

局域光场增强的量子阱红外探测器 (特邀)

刘 畅¹, 王 健², 左 璇¹, 熊大元^{1,2*}

- (1. 华东师范大学上海市多维度信息处理重点实验室, 上海 200241;
2. 华东师范大学极化材料与器件教育部重点实验室, 上海 200241)

摘 要: 量子阱红外探测器是继碲镉汞红外探测器之后又一重要的可以在中、长波段和甚长波段工作的红外探测器件。它在长波红外探测、多色探测及其焦平面技术方面表现出比碲镉汞红外探测器更具特色的优势,对量子阱红外探测器的研究将在很大程度上推动我国红外探测器技术的发展。这一探测器的突出优势是其材料均匀性好,制备技术成熟。但是由于量子效率偏低,且无法直接吸收垂直入射红外光,所以需要针对不同的红外探测波段,设计和制备各类光栅或微腔结构来进行光耦合及局域光场增强以有效提升探测器性能。如何更有效提升量子阱红外探测器的光耦合效率,降低暗电流,提高器件工作温度是仍然是目前研究的重点。文中着重介绍和总结了近 5 年来研究的局域光场增强的新型量子阱红外探测器,从提高探测器光耦合效率、降低器件暗电流和提高工作温度等方面重点讨论各种量子阱红外探测器的新结构和新机理,同时展望了这一探测器的未来发展方向。

关键词: 量子阱红外探测器; 表面等离激元; 光耦合; 局域光场增强

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20211009

Quantum well infrared detector enhanced by local light field (*Invited*)

Liu Chang¹, Wang Jian², Zuo Xuan¹, Xiong Dayuan^{1,2*}

- (1. Shanghai Key Laboratory of Multidimensional Information Processing, East China Normal University, Shanghai 200241, China;
2. Key Laboratory of Polar Materials and Devices, Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Quantum well infrared photodetectors (QWIPs) has been considered as another excellent candidate in long-wavelength and very-long-wavelength infrared detection. It shows more distinctive advantages than the traditional HgCdTe technology in long-wave infrared detection, multi-color detection and focal plane technology area. Keep research on QWIPs will greatly promote the development of our country's infrared detector technology. The outstanding advantages of QWIPs are its good maturity of III-V compound growth and processing techniques. However, due to the low quantum efficiency and the forbiddance of directly normal incident radiation absorption for n-type QW, it is necessary to design and prepare various gratings or microcavity structures for optical coupling and local electromagnetic field enhancement for different detection wavelengths. How to more effectively improve the optical coupling efficiency of QWIPs, reduce dark current, and increase the operating temperature of the device are still the hotspots of current research. The new type of QWIPs with local electromagnetic field enhancement in the past 5 years was emphatically introduced and summarized, focusing on the optical coupling, dark current and working temperature. Finally, the development of QWIPs with local electromagnetic field enhancement were given for future work.

Key words: quantum well infrared detector; surface plasmon; optical coupling; local electromagnetic field enhancement

收稿日期:2020-11-05; 修订日期:2020-12-15

基金项目:上海市科委资助项目 (18DZ2270800)

0 引言

红外探测器是现代红外光电技术发展的核心器件,其具有隐蔽性强、抗干扰能力好、体积小和功耗低等优点,在各行各业中具有不可替代的作用。例如,在军事方面,红外瞄准仪和红外夜视仪可以精准地提供可靠的侦查信息。在导弹系统中,红外探测器可以探测出导弹火焰从而为拦截系统提供准确的信息。在民用方面,由于人体各组织对于红外光吸收率的不同,可以使用红外探测器进行差异分析,对于疾病预防有很大的帮助,并且较于 X 射线更为安全。日常生活中,红外探测器也经常用于消防监控和危险气体检测等。总之,红外探测器的应用范围越来越广,是近 10 年来发展的热点。

20 世纪 50 年代,人们将半导体材料应用于探测器,研究出碲镉汞(HgCdTe)红外探测器,其具有高量子效率同时可以工作在室温下,目前仍是主流红外探测器之一。量子阱红外探测器(QWIP)是 20 世纪 80 年代发展起来的新型探测器,相对于碲镉汞红外探测器,量子阱红外探测器具有更加成熟的生长制备工艺技术,且材料的均匀性更好,适用于大面积的焦平面阵列。

最初,研究人员主要在理论和物理层面上研究量子阱红外探测器。随着研究不断的进行,人们更多地研究如何提升量子阱红外探测器的性能参数,比如如何降低暗电流、提高工作温度、提升量子效率等问题。文中主要展示了近 5 年来量子阱红外探测器的最新研究成果,并展望了未来量子阱红外探测器的发展方向。

1 量子阱红外探测器的工作原理

在红外探测系统中,探测器会收集光生载流子产生光电流。一般光子的能量比带隙大,可以不需要掺杂产生电子空穴对。通过对带隙宽度的调控,可以改变材料吸收光谱进而改变探测的响应波长。但是波长越大,带隙越小,小带隙的半导体材料相比于大带隙更加难以精确制备,所以,通过一个能带间的子带吸收可以实现长波段的光响应,量子阱红外探测器应运而生。

量子阱红外探测器主要有三种跃迁模式,分别是束缚态之间(bound-to-bound, BTB)、束缚态到连续态(bound-to-continuum, BTC)和束缚态到准束缚态(bound-to-quasibound, BTQB),如图 1 所示^[1]。

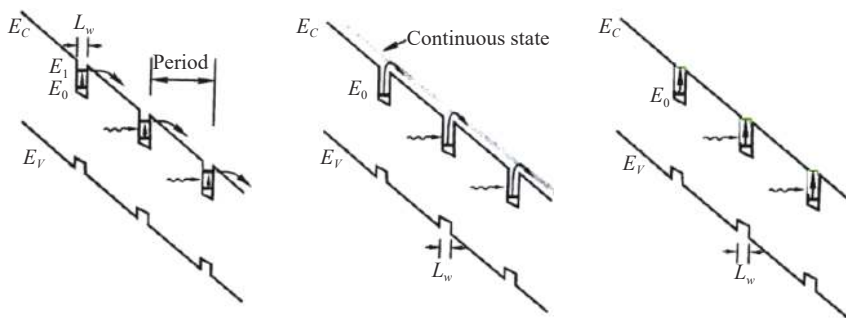


图 1 量子阱中的三种工作模式: BTB, BTC, BTQB 跃迁模式^[1]

Fig.1 Three transition modes in quantum well: BTB, BTC and BTQB, respectively^[1]

束缚态到束缚态的子带跃迁: 电子从基态跃迁到同一量子阱中的第一激发态,在外加电压下隧穿过势垒并形成光电流。

束缚态到连续态的子带跃迁: 量子阱中仅有一个基态,电子受到光激发后跃迁到连续态,不需要隧穿就可以形成光电流,所以需要的外加偏压大大减小。

束缚态到准束缚态的子带跃迁: 电子受激后,跃

迁到位于量子阱口的第一激发态,降低热激发的影响从而降低暗电流。

暗电流指的是没有接受红外辐照状态下探测器内部的电流,目前人们认为量子阱红外探测器的暗电流主要由热电子发射、热辅助隧穿和载流子隧穿组成。其中热电子发射是电子受到热激发形成的电流,与温度密切相关。而在低温下,热电子发射的电流可

忽略不计,此时隧穿电流成为暗电流的主要部分。当量子阱势垒之间足够宽,可以避免隧穿电流。在这两种条件之间,当热激发电子没有跃迁到连续态,而是阱内的状态,在外电场作用下隧穿过势垒,这就是热辅助隧穿引起的暗电流。以上是量子阱红外探测器暗电流的主要部分,对于量子阱红外探测器,如何进一步降低暗电流是目前研究的一个主要方向。

根据量子力学跃迁选择定则,只有电场分量沿着量子阱生长方向的入射光才能被吸收,所以垂直入射光不能直接产生光电响应,需要采用适当的光耦合。目前主流的耦合方式有边耦合、一维光栅耦合、二维光栅耦合、随机反射耦合和波纹耦合等方式。由于量子阱红外探测器的量子效率偏低,为了显著提高量子效率,一些电磁共振的耦合方式也被采用。总之,研究 QWIP 的光耦合机理不断提升其光耦合效率具有十分重要的意义^[1-3]。

2 局域光场增强的量子阱红外探测器相关研究

表面等离子激元 (SPP) 是一种在金属和电介质之间传播的电磁波。当电磁波入射至金属和电介质表面时,只要电磁波频率和金属表面自由电子集体振荡的频率相同,就会产生共振,形成一种电磁模式,即电磁场在金属表面小范围内增强,称为表面等离子激元现象。表面等离子激元已经在光电子学领域展现出巨大的应用潜力,解决了诸多光电子学难题。

在过去的 30 年里,红外光电探测器经历了快速发展。根据子带间跃迁 (ISBT) 的极化选择规则^[1],对于 n 型量子阱红外探测器,仅当辐射电场的分量垂直于量子阱层时,才可能吸收红外光。为了将入射光耦合到量子阱,人们提出了一些有效的光学耦合方案,例如布鲁斯特角耦合和边耦合。红外探测器的大多数应用与使用小像素和大面积焦平面阵列 (FPA) 的成像有关。对于焦平面阵列,平面设备的几何形状和面积正常照明至关重要。因此,需要使用其他一些方法来控制量子阱层中的光吸收。包括线性光栅、二维周期光栅、双周期光栅、随机光栅和波纹结构在内的几种不同的光栅结构已证明可以有效地耦合到量

子阱红外探测器,从而有效实现了子带间吸收。

表面等离子激元光栅 (SPP 光栅) 的研究始于 Ebbesen 等人发现的增强透射 (Enhanced Optical Transmission, EOT) 现象。1998 年 Ebbesen 等人^[2]首次发现当光入射到孔阵列的金属薄膜上时,其光学透射效率比传统透射效率高一两个数量级。在大多数量子阱红外探测器的中红外和长红外响应波长范围,表面等离子激元在金属中的穿透深度都很小。因此,它的光损耗极低。

2.1 表面等激元增强的高探测率量子阱红外探测器

研究人员将表面等离子激元效应应用在量子阱红外探测器中^[3],表面等离子激元可以与电子子带间跃迁发生共振,并有效激发量子阱中的载流子,从而产生强大的光电流^[4]。器件设计成如图 2 所示的结构,利用金属有机化学气相沉积法在 (001) 的 InP 衬底上生长量子阱层,包括 8 个周期的 5.6 nm 厚 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 量子阱层 (掺杂 $2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) 和 50 nm 厚未掺杂的 InP 量子势垒。量子阱像三明治般夹在两个高掺杂的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 层中,厚度为 40 nm 和 500 nm。

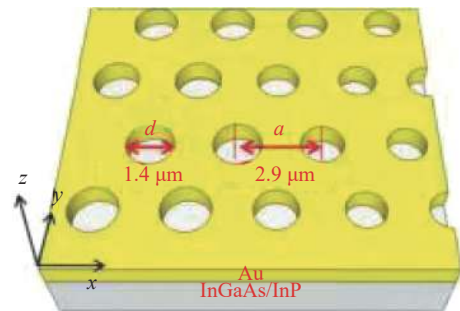


图 2 表面等离子激元增强的量子阱红外探测器结构示意图^[3]

Fig.2 Structure of QWIP enhanced by surface plasmon^[3]

在器件表面加上一层金属空阵列光栅,可以激发表面等离子激元效应,选取孔洞的直径为 $1.4 \mu\text{m}$,阵列周期为 $2.9 \mu\text{m}$ 。运用三维时域有限差分的方法模拟出量子阱区域内有很强的 E_z 分量,如图 3 所示。

通过二维金属孔阵列光栅的有效耦合,使得器件在 78 K、0.7 V 的条件下获得高达 7 A/W 的峰值波长响应率,以及 $7.4 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ 的探测器,远高于传统量子阱红外探测器。

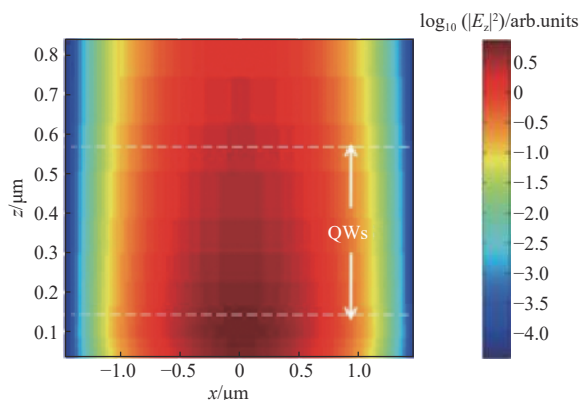


图 3 E_z 在量子阱区域分布^[3]

Fig.3 Distribution of E_z in quantum well region^[3]

2.2 基于周期性金条纹与金膜重叠的混合结构的量子阱红外探测器的增强红外吸收

对于表面等离子激元结构,由于在金属两侧分别是半导体材料和空气,两个表面的等离子体共振频率不同,从而降低了透射率^[5-6]。因此,研究人员设计了一种由周期性金条纹和覆盖金膜组成的混合结构^[6]。对于背入射的量子阱红外探测器,当表面覆盖金膜时,可以防止入射光直接穿过设备而不发生红外吸收。对于金属条纹光栅,可以激发表面等离子激元效应,增强量子阱区域内的电场,并且入射光也可以和覆盖的金膜激发相同的效应,这些效应耦合在一起,更加增强了量子阱区域对于红外光的吸收。而且这种光耦合结构更易于制备,更适于焦平面探测器。

该器件生长在厚度为 625 μm 厚的半绝缘 GaAs 衬底上。顶部接触区和底部接触区分别是厚度为 0.8 μm 和 1 μm 的 GaAs 层。量子阱活跃区厚度为 1128 nm,包括 500 \AA (1 \AA =0.1 nm) 的 $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$ 的势垒和 10 \AA 的 GaAs 多量子阱层,共 20 个周期,结构如图 4 所示。

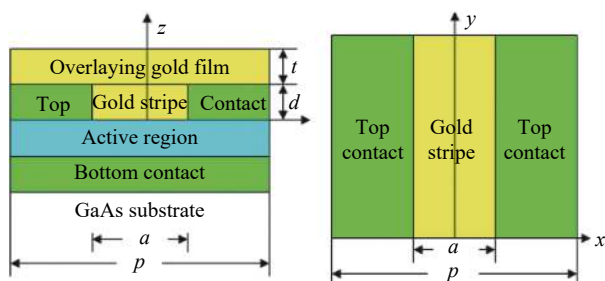


图 4 周期性金条纹与金膜重叠的混合结构器件结构图^[6]

Fig.4 Structure diagram of hybrid structure device with periodic gold stripe and overlaying gold film^[6]

覆盖有金膜的周期性金条纹集成在量子阱的顶部。覆盖的金膜足够厚,可以防止光透射通过金属混合结构。金条的周期、深度和宽度分别为 p 、 d 和 a 。顶部触点的厚度减小到金条的深度 (d),以使量子阱红外探测器的有源区位于金条表面的正下方。研究人员通过优化 p 、 d 和 a ,使得量子阱红外探测器工作在 4.3 μm 处。取 $p=1.26 \mu\text{m}$, $a=1.16 \mu\text{m}$, $d=100 \text{ nm}$,观察到反射光谱中在 4.3 μm 波长处有最小的反射率,因此器件在此波长处工作最佳,满足了笔者的需求。覆盖的金层不允许光透射,因此 97% 的入射能量被吸收。研究人员通过电磁仿真,利用 FDTD 算法,发现该结构下量子阱区域的 E_z 强度是二维金属光栅的 10 倍左右。

在研究过程中发现,当保持光栅的周期不变时,如果增加深度 (d),则反射倾角会偏移到更长的波段,而减小金条纹的宽度 (a) 时,谐振波长会发生红移。表面等离子激元效应会随着金条纹光栅的结构发生改变,为了使得该结构的等离子共振波长与量子阱红外探测器的工作波长保持一致,需要细致地选择金条纹光栅的参数,使得工作波长处的保持增强最大化。

图 5 给出了入射波长为 4.3 μm , $p=1.26 \mu\text{m}$, $a=1.16 \mu\text{m}$, $d=100 \text{ nm}$ 时,耦合效率随入射角的关系,耦合效率在较小的入射角内迅速降低。耦合效率的角度依赖性表明上述仿真结构适合于 FPA 的应用。通常,应该避免入射光的倾斜角度,因为倾斜的入射光束可能被不同的像素检测到并且可能引起串扰。当入射角小于 51° 时,可以确保在量子阱红外探测器的工作波长处的高耦合效率。

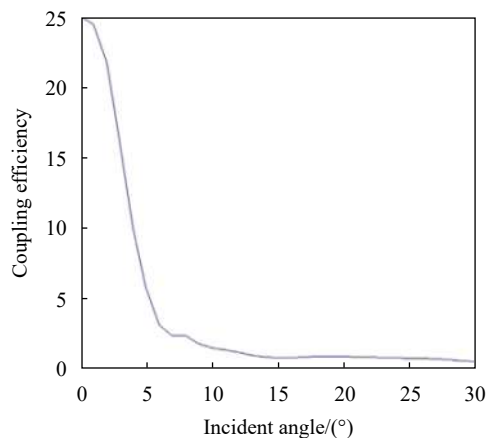


图 5 入射角度和耦合效率的关系^[6]

Fig.5 Relationship between incident angle and coupling efficiency^[6]

总之,为了增强量子阱红外光电探测器的红外吸收,通过甄选耦合结构参数,可以在量子阱红外探测器的工作波长附近激发出表面等离子激元模式。改变每个金条纹的宽度和深度以及混合金属光栅结构的周期可以改变等离子体共振波长。当条纹相对较宽和较薄时可以获得增强的耦合效率,可提升量子阱红外探测器的光吸收性能。

2.3 波长可调的表面等离子激元增强的量子阱红外探测器

通过金属光栅来进行表面等离子激元耦合提升探测器性能是近年来研究的重点。通过各种光栅并且优化光栅参数,使量子阱红外探测器的光响应率不断提高。在其他方面,有研究人员研究了探测波长可调谐的表面等离子激元耦合量子阱红外探测器^[7]。通过改变量子阱红外探测器的顶部接触层,以调整探测器的峰值波长。这为人们提供了另外一种设计制备对不同波长敏感的焦平面阵列的方法^[8]。

器件结构如图 6 所示,顶部和底部接触层分别为 1 μm 和 0.8 μm,量子阱有源区为 35 个周期的 Al_{0.26}Ga_{0.74}As/GaAs 量子阱组成,每个阱宽 4.5 nm。在器件顶部有一个 200 μm×200 μm 的区域,通过二维金属光栅来进行表面等离子激元耦合,光栅厚度 25 nm,孔的直径为 1.6 μm。

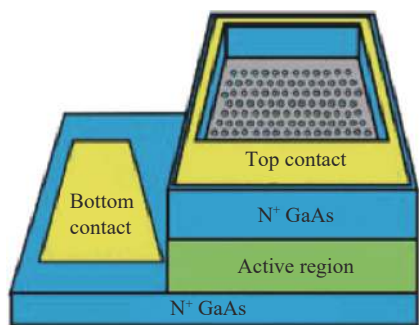


图 6 波长可调的表面等离子激元增强的量子阱红外探测器结构^[7]

Fig.6 Structure of wavelength tunable surface plasmon enhanced quantum well infrared detector^[7]

对于不同厚度顶部接触层的器件,将顶部接触厚度分别设置为 50、200、500、700、1000 nm,并分别测量它们的伏安特性和响应光谱。在 77 K,偏置电压为 -1 V 时,暗电流密度约 1×10^{-5} A/cm²,远小于典型量子阱红外探测器的暗电流^[3]。通过对比该器件和普通刻蚀光栅在相同条件下的响应曲线,可以明显得到表

面等离子激元对于器件性能的增强效果,大概是普通刻蚀光栅的三倍^[9-11]。

接着测量不同厚度顶部接触层的光谱响应,随着厚度的增加,响应的峰值波长会减小,实验中当从 50 nm 变为 1000 nm 时,峰值波长从 8.53 μm 变为 8.28 μm。这是由于表面等离子激元电磁波场贯穿了整个器件结构,当顶部接触层减小时,表面等离子激元在量子阱有源区穿透程度增加,由于量子阱区域掺杂浓度低,使得有效的介电常数增加,所以峰值波长也会增加。

对于这 5 个不同厚度的器件,在偏置电压为 -2 V,温度为 77 K 时,50 nm 厚的顶层能获得最大的探测率,为 5.6×10^{10} cm·Hz^{1/2}/W,最低的探测率对应于 700 nm,为 3.6×10^{10} cm·Hz^{1/2}/W,均大于传统的量子阱红外探测器。所以通过改变顶部接触层厚度,可以调节波长,在不改变量子阱的参数情况下,与表面等离子激元相匹配,还可以将对不同波长域敏感的元件集成在同一个区域内,大大提高了器件的集成度。同时,表面等离子激元还可以提升探测器的性能,所以上述探测器具有非常完美的功能。

2.4 长程表面等离子激元耦合增强量子阱红外探测器

SPP 在介质-金属-介质层中,会激发独特的性质。当金属层很厚时,金属与介质层两端产生的 SPP 相互独立,互不影响,若金属层变薄时,两个 SPP 就会相互耦合。当 SPP 的能量更多的从金属转移到介质中时,损耗会降低,展示出更深的穿透强度,称之为长程表面等离子激元耦合(LRSPP)^[12]。王帅等人通过引入 LRSPP 来减小金属对 SPP 的吸收损耗,进而增加了量子阱区域电场分量 E_z ,使得光耦合效率增加^[13-14]。

首先,介质-金属-介质的对称结构会激发 LRSPP,所以选择 Si₃N₄ 作为折射率匹配层,并构建二维光栅,其中方孔边长和阵列周期为 1 μm 和 2 μm,量子阱红外探测器的材料为 Al_{0.35}Ga_{0.65}N,器件结构见图 7。

图 8 给出不同厚度的 Si₃N₄ 层,量子阱区域的 E_z 光谱。可以看到,只有一个金属光栅的 E_z 强度比覆盖有 Si₃N₄ 层的 E_z 强度要低的多。从图中可以看出 500~700 nm 厚度的 Si₃N₄ 可以带来较大的 E_z 分量,但是在波长为 3.3 μm 处,有一个较强的干扰峰,这会影响到量子阱红外探测器的性能,如果选取 500 nm 厚度的 Si₃N₄ 层,则会通过薄膜干涉效应,完美的消除

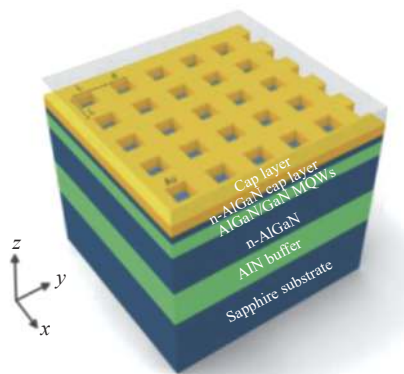


图 7 长程表面等离激元耦合增强量子阱红外探测器^[13]

Fig.7 Long range surface plasmon coupling enhanced quantum well infrared detector^[13]

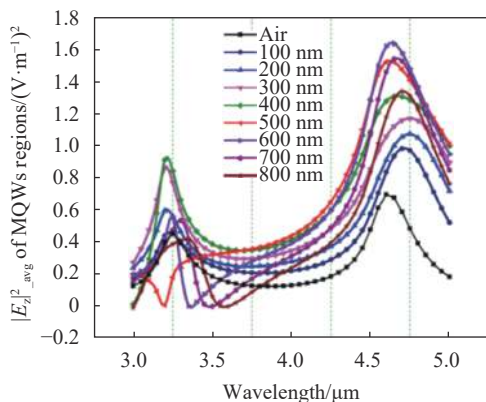


图 8 不同厚度的 Si₃N₄ 量子阱区域中 E_z 的分布光谱^[13]

Fig.8 Distribution spectra of E_z in Si₃N₄ quantum well region with different thicknesses^[13]

在 3.3 μm 的 (±1, ±1) 等离子模式激发的共振峰, 避免对器件性能的影响。因此研究 500 nm 厚度的 Si₃N₄ 层对器件的影响是有意义的。

在入射波长为 4.65 μm, 厚度为 500 nm 时, 电场分量 E_z 分布的纵向深度很深, 且衰减的很慢, E_z 呈对称分布, 而电流密度 J_z 呈不对称分布, 也证明了 LRSPP 的存在。图 9 展示了裸光栅和加有 500 nm 厚的 Si₃N₄ 层器件的对比, 其中图 (a) 是仅有裸光栅, 图 (b) 是带有 500 nm 厚的 Si₃N₄ 层。

为证明 500 nm 厚度具有 LRSPP, 分别测试了 0、200、800 nm 厚度的 E_z 电场分量, 并没有出现同 500 nm 厚度的现象, 这可能是因为在 Si₃N₄ 层厚度为 0 (无 Si₃N₄ 层) 时, 器件上层为空气, 折射率与量子阱层不匹配, 无法形成介质-金属-介质的对称结构。当 Si₃N₄ 层厚度为 200 nm 时, 此时相对于介质-金属-介

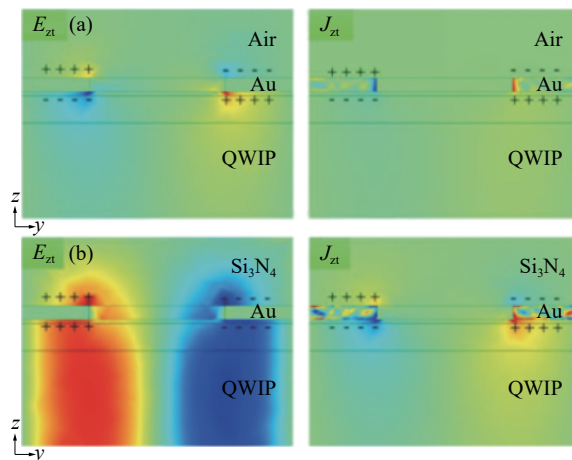


图 9 500 nm 厚的 Si₃N₄ 层下量子阱区域内 E_z 和 J_z 分布^[13]

Fig.9 Distribution of E_z and J_z in the quantum well region under the 500 nm thick Si₃N₄ layer^[13]

质整体结构来说, 金属的厚度可能还没有减小到能激发 LRSPP 的条件, 所以没有产生 LRSPP 效应。当 Si₃N₄ 层厚度为 800 nm 时, 由于过厚的 Si₃N₄ 层增加了反射, 所以可能导致激发 LRSPP 条件不足。又模拟了线偏振光、圆偏振光和椭圆偏振光在 500 nm 厚度下的电场分量, 也出现了 LRSPP, 实验和理论两方面的证明了 500 nm 厚度的 Si₃N₄ 具有普适性, 且对光源的偏振不敏感。这种耦合方法相比于金属光栅, 可使量子阱区域的电场分量 |E_z|² 有更明显的提升, 达到 1.51 (V/m)², 其光耦合效率提升 2.3 倍。这不仅仅是 Si₃N₄/Au/AlGaIn 的非对称结构使得在入射波为 4.65 μm 时产生 LRSPP, 同时 Si₃N₄ 减弱了金光栅的反射率。所以通过改进表面等离激元耦合方式增强光耦合效率, 仍是目前研究的重要方向。

2.5 波导共振增强的量子阱红外探测器

作为第三代红外探测器, 量子阱红外探测器已经形成比较成熟的技术。由于在焦平面阵列的应用中, 需要正入射及平面设备, 所以量子阱红外探测器需要光栅将入射光耦合到量子阱层中, 这增加了焦平面探测器的制备工艺。目前, 一维和二维金属光栅已可以集成在量子阱层的顶部, 入射光子和金属相互作用激发表面等离激元来增强局部电场分量。为了充分利用这一近场耦合效应, 需要减小顶部盖层的厚度来使量子阱区域和光栅距离更近, 但与此同时也增加了器件的制备难度。而且在这种受限的谐振模式下, 金属光栅中的吸收是不可避免的, 这带来了散热问题, 并

且对光电流没有贡献。由于金属光栅边缘上的局部表面等离子体激元 (LSP), 吸收的能量也会被部分分散^[15]。

针对这些问题, 一种新型的光耦合方案被提出^[16]。该器件基于 GaAs/AlGaAs 系统的量子阱红外探测器, 在 GaAs 衬底上生长器件, GaAs 缓冲层和 Al_{0.45}Ga_{0.55}As 蚀刻停止层都为 300 nm 厚, 厚度为 1300 nm 的顶部接触层和厚度为 1200 nm 的底部接触层均掺杂 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的 Si。量子阱有源区厚度为 2480 nm, 其中有 50 个 5.8 nm 的阱和 51 个 50 nm 的 Al_{0.18}Ga_{0.82}As 势垒层交替。如图 10 所示, 金条的周期为 p , 宽度和厚度分别定义为 w 和 t , 顶部接触层为 $d_t=1.3 \mu\text{m}$, 量子阱有源区为 $d_a=2.84 \mu\text{m}$, 底部接触层为 $d_b=1.2 \mu\text{m}$ 。器件通过 p 极化电磁波沿 z 轴正方向照射, 电场沿 x 轴为 $E_0=1 \text{ V/m}$, 金条排列方向是周期性的。

将典型的表面等离子激元量子阱红外探测器和以上的基于波导共振的量子阱红外探测器进行对比, 两种量子阱红外探测器分别比传统的典型量子阱红外探测器子带吸收高 3.5 倍和 6 倍。通过以下两图可以看出两种器件的 E_z 分布。

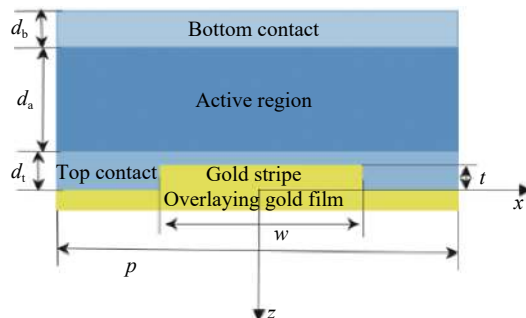


图 10 波导共振增强的量子阱红外探测器^[16]

Fig.10 Waveguide resonance enhanced quantum well infrared detector^[16]

图 11(a) 表示表面等离子激元量子阱红外探测器的 E_z 随着距离金属表面距离的增加而呈指数衰减。图 11(b) 是基于波导共振的量子阱红外探测器的 E_z 分布, 垂直电场主要是分布在有源区域中而不是金属的表面。垂直入射光被周期性的金条纹衍射, 传播方向发生了改变。绿色的框表示空气和半导体层中的衍射光被全反射回半导体层。 E_z 的分布具有驻波特征, 表明由于横向衍射和反射光的相长干涉而形成了波导谐振。当在金属、半导体和空气形成的波导中振荡时, 光子被多个量子阱有效吸收。

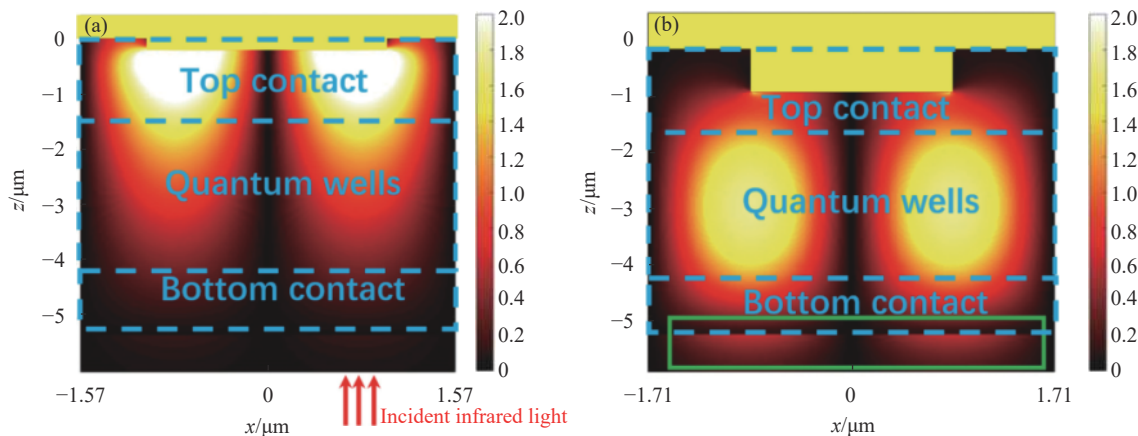


图 11 传统量子阱红外探测器和波导共振增强的量子阱红外探测器量子阱区域内的 E_z 分布^[16]

Fig.11 E_z distribution of conventional QWIP and waveguide resonance enhanced QWIP^[16]

基于波导共振的 QWIP 量子阱占吸收的主导地位, 而在表面等离子激元 QWIP 中, 金属吸收占相当大的百分比, 这也是表面等离子激元增强比波导共振增强要弱的原因。总之, 基于波导共振的 QWIP 比表面等离子激元增强的 QWIP 具有更高的子带吸收, 较弱的金属吸收且热量减少。而且, 对结构参数精度要求更加

宽松, 器件制备更加容易, 这些优点在 QWIP 的实际应用中有巨大的潜力^[17]。

2.6 导模共振集成量子阱红外探测器研究

研究人员致力于不断设计更优异的 QWIP 光耦合结构。对于传统的结构, 因为金属表面等离子激元结构会造成的欧姆损耗, 限制了量子阱材料对入射光的

吸收,降低耦合效率^[18-20]。有鉴于此,余昊楠等人设计了一种基于全介质结构导模共振增强量子阱红外探测器性能的方法,在 7.5~9.0 μm 波谱范围利用导模共振,使得量子阱活跃区形成波导模式和光场局域,可以实现对入射光至少 95% 的吸收,远大于表面等离子激元的增强,极大地增强了探测器的响应性能^[21]。

该器件的结构如图 12 所示,从上到下分别为一维的 GaAs 光栅、上电极、20 个周期的 GaAs/ $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 层以及下电极和低折射率的蓝宝石衬底。光栅的周期为 5.6 μm , 宽度 4.2 μm , 高度 2.0 μm , 每个周期有 4.5 nm 的 GaAs 和 45 nm 的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, 上电极、下电极的高度分别为 500 nm 和 665 nm, 由掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 n 型 GaAs 材料组成。当光入射后,由于蓝宝石衬底具有低折射率,会在量子阱层形成波导模式。

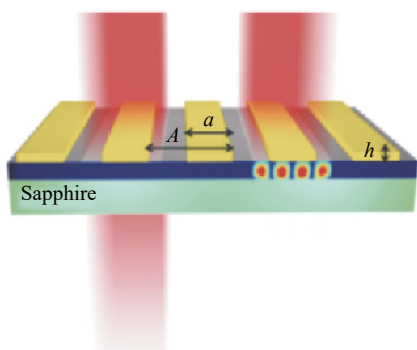


图 12 导模共振集成量子阱红外探测器结构示意图^[21]

Fig.12 Structure of guided mode resonance integrated quantum well infrared detector^[21]

由于顶层利用了介质光栅,就会避免了金属光栅所引起的吸收损耗。从图 13 可以看出吸收率在 8.37 μm 处达到最高,大约是表面等离子激元器件的三倍左右。

导模共振集成量子阱红外探测器的 $|E_z|^2$ 增强在量子阱区域的中心位置,通过调节光栅周期,可以调节量子阱红外探测器的共振位置。光栅周期增大,则共振波长增大。而表面等离子激元则会从金半接触面开始衰减,所以表面等离子激元增强量子阱红外探测器的量子阱激活区域必须离金属材料比较近,这对工艺技术来说比较麻烦。对于导模共振集成量子阱红外探测器,光耦合效率远远高于 45° 角入射的光耦合效率。

图 14 给出在波长 8.37 μm 处,该量子阱红外探测

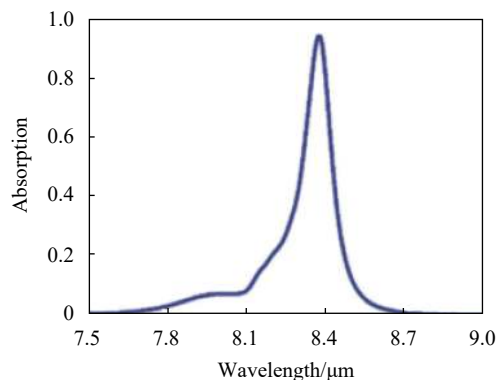


图 13 导模共振集成量子阱红外探测器吸收光谱^[21]

Fig.13 Absorption spectrum of guided mode resonance integrated quantum well infrared detector^[21]

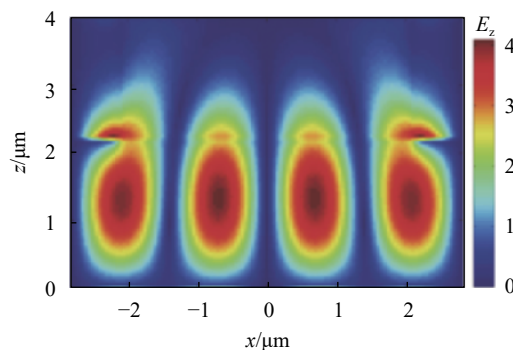


图 14 量子阱中心区域内 E_z 分布^[21]

Fig.14 Distribution of E_z in the central region of quantum well^[21]

器的 E_z 的增强位于量子阱区域的中心位置,相比于金属光栅增强的量子阱红外探测器,由于表面等离子激元激发的电场增强是不断衰减的,因此量子阱区域需要和金属光栅贴合的很近,这在工艺制备上并不方便。

总之,这种通过介质光栅代替金属光栅,形成导膜共振,不仅可以增强光电转换效率,还可以防止由于金属所带来的介电损耗,还能降低器件工艺难度,是未来光耦合器件研制的新方向。

3 横向偏置的量子阱红外探测器 (LBQWIP)

量子阱红外探测器被应用于大规模的焦平面阵列中,但是当其工作在较高的温度时,就会表现出很大的暗电流,所以须在 77 K 下进行工作。这样使得探测设备体积庞大,不适合作为移动的设备进行工作。虽然已经有量子点和量子级联红外探测器可以在室温下进行工作,但量子阱红外探测器更为成熟的

材料体系,使得研究人员更加青睐于研究室温下工作的量子阱红外探测器。

为了进一步降低暗电流,阿尔辛等人提出了一种横向偏置的量子阱红外探测器,阿尔瓦罗·古兹曼等人进行了持续改进^[22]。这个器件由两个量子阱组成,且两个量子阱之间足够靠近进行生长,其中一个量子阱是 n 掺杂的,另一个量子阱是未掺杂的。对于一般的量子阱红外探测器,电极一般安装在器件的上下层,平行于量子阱生长的方向。但在该器件中,电极垂直于量子阱材料的生长方向,原理如图 15 所示。首先掺杂的量子阱进行光激发,然后被激发的载流子通过隧穿来到未掺杂的量子阱中,最后通过两个横向放置的电极进行光电流的收集^[23]。

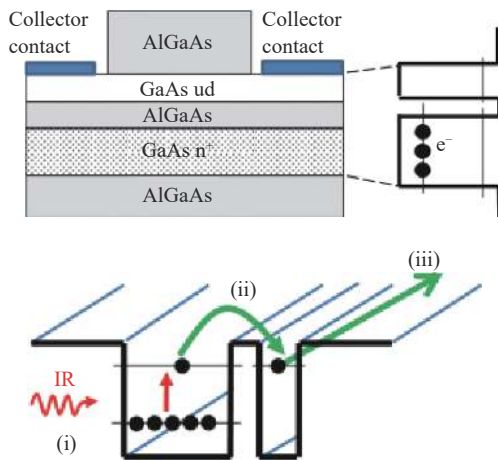


图 15 横向偏置的量子阱红外探测器原理图^[22]

Fig.15 Schematic diagram of laterally biased structures for quantum well infrared detector^[22]

由于两个量子阱间距较小,仅为 10 nm,所以制作电极难度很大。为了防止掺杂的量子阱中载流子直接被电极收集,一般情况下都会加一个第三电极来创建一个耗尽层来阻止。

器件的制备首先通过分子束外延 (MBE) 将样品生长在未掺杂的 GaAs(100) 上,在 580 °C 下进行氧化物脱附后,将衬底在 600 °C 脱气 15 min。随后,610 °C 温度下在衬底上生长 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 结构,其中掺杂的量子阱浓度为 2×10¹⁸ cm⁻³。通过反射高能电子衍射 (RHEED) 监测 MBE 的生长。通过测量 RHEED 图案的强度振荡的周期来校准生长速率。此外,通过室温光致发光光谱法评估了材料的光学质量。结构如图 16 所示。图中,两个电极之间的直接传导被第

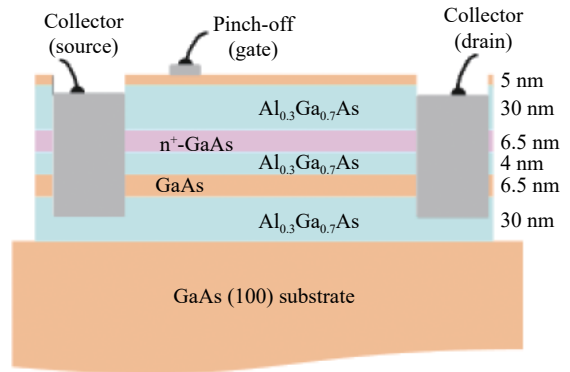


图 16 横向偏置的量子阱红外探测器器件结构^[22]

Fig.16 Structure of laterally biased structures for quantum well infrared detector^[22]

三个电极产生的场致势垒夹断,类似于场效应晶体管。其中两个阱厚度为 6.5 nm,势垒厚度为 4 nm,夹在两个 30 nm 的 AlGaAs 层中,顶部是一层 5 nm 的 GaAs 层防止氧化。

通过对比标准的 QWIP 和上述 LBQWIP,可以发现,当温度高于 100 K 时,标准的 QWIP 就表现出了较大的暗电流。在 300 K 的条件下,LBQWIP 比标准的 QWIP 暗电流低两个数量级。只有外加电压超过 1 V, LBQWIP 才会表现出明显的暗电流特性。随后又在 300 K 下测量了 LBQWIP 的光谱响应。选取偏置电压为 1.2 V,并通过时域有限差分方法进行模拟仿真,仿真中基态和第一激发态的跃迁能力对应于波长为 8.3 μm,与实验测得的光谱响应峰值波长 8.25 μm 相对应,因此可以在室温下进行光谱响应的测量,如图 17 所示。

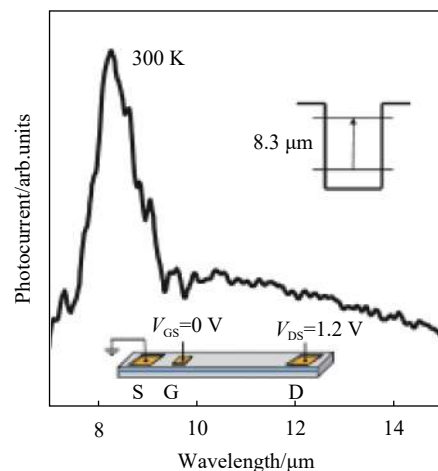


图 17 LBQWIP 的光谱响应^[22]

Fig.17 Spectral response of LBQWIP^[22]

总之,使收集载流子的电极横向放置在垂直于量子阱材料生长方向,可以有效防止量子阱中载流子的直接传导,并通过第三个电极形成场致势垒降低掺杂量子阱中的载流子传导,从而有效降低器件暗电流,保证器件在室温下也可测量光响应,因此提升了探测器的工作温度。器件在室温下显示出了高电阻特性和清晰的吸收峰,且数值模拟与实验结果相吻合,对于成熟的 GaAs/AlGaAs 量子阱材料系统,横向偏置的量子阱红外探测器会成为发展室温下红外探测器的一个研究方向。

4 隧道补偿多量子阱红外探测器

量子阱红外探测器的原理决定了器件的光电流基本上与量子阱的个数无关,流过多量子阱的总电流是一定的,增加量子阱个数并不能显著增加光电流,这就限制了探测器的性能^[24]。为了增加 QWIP 的光电流,邓军等人提出了隧道补偿量子阱红外探测器,其原理如图 18 所示^[25]。N⁺-GaAs 为势阱,当载流子激发后,空量子态被隧穿电子填充从而降低了光电流的复合,因此随着量子阱数量的增加,光电流也增加。

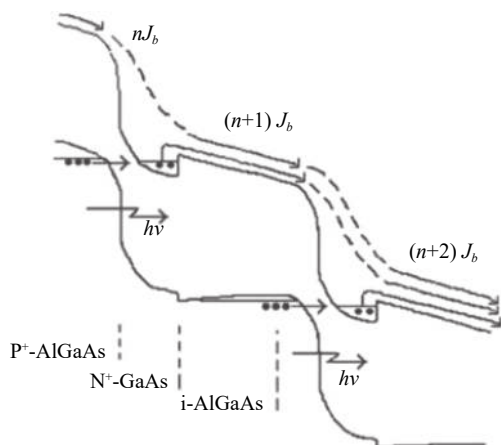


图 18 隧道补偿量子阱红外探测器原理图^[25]

Fig.18 Schematic diagram of tunnel compensated quantum well infrared detector^[25]

但是,材料的掺杂浓度难以精确控制,量子阱的实际等效宽度与掺杂浓度有关,当掺杂浓度降低会使阱的等效宽度减小,从而影响探测器的探测波长,偏离探测器设计初衷,这样的问题使得制造工艺变的困难。因此李超慧等人提出了一种新型的结构,其原理如图 19 所示。在重掺杂的 PN 结和 i-AlGaAs 本征势

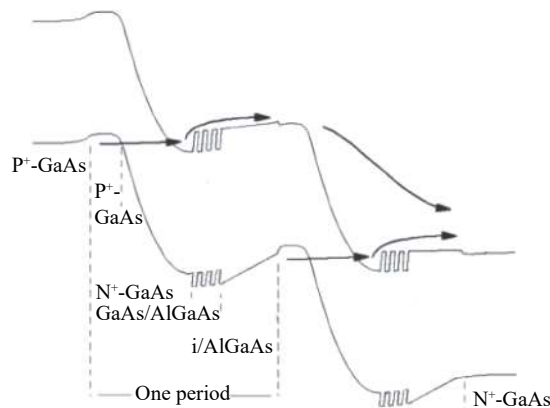


图 19 隧道补偿量子阱探测器新结构^[26]

Fig.19 New structure of tunnel compensated quantum well detector^[26]

垒层之间插入超晶格结构作为红外吸收区域,借此将量子阱和耗尽区分开,使得量子阱的等效宽度不受掺杂浓度的影响,材料生长难度大大降低。在适当的反向偏压下,超晶格的基态电子吸收光子,在电场作用下跃迁到激发态并跨越势垒。光电子在下一个周期的 PN 结内建势场中加速,高速通过下一个超晶格红外吸收区。同时,从 p-GaAs 价带的隧穿电子将填入超晶格基态的空量子态,降低光电子的复合概率^[26]。

根据转移矩阵法计算出器件的吸收波段在 7.48~8.93 μm,与实验的峰值响应 7.73 μm 相符合。测试表明,该器件的最佳工作电压为 1.1 V,暗电流为 2.99×10⁻⁸ A,黑体探测能力为在 77 K 下为 1.352×10⁸ cm·Hz^{1/2}/W。总之,通过这种隧道补偿的多量子阱红外探测器可显著提高光电流,上述器件只有两个周期量子阱,适当增加量子阱周期数将会进一步提升器件光电流。

5 总结与展望

随着红外探测技术的进步和发展,量子阱红外探测器将进一步提升其在军事国防和民用领域层面的应用,提升的程度主要取决于量子阱红外探测器在光耦合效率、降低暗电流方面的技术进步。文中就量子阱红外探测器技术发展趋势着重介绍了近 5 年的最新研究进展,从设计不同的局域光场增强结构来提升量子阱红外探测器光电耦合效率到运用新工作原理降低器件暗电流提升器件探测率等方面,比较系统地展示了量子阱红外探测器最近 5 年来的技术发展轨迹。尽管人们已经针对量子阱探测器的不同探测波

段设计了相应的局域增强光耦合结构,但仍存在许多需要进一步研究解决的问题。诸如,在激发金属表面等离子体时会产生介电损耗,在更长红外波段量子阱红外探测器的光响应率仍然偏低且需要在深低温下工作等。基于器件的实际工程应用,局域光场增强的双色及多色量子阱红外探测器也需要进一步研究。还有如何进一步有效降低器件暗电流、提升器件工作温度依然是量子阱探测器优化设计的关键问题。未来需要寻找新材料并优化设计新的局域光场增强结构,例如遴选合适电介质材料来降低损耗,或者设计可在多频带工作的材料制备分形光栅结构来提升双色及多色量子阱红外探测器光耦合效率。在量子阱红外探测器最近五年的研究进展中,各类局域光场增强技术都表现出其自身独特优点及局限。在未来的器件研究中,应当大力整合各种前沿技术。量子阱红外探测器的技术力,必须结合成完整的体系才有意义。高性能的量子阱红外探测器不仅仅是单项指标的竞赛,更是多学科技术协调配合的结晶。

参考文献:

- [1] Zhang Dan. Structure and optical properties of GaAs/AlGaAs quantum well materials grown by MBE[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015: 4-5. (in Chinese)
张丹. MBE生长GaAs/AlGaAs量子阱材料结构及其光学性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015: 4-5.
- [2] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays [J]. *Nature*, 1998(391): 667-669.
- [3] Wu W, Bonakdar A, Mohseni H. Plasmonic enhanced quantum well infrared photodetector with high detectivity [J]. *Appl Phys Lett*, 2010(96): 161107.
- [4] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics [J]. *Nature (London)*, 2003(424): 824-830.
- [5] Zhai S Q, Liu J Q, Liu F Q, et al. A normal incident quantum cascade detector enhanced by surface plasmons [J]. *Appl Phys Lett*, 2012(100): 181104.
- [6] Ding Jiayi, Chenn Xiaoshuang, Li Qian, et al. The enhanced infrared absorption of quantum well infrared photodetector based on a hybrid structure of periodic gold stripes overlaid with a gold film [J]. *Optics Communications*, 2014(328): 91-95.
- [7] Hsu W C, Ling H S, Wang S Y, et al. Wavelength tuning of surface plasmon coupled quantum well infrared photodetectors [J]. *Optics Express*, 2018, 26(1): 552-558.
- [8] Hsu W C, Ling H S, Wang S Y, et al. Characteristics of surface plasmon coupled quantum well infrared photodetectors [J]. *J Appl Phys*, 2017, 121(24): 244503.
- [9] Lee S C, Sharma Y D, Krishna S, et al. Leaky-mode effects in plasmonic-coupled quantum dot infrared photodetectors [J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 100(1): 011110.
- [10] Wilson D W. Electromagnetic modeling of multi-wavelength QWIP optical coupling structures [J]. *Infrared Phys Technol*, 2009, 52(6): 224-228.
- [11] Chang J C, Yang Z P, Huang D, et al. Strong light concentration at the subwavelength scale by a metallic hole-array structure [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(1): 106-108.
- [12] Berini P. Long-range surface plasmon polaritons [J]. *Advances in Optics & Photonics*, 2009, 1(1): 484-588.
- [13] Wang S, Zhang J, Wu F, et al. Long-range surface plasmon polaritons for efficient optical coupling in AlGaIn/GaN quantum well infrared photodetector [J]. *Plasmonics*, 2016(11): 833-838.
- [14] Wang W, Zhao D, Chen Y T, et al. Grating-assisted enhanced optical transmission through a seamless gold film [J]. *Opt Express*, 2014(22): 5416-5421.
- [15] Jing Y L, Li Z F, Li Q, et al. Pixel-level plasmonic microcavity infrared photodetector [J]. *Sci Rep*, 2016(6): 25849.
- [16] Zheng Yuanliao, Chen Pingping, Ding Jiayi, et al. High intersubband absorption in long-wave quantum well infrared photodetector based on waveguide resonance [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018(51): 1361-6463.
- [17] Liu L, Chen Y, Huang Z, et al. Highly efficient metallic optical incouplers for quantum well infrared photodetectors [J]. *Sci Rep*, 2016(6): 30414.
- [18] Liu X, Fan K, Shadrivov IV, et al. Experimental realization of a terahertz all-dielectric metasurface absorber [J]. *Opt Express*, 2017(25): 191-201.
- [19] Yesilkoy Filiz, Arvelo E R, Jahani Y, et al. Ultrasensitive hyperspectral imaging and biodetection enabled by dielectric metasurfaces [J]. *Nature Photon*, 2019(13): 390-396.
- [20] Zheludev N I, Kivshar Y S. From metamaterials to metadevices [J]. *Nature Mater*, 2012(11): 917-924.
- [21] 余昊楠, 曹全君, 唐伟伟, 等. 导模共振集成量子阱红外探测器研究[J]. *航空兵器*, 2019, 26(3): 67-71.
- [22] Álvaro Guzmán, Rocío San-Román, Raquel Gargallo-Caballero, et al. Laterally biased quantum-well infrared photodetectors operating at room temperature with low dark currents [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(2): 1-6.

- [23] Alsing P M, Cardimona D A, Huang D H, et al. Advanced space-based detector research at the airforce research laboratory [J]. *Infrared Phys Technol*, 2007(50): 89-94.
- [24] Haran T L, James J C, Lane S E, et al. Quantum efficiency and spatial noise tradeoffs for III-V focal plane arrays [J]. *Infrared Phys Technol*, 2019(97): 309-310.
- [25] Deng J, Shen G D, Lian P, et al. Optoelectronic transport mechanism from subband infrared absorption and tunneling regeneration [J]. *Curr Appl Phys*, 2002(2): 373-378.
- [26] Li Chaohui, Deng Jun, Sun Weiye, et al. Improvement of tunnel compensated quantum well infrared detector [J]. *Journal of Semiconductors*, 2019, 40(12): 1-4.



第一作者简介：刘畅 (1997-)，男，硕士生，2019 年于南通大学获得电子信息工程专业学士学位，目前在华东师范大学通信与电子工程学院攻读微电子学与固体电子学专业硕士学位，主要从事低维 III-V 族半导体红外探测器研究。Email: 51191213023@stu.ecnu.edu.cn



通讯作者简介：熊大元 (1978-)，男，副教授，硕士生导师。2004~2007 年在中国科学院上海技术物理研究所微电子学与固体电子学专业攻读博士学位；2007 年加盟华东师范大学。主要从事微纳电子材料与器件方面的研究，发表 SCI 研究论文 30 余篇。Email: dyxiong@ee.ecnu.edu.cn