

红外光电子学中的新族——量子阱红外探测器

陆卫^{①*}, 李宁^①, 甄红楼^①, 徐文兰^①, 熊大元^{②*}

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 华东师范大学信息科学技术学院 极化材料与器件教育部重点实验室, 上海 200241

* 联系人, E-mail: luwei@mail.sitp.ac.cn, dyxiong@ee.ecnu.edu.cn

收稿日期: 2008-10-28; 接受日期: 2009-01-19

国家自然科学基金(批准号: 10474020, 10734090, 60221502)和国家重点基础研究发展规划(编号: 2004CB619004)资助项目

摘要 回顾了近 10 年基于半导体中量子限制效应红外探测器的进展. 主要关注的是二维限制结构, 即量子阱结构, 形成的区别与传统红外光子探测的子带跃迁机理. 在红外光电子领域作为新族的量子阱红外探测器(quantum well infrared photo-detector, QWIP)与最典型的红外探测器代表碲镉汞红外探测器进行了各自特色的分析, 包括基本工作机理和材料与器件的制备技术等方面. 对于 QWIP 发展的回顾提升了与碲镉汞红外探测器之间的互补关系. 也给出了对于 QWIP 在未来发展方面的基本趋势.

关键词

红外光电子学
量子阱红外探测器
研究进展
发展趋势

红外探测器是一种对于红外辐射进行高灵敏度感应的光电转换器件. 早期的红外探测基于红外辐射的热效应. 根据电子受光子激发后输运性能的差异制作的探测器称为光子探测器. 目前以碲镉汞为代表的红外光子探测器已经获得了长足的发展. 而与碲镉汞探测器有着不同量子机理的量子阱红外探测器正崭露头角.

对物体热特征分布的探测是对红外辐射感知的必然发展. 单元器件和二维机械扫描系统结合实现了第一代扫描成像探测技术, 红外焦平面器件将机械扫描转换为电扫描, 单个元器件演变为阵列器件, 这就是第二代成像探测技术.

在单元器件发展到阵列器件过程中, 均匀性成为影响成像探测能力的关键. 目前碲镉汞红外焦平面器件在红外成像探测技术领域内举足轻重, 一如硅材料在微电子领域的地位. 然而由于碲镉汞中 Hg-Te 结合键的相对脆弱, 材料和器件制备技术始终难以象硅工艺那样得到精确控制, 均匀性难度极大. QWIP 器件的主导材料是砷化镓基半导体, 材料与器

件工艺仅次于硅工艺, 均匀性可以高约 1 个数量级. 当然, 量子阱红外探测由其基本工作原理决定, 量子效率比碲镉汞红外探测器要小近 1 个量级. QWIP 在均匀性上的优势以及在量子效率上的劣势决定了它与碲镉汞红外探测器件两者必然处于一种互补状态.

1983 年 Smith 等人首次报道了光波导型多量子阱在 3~5 μm 和 8~14 μm 的中红外区有潜在的探测应用前景^[1]. 1985 年 West 等人^[2]首先观察到斜入射情况下 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 多量子阱有很强的红外光吸收. 后来, Levine 等人^[3]研制出 77 K 工作温度下峰值波长为 8.3 μm , 探测率 $D^* = 1.0 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 的 QWIP. 1991 年探测器的峰值响应波长做到了 11~15 μm , 50 K 工作温度下的探测率 D^* 达到 $3.0 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ ^[4]. 在单元器件探测率不断提升的同时, 多元^[5]、线列^[6,7]和面阵^[8-12]器件不断得以发展. 近期美国 Nasa 报道了 10^6 像素的长波量子阱红外焦平面器件^[13]. 256×256 元双色红外探测器线阵, 可同时探测中波和长波波段^[14]. 640×480 元双色红外探测器焦平面, 可同时探测 8~9 μm 和 14~15 μm 红外波段^[15].

而一种新型的 QWIP-LED 红外焦平面器件由 Liu 提出并实现, 该方案巧妙地利用了硅 CCD 器件的成熟性和量子器件的可集成性, 实现了对于 QWIP 红外焦平面器件的光学读出^[16~18].

1 量子局域结构红外探测物理模型

1.1 红外光耦合特性

由半导体异质材料组合而成的电子量子局域性限制结构中, QWIP 的光吸收相应于量子阱子带间的跃迁. 由于 n 型量子阱材料如 GaAs 中导带 Γ 能谷电子的有效质量是各向同性的, 器件对正入射辐射不吸收. 虽然 p 型 QWIP 中由于轻重空穴能带的混合, 可以吸收正入射光, 但由于空穴的迁移率比电子要低得多, n 型器件还是人们研究的重点, 为了响应正入射光, 必须使用光栅.

图 1(a) 是量子阱焦平面器件所用的二维衍射光栅示意图. 光从 GaAs 衬底正入射.

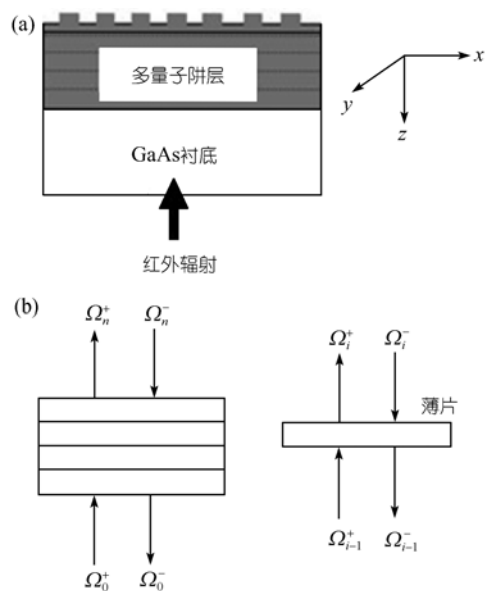


图 1 n 型 QWIP 及其衍射光栅结构(a)和散射矩阵计算中(b), 光栅连同多量子阱层及 GaAs 衬底层一起被分成 n 层薄片

散射矩阵方法的理论研究模型如图 1(b) 所示. 图 2 显示了离开光栅反射面 $0.5 \mu\text{m}$ 时 x, y 平面的光场强度的分布. 可以清楚地看到 x, y 平面不同位置的不同衍射强度具有由波长决定的周期性. 进一步计算表

明光场同时沿 z 方向离开光栅反射面衰减. Fu 等人^[19,20]运用惠更斯原理将上述现象归为界面的近场效应.

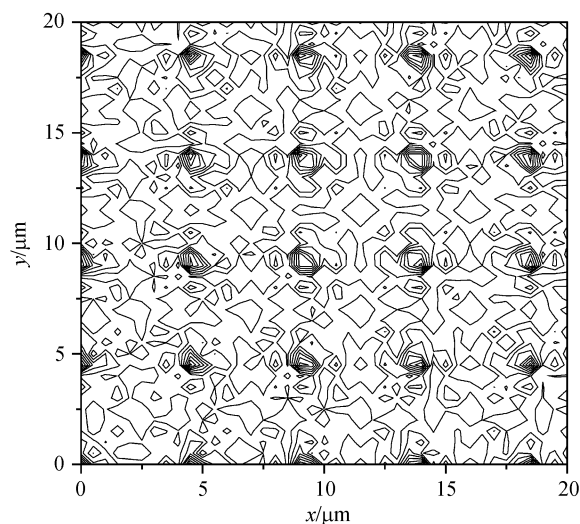


图 2 离开光栅反射面 $0.5 \mu\text{m}$ 时 xy 平面上的衍射光场分布

研究表明当光栅台面上光阑和非光阑两部分面积近似相等时, 耦合效率最大. 因为此时从两个面反射回来的光场强度相等. 选取光栅深度可以让对耦合没有贡献的 $(0, 0)$ 级的衍射光波发生干涉相消, 主要能量转移到高阶次的衍射光波, 显著增强了量子阱光栅的耦合效率.

1.2 暗电流与光电流

AlGaAs 势垒区一般不掺杂, 载流子浓度很低, 电场可以近似为常数; 而量子阱中的载流子浓度很高, 加之掺杂, 其中的电场可以忽略. 图 3 为对甚长波 QWIP 计算得到的电子从发射极到第一个量子阱的输运几率以及相应电子态的占据几率. 由于势垒层很厚, 暗电流主要来源于能量高于势垒边的热激发电子^[21].

QWIP 中的电流由两部分组成: (i) 热电子从势垒边激发后从一个量子阱区输运到下一个量子阱区形成暗电流; (ii) 基态电子光激发到激发态形成光生载流子, 然后在外电压下形成光电流. 两者的实验测量值如图 4 所示, 图 4 同时显示了与实验符合良好的理论计算结果.

近来, 人们又发展了若干新的自恰计算模型. 例

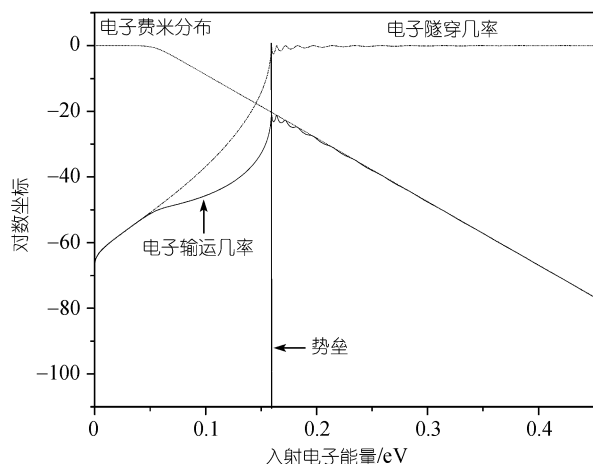


图3 电子从发射极到第一个量子阱的输运几率以及相应电子态的占据几率

如文献[22]获得的暗电流计算值与实验吻合很好, 还显示了电场在整个器件结构上的非均匀分布. 另一种自洽计算显示了发射极与量子阱活动层界面上会形成一个小三角形阱, 载流子在三角阱中聚集, 很好地解释了甚长波多量子阱探测器在小偏压下暗电流较小的实验结果[23].

2 QWIP 研制

QWIP 的研制离不开其具体应用背景. 如激光雷达中激光信号需要快速响应, 而空间低温目标是冷背景. 因此在量子阱掺杂浓度、势垒宽度、光敏元几

何结构、读出电路的功能、制冷封装等方面会有不同的研制目标. 如何使用独特的量子剪裁效应, 做到某种程度的柔性匹配是研制中需要考虑的问题.

2.1 QWIP 材料

制备 QWIP 材料的方法有两种, 分子束外延和金属氧化物化学气相沉积. 前者量子结构可在原子层尺度上严格可控, 但比较容易形成微缺陷; 后者的微缺陷密度低, 可以进行小批量生产应用.

GaAs/AlGaAs 多量子阱结构材料可调节的参数包括: 量子阱宽度, 势垒高度, 量子阱中的掺杂浓度, 量子阱周期数, 势垒宽度等. 参数优化的目的在于最大程度提升光电流、降低暗电流. 光电流是电子从基态激发到激发态并在电场驱动下漂移到电极过程的串连; 而暗电流之一是冷背景下就具有的纯粹电学意义上的暗电流, 来自量子阱内基态上的电子和电极费米面附近电子, 通过隧穿过程和热辅助过程形成电流; 之二是观测目标外的背景辐射形成的电流. 当背景引起的暗电流开始上升到与电学意义暗电流相等时, 探测器就进入了背景限红外探测的工作模式. 下面分别论述诸参数的设计.

调节量子阱的宽度和垒高, 在满足探测波长要求的情况下, 可以将第一激发态调制到与势垒边共振的准束缚态, 使光生载流子有最大迁移到电极的能力以增加光电流; 同时让基态能量离势垒最远, 抑

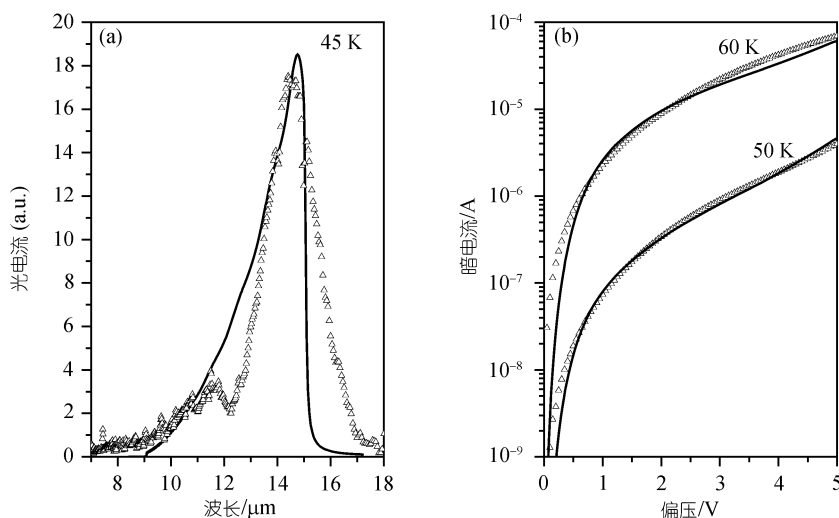


图4 甚长波 QWIP 样品的光电流谱(a)和暗电流曲线(b)

三角点线为实验测量的结果, 实线为理论计算的结果

制暗电流.

量子阱中掺杂浓度由增大吸收系数、降低暗电流两者的平衡所决定. 高掺杂浓度会形成较大的吸收系数, 增大量子效率, 但同时也形成较大的暗电流, 导致较大的噪声. 作为一种普遍参考的标准, GaAs/AlGaAs QWIP 要获得最佳的探测率, 其掺杂浓度所对应的费米能级约为 $2K_B T$; 而要获得最高的背景限工作温度, 则需要有约为 $K_B T$ 的费米能级. 它们所对应的掺杂浓度分别约为 $5 \times 10^9 T \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $2.5 \times 10^9 T \cdot \text{cm}^{-2}$.

量子阱周期数的设计要兼顾材料的制备能力. 周期数越多, 吸收率越大, 但材料厚度越大, 外延材料的质量也就越低. 当然吸收率的大小并非完全由量子阱周期数决定, 还与器件的几何结构和光学耦合途径密切相关, 优化的目的是获得最少周期数下的最大吸收率.

大的势垒宽度可以抑制器件中上述电学意义的暗电流, 特别可以抑制隧穿电流. 在室温背景下, 背景红外辐射光激发的暗电流约在 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ 量级. 由量子阱间的传输几率以及隧穿频率计算可得, $9 \mu\text{m}$ 探测器背景限的势垒厚度约在 $20 \sim 30 \text{ nm}$.

2.2 QWIP 光敏芯片

光栅的几何结构设计直接影响了探测器的量子效率, 既由器件光学、电学特性以及相应读出电路等因素决定, 但要受到刻蚀精度、几何均匀性和光学串音等工艺条件的制约. 设计还必然注意到光敏元、光栅的几何尺寸与探测光的波长相近这个重要因素.

光敏元芯片制备的基本工艺流程为: 清洗→光栅光刻→光栅腐蚀→台面光刻→台面腐蚀→电极光刻→蒸发电极→合金化→中间测试→介质生长→In 柱生长→切片→与读出电路互联→减薄→封装测试, 如图 5 所示. 在这些工艺中, 针对材料自身结构的各向异性, 选择各向异性不明显的刻蚀方法和刻蚀速度以确保刻蚀均匀性尤为重要. 这样才能保持 QWIP 最突出的均匀性优势. 其他很多工艺与传统的碲镉汞红外焦平面器件工艺技术相兼容. 因此量子阱红外焦平面的技术平台可以和碲镉汞红外焦平面技术平台密切联系甚至融合.

2.3 读出电路

光敏元芯片将红外光信号转换为电信号后, 必

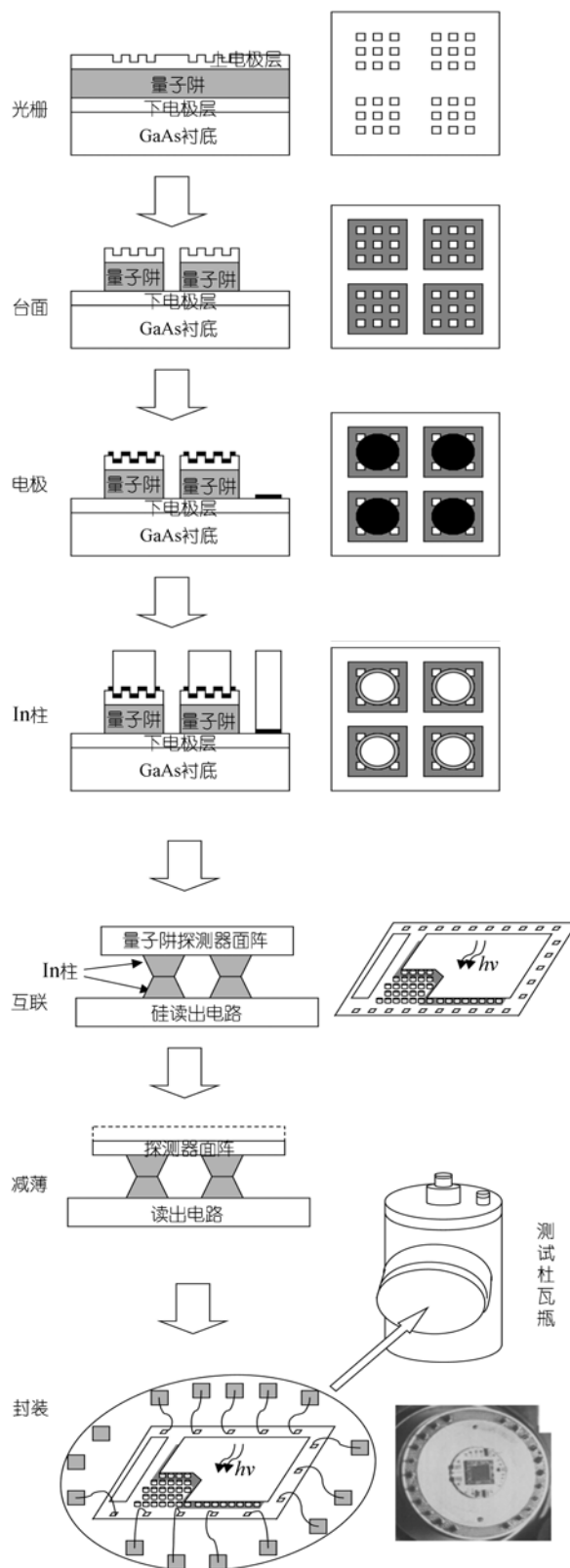


图 5 器件工艺流程示意图

须有效读出并送入显示系统才能最终完成成像探测。20 世纪 70 年代末, 单片器件和铟柱互联工艺促进了读出电路的发展, 使光电探测器与第一级放大器的引线长度大大减短, 有效地减小了电磁干扰和长线引入的噪声, 改善了信噪比和响应速度, 有效降低了致冷的热负载, 其可靠性远高于分立元件组成的系统。随着红外焦平面技术的发展, 读出电路已成为影响焦平面性能的一个非常重要方面。

2.4 互联封装

完成探测器面阵和硅读出电路的制备后, 通过生长 In 柱实现互联, 构成完整的焦平面探测器。由于 QWIP 必需在低温下工作, 因此芯片必需封装在杜瓦瓶中。QWIP 的封装虽然可以采用碲镉汞红外探测器相对成熟的封装技术, 但由于器件对温度的敏感性远大于碲镉汞器件, 所以需要特别注意热传导问题。信号引线的数量尽可能少, 以减小热负载。如果处理不当, 引线会消耗 50% 以上的制冷量。同时还需要采用冷屏和红外滤光片, 以降低背景辐射导致的器件暗电流。

2.5 焦平面器件性能测试与红外成像

单元红外探测器的基本特性由探测率和响应率两个基本物理量表达。而焦平面器件对不同的应用需求, 所关注的重点是不同的, 因而给制定焦平面器件测量的统一测试标准带来了困难。我国曾于 1995 年形成过“焦平面探测器测试与评价”草案。相对于单元器件, 焦平面器件测试主要引入了表征均匀性的参数。

其实考察焦平面器件性能的最直观方法就是热成像。通过热成像的图像灰度级和分辨率直观感知器件的基本性能。我们曾在 1994 年用 128 元线列长

波 QWIP 得到了手掌下第十张纸上的残留热像。其时碲镉汞红外焦平面器件还不能在长波段实现热成像。量子阱红外焦平面器件在中国应用部门的研究也由此而启动。

作为对于焦平面器件关于应用上适用性的最直观体现就是进行红外焦平面器件的热成像, 人们可以通过热成像所获得的图像灰度级和分辨率特性直观地感知器件在应用上可能体现的基本性能。常用的焦平面器件有二种, 一种是线列器件, 另一种是面阵器件, 对于线列器件的成像探测人们还需要一个维度上的扫描, 而对于面阵器件的成像探测可直接采用凝视成像就可以了。图 6 是采用 64 元线列的长波量子阱红外探测器所成的被探测目标热像, 图 6(a)~(d) 分别是人的手在一本书的第一页、第四页、第八页和第十一篇上留下的手印热像, 可以看到量子阱红外探测器对于目标中较小的温差还是有很敏感的分辩能力的。该成像是 1994 年完成的, 当时我国碲镉汞长波红外焦平面器件技术还不是十分成熟, 还没有能够在长波红外波段实现热成像, 量子阱长波红外线列探测器的热成像快速成功实现也说明了量子阱红外探测器的材料与器件工艺成熟性上拥有的比较优势, 同时在中国的应用部门量子阱红外焦平面器件研究得以启动。

3 QWIP 的发展方向讨论

QWIP 的发展自然由红外光电探测的应用所驱动。相对碲镉汞红外焦平面器件, QWIP 的一个发展优势在于甚长波、超长波乃至太赫兹的光波探测。虽然从原理上看通过增加汞组分碲镉汞探测器也能达到长波段, 然而由于 Hg-Te 键的脆弱, 汞组分的不均匀性会严重导致探测波长的不均匀性。在 QWIP 中,

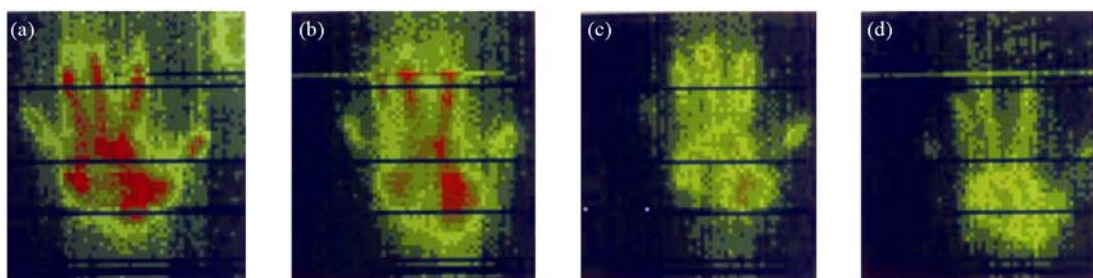


图 6 (a)~(d) 分别是人手在书的第一、第四、第八和第十一篇上留下的手印热像

仅需调节量子阱垒高和阱宽这两个在GaAs基材料中可以做到十分均匀的参量, 就可以达到上述探测波段. 发展方向之二是双色乃至多色探测器的单片集成, 目前已有中波与长波波段四色单片集成焦平面器件的报道^[24]. 碲镉汞红外探测器要做到这样的多色集成有相当难度. 发展方向之三是大规模红外焦平面器件. 当焦平面像元数高达百万像素以上时, 由于红外探测衍射极限对光敏元几何尺寸的限制, 焦平面芯片的有效面积将在 10 cm^2 量级, 比起碲镉汞来, GaAs基量子阱材料实现大规模焦平面所面临的困难要小. 目前已实现了长波红外 1 兆像素规模的量子阱焦平面器件样品^[13]. 上述三个发展方向是针对与碲镉汞探测器相比的优势而言的.

QWIP 自身还有需要进一步提升性能的发展空间. 如相对弱红外辐射目标探测, 目前 QWIP 的灵敏度没有碲镉汞红外探测器高, 量子效率比碲镉汞材料低近一个数量级; 器件工作的制冷温度比碲镉汞材料低约 $10\sim 20\text{ K}$, 热辅助暗电流过大. 另外由于量子阱工作温度低, 有效降低焦平面器件功耗也是一个关注难点. 我们期望可以从能带和波函数工程角度发掘一些碲镉汞材料中相对难以实现的潜力来发展 QWIP.

3.1 提升量子效率研究

虽然量子阱内子带间光跃迁矩阵元很大, 但结构中占 90%的势垒区相应的矩阵元几乎为零, 单次通过量子阱材料的红外光子仅有 10%左右被吸收. 可以统计地认为一个光子仅形成 0.1 个光生载流子. 即使这些光生载流子都被电极接受, 量子效率也只有 10%. 为了改善吸收, 可以最终将 GaAs 衬底去除, 留下外延生长约 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的薄膜材料. 这样可以让进入量子阱材料的红外光由薄膜多次反射增强吸收, 再者也抑制了由低吸收率导致的光敏元之间的光串音.

当光敏元芯片减薄到 $5\text{ }\mu\text{m}$ 尺度, 大规模红外焦平面器件光敏元横向尺寸缩至 $30\text{ }\mu\text{m}$ 尺度的时候, 长波和甚长波的波长就与光敏元的线度相接近, 光敏元成为一个光学微腔, 大量的近场效应和腔模特性将在光耦合中充分体现^[20,25]. 采用通常远场近似处理光传输行为会出现较大的误差, 采用几何光学方法误差更大. 光子晶体领域发展起来的有限时域差分方法和平面波展开方法是针对上述问题的很好研

究手段^[26,27]. 通过光敏元对入射光调制的几何结构, 可以有效提升子带跃迁的吸收强度, 进而在有效吸收率上接近碲镉汞材料.

充分利用QWIP量子特性是提高量子效率的重要探索. 如近期构造的量子点与隧穿二极管的量子结构复合, 就形成了对光生载流子的有效量子放大, 使得 1 个光生空穴诱导了 10^8 数量级的电子^[28,29]. 经典量子效率是一个光子形成输送到电极的载流子数量. 那么在这样的量子放大下, 量子效率就比经典量子效率极限 100%还高出多个量级. 该结构把量子点放在双势垒共振隧穿二极管量子结构附近, 而外加的偏置电压工作点就在共振隧穿的临界点, 光子激发的空穴被量子点俘获后在其周围形成较强的附加内建电场, 导致共振隧穿. 一个空穴就可以形成皮安量级的电流, 对光生载流子进行了 $10^7\sim 10^8$ 的量子倍增效应. 如果把发生光生空穴的材料部分换成p型量子阱结构, 子带跃迁形成的空穴就会导致很大的电流, 使QWIP等效量子效率得以大幅度提升^[30].

3.2 抑制暗电流

共振隧穿二极管与QWIP的集成结构在抑制暗电流, 提升QWIP的工作温度上迈出了可喜的一步. 注意到子带间光跃迁产生的光生载流子是非平衡分布, 载流子从基态激发到第一激发态时集中在该激发态上; 而热激发载流子是费米平衡态分布, 各激发态上都有载流子. 由于共振隧穿二极管有很好的载流子共振能量选择性, 所以如果在一定偏置电压下将量子阱第一激发态能量调整到共振隧穿二极管的能量, 则光生载流子发生共振隧穿, 极大地抑制了不在共振态上的热分布载流子对电流的贡献. 已有理论工作表明这种结构可能达到 $1\sim 2$ 个数量级暗电流抑制^[31,32].

碲镉汞焦平面器件是光伏型的, 驱动光生载流子运动的是扩散和内建电场. 而光导型的量子阱红外焦平面则必须外加偏置电压, 产生了与之成正比的暗电流. 为此人们尝试了多种光伏特性的量子结构^[33], 其中采用类似级联激光器量子结构的光伏型器件也许会成为量子阱探测器光伏器件的宠儿^[34]. 通过声子散射和共振隧穿, 光生载流子被有效分离, 等效为内建电场. 随着级联激光器技术的不断成熟, 制备材料的困难可望得到缓解.

3.3 降低热功耗

如前所述,光子型红外探测器件必须配以制冷系统,最实用的是机械制冷机,也可采用液氮乃至液氦杜瓦.器件中热功耗主要来自于读出电路焦耳热以及读出电路与杜瓦外电连接的连线漏热.近期由Liu研究组提出的QWIP-LED器件方案另辟捷径.在正偏置情况下,从n和p极分别向InGaAs量子阱中注入电子和空穴,形成典型LED器件中的电子-空穴辐射复合发光.红外光入射时,子带跃迁激发的光生载流子会使QWIP部分阻抗下降,在固定外置偏压条件下,向LED的量子阱结构注入的载流子密度上升,引发LED器件发光强度增强.因此只要探测到LED发光强度的变化就相当于探测到了红外辐射的强弱[17,18,35~39]. QWIP中光生载流子有很强的横向局域性, QWIP-LED的红外图像转换成 $0.9\text{ }\mu\text{m}$ 左右的近红外光图像,可以被如CCD这样的硅面阵器件直接探测[16,35].

QWIP-LED 虽然还需要低温,但不再需要读出电路;同时也仅需二根引线,避免了常规红外焦平面中约20根左右的引线,为此可大大地降低制冷功率,

硅CCD器件的高性能信号处理能力也得以充分应用.

由于目前的CCD中电子阱电荷容量(商业化产品中最大为40万电子数)往往比用于长波红外焦平面器件读出电路的电荷容量(一般可达1000万电子数)小1~2个数量级,因此用QWIP-LED红外成像时,为了有较高的热像灰度级,往往需要让CCD进行满阱工作点成像.室温红外热背景QWIP-LED的性能由满阱电子数的随机涨落噪声限制.因此,上述器件应用前景是冷背景下的成像,如深空中的红外成像探测.

由于目前的CCD中电子阱电荷容量(商业化产品中最大为40万电子数)往往比用于长波红外焦平面器件读出电路的电荷容量(一般可达1000万电子数)小1~2个数量级,因此用QWIP-LED红外成像时,为了有较高的热像灰度级,往往需要让CCD进行满阱工作模式下成像.室温红外热背景QWIP-LED的热成像性能由满阱电子数的随机涨落噪声限制.因此,上述器件应用会在冷背景下的成像探测方面得到更好的应用,如太空探索中的深空红外成像探测,这方面需求正由天文学发展而变得越来越迫切.

参考文献

- Smith J S, Chiu L C, Margalit S, et al. A new infrared detector using electron emission from multiple quantum wells. *J Vac Sci Technol B*, 1983, 1: 376—378[DOI]
- West L C, Eglash S J. First observation of an extremely large-dipole infrared transition within the conduction band of a GaAs quantum well. *Appl Phys Lett*, 1985, 46: 1156—1158[DOI]
- Levine B F, Bethea C G, Hasnain G, et al. High-detectivity $D^* = 1.0 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ GaAs/AlGaAs multiquantum well $\lambda = 8.3\text{ }\mu\text{m}$ infrared detector. *Appl Phys Lett*, 1988, 53: 296—298[DOI]
- Zussman A, Levine B F, Kuo J M, et al. Extended long-wavelength $\lambda = 11\text{--}15\text{ }\mu\text{m}$ GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum well infrared photodetectors. *J Appl Phys*, 1991, 70: 5101—5107[DOI]
- Lu W, Ou H J, Chen M H, et al. Application of GaAs/GaAlAs multiple-quantum-well infrared detector array in the infrared imaging camera. *Int J Infrared Millim Waves*, 1994, 15: 137—140[DOI]
- 万明芳, 欧海疆, 陆卫, 等. 128×1 元 GaAs/AlGaAs 多量子阱扫描型红外焦平面的红外成像. *红外与毫米波学报*, 1998, 17(1): 76—79
- 李宁, 郭芳敏, 熊大元, 等. 256×1 甚长波量子阱红外焦平面研究. *红外与激光工程*, 2006, 35(6): 756—759
- 李宁, 李娜, 陆卫, 等. 64×64 GaAs/AlGaAs 量子阱红外焦平面的研制. *红外与毫米波学报*, 1999, 18: 427—430
- Levine B F, Bethea C G, Glogovsky K G, et al. Long-wavelength 128×128 GaAs quantum well infrared photodetector arrays. *Semicond Sci Technol*, 1991, 6: 114—119[DOI]
- Schneider H, Walther M, Schonbein C, et al. QWIP FPAs for high-performance thermal imaging. *Physica E*, 2000, 7: 101—107[DOI]
- 苏艳梅, 种明, 张艳冰, 等. 128×160 元 GaAs/AlGaAs 多量子阱长波红外焦平面阵列. *半导体学报*, 2005, 26: 2044—2050
- 李献杰, 刘英斌, 冯震, 等. $9\text{ }\mu\text{m}$ 截止波长 128×128 AlGaAs/GaAs 量子阱红外焦平面探测器阵列. *半导体学报*, 2006, 27(8): 1355—1359

- 13 Jhabvala M D, Choi K K, Monroy C J, et al. Development of a 1 megapixel long IR QWIP focal plane array. In: *Infrared Technology and Applications XXXIII*, Proceedings of SPIE Bellingham: The International Society for Optical Engineering, 2007. 6542: 65420T
- 14 Goldberg A, Fischer T, Kennerly S, et al. Laboratory and field imaging test results on single-color and dual-band QWIP focal plane arrays. *Infrared Phys Technol*, 2001, 42: 309—312[DOI]
- 15 Gunapala S D, Bandara S V, Singh A, et al. 640×486 long-wavelength two-color GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetector (QWIP) focal plane array camera. *IEEE Trans Electron Devices*, 2000, 47: 963—971[DOI]
- 16 Dupont E, Byloos M, Liu H C, et al. Pixelless thermal imaging with integrated quantum-well infrared photodetector and light-emitting diode. *IEEE Photonics Technol*, 2002, 14(2): 182—184[DOI]
- 17 Zhen H L, Li N, Xiong D Y, et al. Fabrication and investigation of an upconversion quantum-well infrared photodetector integrated with a light-emitting diode. *Chin Phys Lett*, 2005, 22: 1806—1808[DOI]
- 18 甄红楼, 熊大元, 周旭昌, 等. 红外-近红外波长变换器件 p-QWIP-LED 研究. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2006, 36(4): 327—336
- 19 Fu Y, Willander M, Lu W, et al. Optical coupling in quantum well infrared photodetector by diffraction grating. *J Appl Phys*, 1998, 84: 5750—5755[DOI]
- 20 Fu Y, Willander M, Lu W, et al. Near-field coupling effect in normal incidence absorption of quantum well infrared photodetectors. *J Appl Phys*, 1999, 85: 1237—1239[DOI]
- 21 Fu Y, Li N, Karlsteen M. Thermoexcited and photoexcited carrier transports in a GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetector. *J Appl Phys*, 2000, 87: 511—516[DOI]
- 22 Thibaudau L, Bois P, Duboz J Y. A self-consistent model for quantum well infrared photodetectors. *J Appl Phys*, 1996, 79: 446—454[DOI]
- 23 Li N, Xiong D Y, Yang X F, et al. Dark currents of GaAs/AlGaAs quantum-well infrared photodetectors. *Appl Phys A*, 2007, 89: 701—705[DOI]
- 24 Tidrow M Z, Jiang X D, Li S S. A four-color quantum well infrared photodetector. *Appl Phys Lett*, 1999, 74: 1335—1337[DOI]
- 25 陆卫, 李宁, 江俊, 等. 无光栅耦合的 n 型 GaAs/AlGaAs 多量子阱红外焦平面器件. 专利号: ZL 00 127820.7; 国际专利主分类号: H01L 31/09, 2004-09-22
- 26 Chen H B, Chen X S, Zeng Y, et al. The distribution of grating-coupled field of quantum well infrared photodetector using FDTD method. *Proc SPIE*, 2007, 6835: 68351E—6
- 27 熊大元, 曾勇, 李宁, 等. 甚长波量子阱红外探测器光栅耦合的研究. *物理学报*, 2006, 55: 3642—3648
- 28 Blakesley J C, See P, Shields A J, et al. Efficient single photon detection by quantum dot resonant tunneling diodes. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 06740-1—4
- 29 Wang W P, Hou Y, Xiong D Y, et al. High photo-excited carrier multiplication by charged InAs dots in AlAs/GaAs/AlAs resonant tunneling diode. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 023508-1—3
- 30 陆卫, 刘昭麟, 陈平平, 等. 自放大红外探测器. 发明专利, 200510029982.8, 2005-09-23
- 31 Xiong D Y, Li N, Xu W L, et al. A Resonant tunneling structure integrated InGaAs/GaAs very-long-wavelength quantum-well infrared photodetector. *Chin Phys Lett*, 2007, 24: 3283—3285[DOI]
- 32 陆卫, 熊大元, 李宁, 等. 镓砷/铝镓砷甚长波 QWIP. 发明专利, 200610148069.4, 2006-12-27
- 33 陆卫, 李宁, 王少伟, 等. 量子阱红外焦平面光伏探测器件的光敏元芯片. 发明专利, ZL01112709.0; 国际专利主分类号: H01L 27/14, 2003-10-08
- 34 陆卫, 李宁, 江俊, 等. 量子阱红外级联光伏探测器件. 发明专利, ZL00125725.0; 国际专利主分类号: H01L 31/0232, 2003-10-08
- 35 Liu H C, Li J, Wasilewski Z R, et al. Integrated quantum well intersub-band photodetector and light emitting diode. *Electron Lett*, 1995, 31: 832—833[DOI]
- 36 陆卫, 陈效双, 刘兴权, 等. 无分立象元光学读出的量子阱红外焦平面芯片. 发明专利: ZL98121959.4, 2002-09-04
- 37 陆卫, 刘昭麟, 甄红楼, 等. 红外-近红外波长上转换探测器. 发明专利, 200610028489.9, 2006-06-30
- 38 陆卫, 侯颖, 甄红楼, 等. 利用铜镓氮发光二极管作为红外目标信号探测的成像装置. 发明专利, 200510111089.X, 2005-12-02
- 39 陆卫, 侯颖, 甄红楼, 等. 氮化镓基红外-可见波长转换探测器. 发明专利, 200510030062.8, 2005-09-28