及相关物理过程有更深刻地理解,逐步缩小这一领域与国外先进水平的差距.

致谢 作者感谢国家自然科学基金重大项目和中国科学院上海技术物理研究所创新专项基金对本课题组在开展BIB探测器研制及相关物理机理探究所给予的大力支持.

参考文献

- 1 Erick T Y. Space infrared detectors from IRAS to SIRTf. SPIE, 1993, 2019: 96–108
- 2 Conwell E M. Impurity band conduction in germanium and silicon. Phys Rev, 1956, 103(1): 51–61
- 3 Wang S J. Infrared astronomical observations progresss (in Chinese). J Beijing Norm Univ, 2005, 41(3): 281–284 [王术军. 红外天文观测技术进展. 北京师范大学学报, 2005, 41(3): 281–284]
- 4 汤定元. 光电器件概论. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989. 402–404
- 5 Robert M, John E. High performance large format impurity band conductor focal plane arrays for astronomy applications. Proc SPIE, 2010, 7780: 778003
- 6 Sclar N. Development status of silicon extrinsic IR detectors. Proc SPIE, 1984, 443: 11–41
- 7 Cao W D. Near infrared focal plane arrays for astronomy (in Chinese). Prog Astron, 1998, 16(2): 103–109 [曹文达. 天文用近红外焦平面阵列. 天文学进展, 1998, 16(2): 103–109]
- 8 Rieke G. Detection of Light from the Ultraviolet to the Submillimeter. London: Cambridge University Press, 2003. 58–59
- 9 Hogue H, Atkins E, Reynolds D. Update on Blocked Impurity Band Detector technology from DRS. Proc SPIE, 2010, 7780: 778004
- 10 Petroff M D, Stapelbroek M G. Blocked impurity band detectors. U S A Patent, No.4568960, 1986-2-4
- 11 Frank S, Frank L M, Diller J. Temperature dependence of the figures of merit for blocked impurity band detectors. J Appl Phys, 1988, 63(11): 5583–5585
- 12 Sclar N. Development status of silicon extrinsic IR detectors, II. Proc SPIE, 1983, doi:10.1117/12.937937
- 13 Zuo L. Advanced infrared focal plane array technology for astronomical observations (in Chinese). Laser Infrared, 2011, 41(10): 1062–1066 [左雷. 用于天文观测的先进红外焦平面技术. 激光与红外, 2011, 41(10): 1062–1066]
- 14 Huffman J E. Infrared setectors for 2 to 220 μm astronomy. Proc SPIE, 1994, 2274: 157–169
- 15 Stetson S B, Reynolds D B, Stapelbroek M G, et al. Design and performance of blocked-impurity-band detector focal plane arrays. Proc SPIE, 1986, 686: 48–65
- 16 Reynolds D B, Seib D H, Stetson S B, et al. Blocked impurity band hybrid infrared focal plane arrays for astronomy. IEEE Trans Nucl Sci,

- 1989, 36: 857–862
- 17 Hogue H H, Guptill M L, Reynolds D, et al. Space mid-IR detectors from DRS. *Proc SPIE*, 2003, 4850: 880–889
 - 18 Huffman J E, Crouse A G, Halleck B L, et al. Si:Sb blocked impurity band detectors for infrared astronomy. *J Appl Phys*, 1992, 72: 273–275
 - 19 Cleve J E. Evaluation of Si:As and Si:Sb blocked-impurity-band detectors for SIRTf and WIRE. *Proc SPIE*, 1995, 2553: 502–513
 - 20 Beeman J W. Ion-implanted Ge:B far-infrared blocked impurity-band detectors. *Infrared Phys Technol*, 2007, 51: 60–65
 - 21 Watson D M, Huffman J E. Germanium blocked impurity band far infrared detectors. *Appl Phys Lett*, 1988, 52: 1602–1604
 - 22 Watson D M. Germanium blocked impurity band detector arrays: Unpassivated devices with bulk substrates. *J Appl Phys*, 1993, 74: 4199–4206
 - 23 Wu I C. Ion-implanted extrinsic Ge photodetectors with extended cutoff wavelength. *Appl Phys Lett*, 1991, 58: 1431–1433
 - 24 Burstein E, Oberly J J, Davisson J W. Infrared photoconductivity due to neutral impurity in silicon. *Phys Rev*, 1953, 89(1): 331–332
 - 25 Bandaru J. Growth and performance of Ge:Sb Blocked Impurity Band (BIB) detectors. *Proc SPIE*, 2002, 4486: 193–199
 - 26 Nancy M H. BIB detector development for the far infrared: From Ge to GaAs. *Proc SPIE*, 2003, 4999: 182–194
 - 27 Reichertz L A. GaAs BIB photo detector development for far-infrared astronomy. *Proc SPIE*, 2004, 5543: 231–238
 - 28 Reichertz L A. Development of a GaAs-based BIB detector for sub-mm wavelengths. *Proc SPIE*, 2006, 6275: 62751S
 - 29 Rogalski A. *Infrared Detectors*. Boca Raton, New York: CRC Press, 2011. 34–35
 - 30 Sclar N. Properties of doped silicon and germanium infrared detectors. *Prog Quant Electron*, 1984, 9: 149–257
 - 31 Liao K S, Liu X H, Li Z F, et al. Ion-implanted Si:P blocked-impurity-band photodetectors for far-infrared and terahertz radiation detection. *Proc SPIE*, 2013, 8909: 890913-1
 - 32 Rauter P. Terahertz Si:B blocked-impurity-band detectors defined by nonepitaxial methods. *Appl Phys Lett*, 2008, 93(26): 261104
 - 33 Szmulowicz F, Madarsz F L. Blocked impurity band detectors-an analytical model: Figures of merit. *J Appl Phys*, 1987, 62(6): 2533–2540

Blocked impurity band infrared detector for astronomy[†]

LIAO KaiSheng^{1,2}, LIU XiHui^{1,2}, HUANG Liang^{1,2}, LI ZhiFeng¹,
LI Ning^{1*} & DAI Ning¹

¹ State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

² University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

The imaging and ultra-sensitive detection of infrared radiation for cryogenic target in space and deep space exploration have significant application value. The radiation intensity of the target below 300 K is quite faint, whose corresponding characteristic radiation wavelength is very long. Blocked impurity band (BIB) detectors are one of the most important members in far-infrared detectors, with advantages of wide spectrum coverage, high sensitivity, low dark current, good resistance to cosmic particle radiation and capable of meeting the stringent requirements of astronomical exploration in far-infrared waveband. Getting start from the demands of infrared astronomical detection, this article represents the current status and progress on infrared astronomy, infrared detectors for astronomy and the blocked impurity band detectors. Additionally, the device structure and simplified physical model of BIB detectors are well-covered.

infrared astronomy, infrared detection for astronomy, blocked impurity band detectors, far-infrared

PACS: 05.45.-a, 45.50.Jf, 45.50.Pk, 95.55.Pe, 96.12.De

doi: 10.1360/SSPMA2013-00060