

非均匀 GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器材料表征和器件性能研究

苏家平^{1,2}, 周孝好², 唐舟², 范柳燕², 夏顺吉², 陈平平^{2*}, 陈泽中^{1*}

(1. 上海理工大学材料与化学学院, 上海 200093;

2. 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)

摘要: 本文利用分子束外延(MBE)技术成功生长了 GaAs/AlGaAs 非均匀量子阱红外探测器材料, 并对相关微结构作了细致表征。分析比较了非均匀量子阱结构和常规量子阱红外探测器性能差异, 并对比研究了不同势阱宽度下非均匀量子阱红外探测器的性能变化。通过高分辨透射电子显微镜(HRTEM)结合能谱仪(EDS)对非均匀量子阱红外探测器材料微结构进行了分析, 并利用二次离子质谱仪(SIMS)对非均匀势阱掺杂进行了表征。结果表明, 该量子阱外延材料晶体质量很好, 量子阱结构和掺杂浓度也与设计值符合较好。对于非均匀量子阱红外探测器, 通过改变每个阱的掺杂浓度和势垒宽度, 可以改变量子阱电场分布, 而与传统的均匀量子阱红外探测器相比, 其暗电流显著下降(约一个数量级)。在不同阱宽下, 非均匀量子阱的跃迁模式发生改变, 束缚态到准束缚态跃迁模式下(B-QB)的器件具有较高的黑体响应率以及较低的暗电流。

关键词: 非均匀; 量子阱; 高分辨电镜; 二次离子质谱; 暗电流

中图分类号: TN215

文献标识码: A

Study on material characterization and device performance of non-uniform GaAs/AlGaAs quantum well infrared detectors

SU Jia-Ping^{1,2}, ZHOU Xiao-Hao², TANG Zhou², FAN Liu-Yan², XIA Shun-Ji², CHEN Ping-Ping^{2*}, CHEN Ze-Zhong^{1*}

(1. School of Materials and Chemistry, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: In this paper, the GaAs/AlGaAs non-uniform quantum well infrared detector material was successfully grown by molecular beam epitaxy (MBE), and the microstructure was characterized in detail. The performance difference between the non-uniform quantum well structure and the conventional quantum well infrared detector is analyzed and compared, and the performance change of the non-uniform quantum well infrared detector under different well widths is comparatively studied. The microstructure of non-uniform quantum well infrared detector materials was analyzed by high resolution transmission electron microscopy (HRTEM) combined with energy dispersive spectroscopy (EDS), and the non-uniform well doping was characterized by secondary ion mass spectrometry (SIMS). The results show that the crystal quality of the non-uniform quantum well epitaxial material is very good, and the non-uniform quantum well structure and doping concentration are also in good agreement with the design values. The results show that for non-uniform quantum well infrared detectors, the electric field distribution of the quantum well can be modulated by changing the doping concentration and barrier width of each well, and the dark current significantly decreases (by about an order of magnitude), compared with traditional uniform quantum well infrared detectors. Moreover, under different well widths, the transition modes of non-uniform quantum wells can change, and the devices with bound state to quasi-bound state transition modes (B-QB) have better blackbody response and lower dark current.

收稿日期: 2023-04-19, 修回日期: 2023-11-03

Received date: 2023-04-19, Revised date: 2023-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(12027805, 61991444, 11991060)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (12027805, 61991444, 11991060).

作者简介(Biography): 苏家平(1996-), 男, 贵州惠水人, 硕士研究生, 主要研究领域为长波量子阱红外探测器材料MBE生长与器件。

*通讯作者(Corresponding authors): E-mail: ppchen@mail.sitp.ac.cn; zzhchen@usst.edu.cn

Key words: quantum well infrared photodetector, high resolution transmission electron microscope, secondary ion mass spectroscopy, dark current

引言

自 1987 年 Levine 等人首次成功实现了量子阱红外探测器 (Quantum well infrared photodetector, QWIP) 在红外探测领域的应用以来^[1], 在国防军事 (如红外制导及夜视等)^[2-4] 和民用 (如医疗、气象和天文学)^[5-7] 需求不断增长的驱动下, 量子阱红外探测器在过去三十多年取得了巨大进步。量子阱红外探测器是基于子带间跃迁 (ISBT) 工作模式^[8-9] 的第三代红外探测器^[10], 也是长波和甚长波段红外探测领域的候选器件^[11-12]。与碲镉汞 (HgCdTe) 红外探测器^[6, 13-14] 相比, 量子阱红外探测器具有成熟的材料生长和器件制备工艺, 从而使其具有成本低、大面积均匀性好、与复杂工艺兼容性好等优势^[15-16]。器件伏安特性 ($I-V$) 尤其暗电流特性是量子阱红外探测器的一项十分重要的性能参数, 对器件的工作温度和噪声都会产生影响, 进而对器件的探测率产生直接影响^[17]。近些年来, 有研究者提出了非均匀量子阱红外探测器的概念, 为降低暗电流以及提升器件性能提供了可能性^[18]。

量子阱红外探测器基于子带跃迁的工作原理, 探测器吸收红外辐射后激发量子阱中的电子, 使其从基态跃迁到连续态中, 从而实现红外探测。电场分布在该过程中具有重要影响, 可以极大地改变量子阱红外探测器的特性^[19]。在常规量子阱红外探测器结构中, 通常会重复相同的势阱和势垒宽度以及掺杂浓度, 因此吸收区通常被认为是均匀的有源区。然而, 研究者在对量子阱电场模拟时发现, 基于载流子捕获概率和发射概率的自洽模型表明, 量子阱区域中的电场分布不均匀, 前几个势垒中的电场远高于该区域其余部分中的电场^[20-21]。基于量子阱区域中电场不均匀分布的现象, Wang 等人^[18] 在 2000 年提出了非均匀量子阱红外探测器 (Non-uniform quantum well infrared photodetector, NUQWIP) 的构想, 通过单独调整每个 GaAs/AlGaAs 量子阱的势垒宽度, 势阱的掺杂浓度, 从而改变量子阱的电场分布, 使得暗电流大约降低一个数量级, 背景限制温度增加到 77 K。2001 年, Wang 等人^[22] 进一步对非均匀量子阱红外探测器做了更详细的研究。他们制备了不同跃迁类型的非均匀量子阱红外探

测器, 与常规均匀结构相比, 其暗电流约降低一个数量级。2017 年, El-Tokhy 等人^[23] 将非均匀量子器件的研究拓宽到了非均匀量子阱 (QRIP) 领域, 他们研究了暗背景中的量子阱及其在非均匀分布下对红外探测器的影响, 并探索在远红外光电探测器领域, 量子阱和量子线在非均匀性分布下能否减少量子光电探测器的暗电流。

本工作是面向焦平面 (FPA) 非均匀 GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器, 为相关的 10~11 μm 长波焦平面量子阱红外探测器提供基础。非均匀量子阱主要特点是在量子阱中引入非均匀势垒宽度和掺杂浓度, 从而改变能带结构和内部电场分布, 这也为新型光电子器件和半导体器件的设计提供了新思路。目前, 国际上仅有极少数研究者对非均匀量子阱红外探测器进行了电学性能方面的研究, 但没有系统性地对非均匀结构的分子束外延微结构进行表征分析。本文通过高分辨透射电子显微镜 (HRTEM) 结合能谱仪 (EDS) 对非均匀外延结构进行了详细的分析, 并利用二次离子质谱仪 (SIMS) 对非均匀势阱掺杂进行了表征。然后, 我们制备了单元量子阱红外探测器, 并比较了非均匀结构和常规结构器件的光电特性, 以及不同阱宽非均匀量子阱的器件性能, 为研制高性能焦平面量子阱红外探测器提供基础。

1 实验

本文样品利用法国 Riber 公司 Compact-21 型分子束外延 (MBE) 系统, 在 3 inch (100) 半绝缘 GaAs 衬底上生长 GaAs/AlGaAs 量子阱结构。该 MBE 系统配备有单控温区 Al 束源炉, 双控温区 Ga 束源炉, 以及阀控 As 裂解炉。如表 1 所示, 本次实验生长了两种结构共 4 片样品, 其中样品 A、B 和 C 为非均匀量子阱结构, 样品 D 为常规的量子阱结构。

如表 2 所示, 对于非均匀量子阱结构 (样品 A、B 和 C), 使用 20 个周期的 GaAs/Al_{0.18}Ga_{0.82}As 量子阱作为有源区, 量子阱的宽度分别为 6.1 nm、6.3 nm 和 6.5 nm, 每个势阱的 Si 掺杂分别位于 2.9 nm、3.1 nm 和 3.3 nm 中心区域。随着生长的进行, 势垒宽度线性变化从 75 nm 减小到 15 nm, 而阱中的掺杂浓度从 $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 升高到 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 阱中掺杂浓度和

表 1 不同结构样品的分子束外延生长参数

Table 1 Molecular beam epitaxy growth parameters of samples with different structures

Sample No.	Sample type	Well width/nm	Barrier width/nm	Well doping concentration/cm ⁻³	Period
A	NUQWIP	6.1	75→15	1×10 ¹⁷ →1×10 ¹⁸	20
B	NUQWIP	6.3	75→15	1×10 ¹⁷ →1×10 ¹⁸	20
C	NUQWIP	6.5	75→15	1×10 ¹⁷ →1×10 ¹⁸	20
D	QWIP	6.5	45	5×10 ¹⁷	20

势垒宽度的分布如图 1 所示。量子阱的大部分掺杂浓度变化发生在后五个阱,从 $3.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 升高到 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。上电极层和下电极层分别为 1 100 nm、1 200 nm 厚的 n 型掺杂 GaAs 层, Si 掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。为了比较非均匀结构与传统结构量子阱的电学特性,还生长了与样品 C 作为对照组的均匀量子阱结构样品 D, 20 个周期量子阱的势垒宽度和掺杂浓度分别为 45 nm 和 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 20 个周期总势垒宽度和阱宽度保持与非均匀结构(样品 C)相同。

样品生长结束后,通过 Talos F200X 型高分辨透射电镜(HRTEM)表征非均匀量子阱周期的生长情况,确保样品生长与设计参数保持一致;利用 Cameca 7f 型二次离子质谱仪(SIMS)测试样品的非均匀量子阱周期势阱的掺杂浓度。本文采用标准工艺制备了测试器件,具体步骤如下:首先,通过光刻和湿法腐蚀,获得了 $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ 台面;然后,上下电极层采用电子束蒸发的方法生长 100/20/400 nm 的 AuGe/Ni/Au 金属层,并在适当退火条件下形成欧姆接触。最后,将样品磨成 45° 斜面耦合入射光,并用低温胶将其固定在无氧铜热沉上。为了测试器件的光电性能,我们将其安装在低温杜瓦制冷设备中,并测量其黑体响应、暗电流和光电流谱等

表 2 非均匀量子阱材料的分子束外延结构

Table 2 Molecular beam epitaxy structure of non-uniform quantum well materials

Layer	Material	Thickness /nm	Description	Doping concentration/cm ⁻³
7	GaAs:Si	1 100	Top contact layer	1×10^{18}
6	Al _{0.18} Ga _{0.82} As	15	Barrier	
	GaAs	1.6		
5	GaAs:Si	X	Quantum well	$1 \times 10^{17} \rightarrow 1 \times 10^{18}$
	GaAs	1.6		
4	Al _{0.18} Ga _{0.82} As	75→15	Barrier	
3	GaAs:Si	1 200	Bottom contact layer	1×10^{18}
2	Al _{0.5} Ga _{0.5} As	300	Etch stop layer	
1	GaAs	300	Buffer layer	

3 inch GaAs (100) substrate

参数。

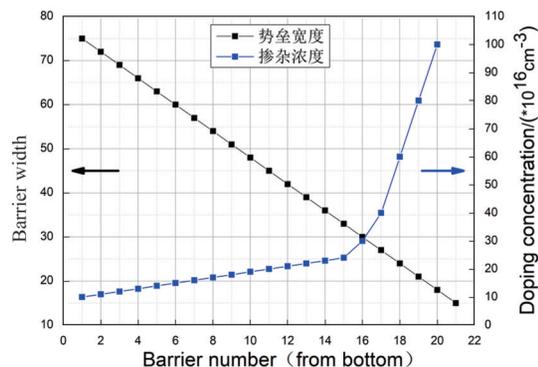


图 1 非均匀量子阱的掺杂浓度和势垒宽度分布

Fig. 1 The distributions of doping concentration and barrier width of each quantum wells for the NUQWIP

2 结果与分析

2.1 非均匀量子阱外延材料微观结构表征分析

本文通过高分辨透射电镜(HRTEM)对非均匀量子阱外延材料进行了表征,研究其外延层和界面特性。非均匀量子阱外延材料的晶体质量、材料的均匀性与生长参数之间的偏差是影响探测器性能的重要因素。高分辨透射电镜作为一种重要的表征工具,可以提供分子束外延材料中纳米尺度结构

的详细信息,例如界面形貌、晶体缺陷和结构缺陷等。通过对材料的界面形貌和晶格缺陷的观察,可以进一步指导量子阱红外探测器材料的优化和性能的提升。为此,我们选择了典型的样品 A 进行高分辨透射电镜表征。

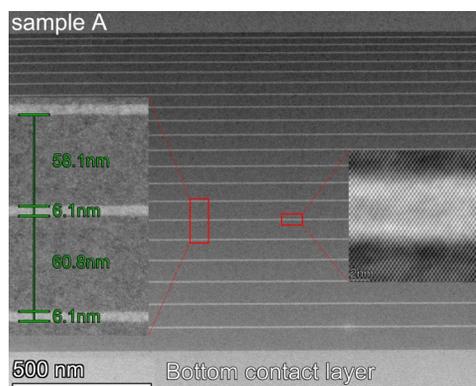


图2 样品 A 的高分辨透射电子显微镜图像

Fig. 2 The measured high resolution transmission electron microscope (HRTEM) of sample A

图2展示了样品 A 的 HRTEM 图像。在 5.8 万倍率下,可以清晰地观察到 GaAs/Al_{0.18}Ga_{0.82}As 量子阱材料由厚度较薄的 GaAs 势阱层(白色层)和 AlGaAs 势垒层(灰色层)之间交替生长而成,且量子阱的势垒沿生长方向由宽变窄,直观地反映了非均匀量子阱的特点。为了验证设计结构与实际生长结构之间的厚度偏差,我们选取了中心位置两个周期的量子阱进行厚度测量。图2左侧是样品 A 的 HRTEM 图像放大部分(33 万倍率下),第 6 个势垒宽度为 60.8 nm,第 7 个势垒宽度为 58.1 nm;相邻两个势阱宽度均为 6.1 nm,与设计值(60.0 nm、57.0 nm、6.1 nm)相比,偏差均在 1.25% 范围内,并且与设计值吻合很好。此外,我们还对样品 A 的 GaAs/AlGaAs 界面进行了分析,由图可知,其界面很陡峭,仅有 2 至 3 个原子层的轻微扩散。由此可见,该样品具有很好的晶体质量和界面质量。

此外,在使用 HRTEM 表征微观结构时,结合能谱仪(EDS)对非均匀量子阱结构中心区域进行了元素组成和含量分析。如图3所示,左一图像为高角度环形暗场图像(HAADF),从图中可以观察到,样品 A 与样品 B 均拥有很陡峭的界面,量子阱的势阱层 GaAs(白色层)与势垒层 AlGaAs(灰色层)层次分明,没有偏析现象出现。图3中心图像展示了 Al 元素的分布,我们可以观察到其在较宽的势垒层中均

匀的分布,而在较窄的势阱层则是黑色的,没有 Al 元素的出现,且势阱层与势垒层的界面非常清晰,没有偏析现象,这从另一角度也表明了 GaAs/AlGaAs 拥有很好的界面质量。综上所述,通过高分辨透射电镜与能谱仪分析,均显示了非均匀量子阱外延微观结构均具有很好的外延质量和界面质量。

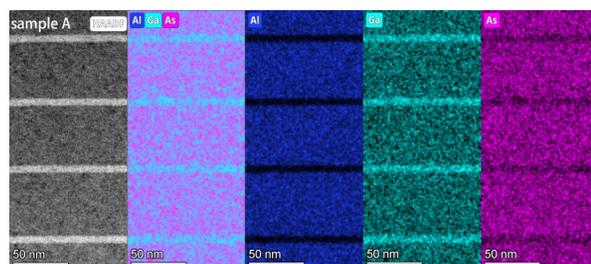


图3 样品 A 的能谱仪图像

Fig. 3 Energy Spectrometer image of sample A

为了进一步获得外延材料中各层的组分信息,并研究非均匀量子阱的另一特性(即非均匀掺杂),我们采用了二次离子质谱仪(SIMS)对样品 A 的 GaAs 势阱层中 Si 掺杂过程进行了深入分析,比较势阱的实际掺杂浓度与设计值之间的偏差。图4为样品 A 的 SIMS 测试数据,其直观地反映了非均匀量子阱材料的结构特点,即沿着外延生长方向,量子阱的势垒宽度逐渐变窄,而势阱的掺杂浓度依次升高。仔细观察掺杂浓度分布,由图可见,在靠近表面一侧的 5 个量子阱中,掺杂浓度变化较大,测试的掺杂浓度分别为 7.88×10^{17} 、 6.86×10^{17} 、 5.83×10^{17} 、 3.80×10^{17} 和 $2.78 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,与掺杂设计值(1.0×10^{18} 、 8.0×10^{17} 、 6.0×10^{17} 、 4.0×10^{17} 和 $3.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)较为吻合。而在靠近衬底一侧的 15 个阱中,则表现出较好的梯度递减趋势。此外,还可以看出下电极层测试掺杂浓度在设计值($1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)周围波动,这表明掺杂的准确性较好。综上所述,测量的非均匀量子阱结构势阱掺杂与设计值吻合较好,符合量子阱中非均匀掺杂的要求。

2.2 光电性能研究

2.2.1 NUQWIP 与常规 QWIP 的光电性能

非均匀量子阱是一种在外延生长方向上具有连续变化势垒宽度和势阱掺杂浓度的量子阱结构,以此改变量子阱的电场分布,从而影响量子阱探测器的性能。暗电流是指在没有光照时,由于热激发或隧穿效应而产生的电流,它是影响光电探测器噪声、探测率等参数的重要因素。因此,分析非均匀

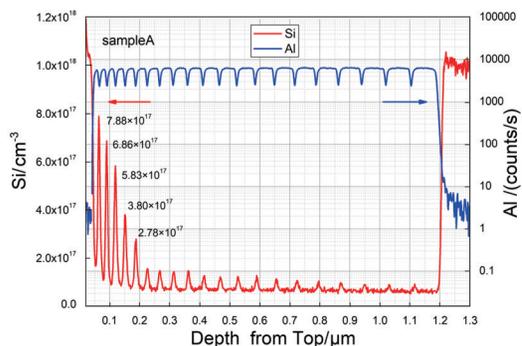


图4 样品A的二次离子质谱仪(SIMS)测试结果

Fig. 4 The test results of SIMS for sample A

量子阱的暗电流特性对于优化光电探测器设计和提高其性能具有重要参考意义。图5比较了非均匀结构(样品C)和常规结构(样品D)量子阱在50~70 K温度区间内暗电流随偏压变化的特性曲线。图中实线和虚线分别代表非均匀结构和常规结构的量子阱,不同颜色则代表着不同的温度。从图中可以观察到,在相同温度下非均匀结构量子阱暗电流总是比常规结构量子阱低一个数量级以上,说明非均匀结构具有更好的抑制暗电流能力。尤其,在较低温度下(50~60 K),非均匀量子阱暗电流表现更优异;在偏压-2 V与温度50 K下,常规结构的暗电流为 4.52×10^{-8} A,而非均匀结构仅为 5.88×10^{-10} A,相差约两个数量级。此外,随着测量温度从50 K上升至70 K时,两种结构量子阱暗电流都呈现每上升5 K增大5~10倍的趋势;在相同偏压下非均匀结构量子阱暗电流比常规结构量子阱低一个数量级,并且在低温(50~60 K)下具有更好的抑制暗电流能力。

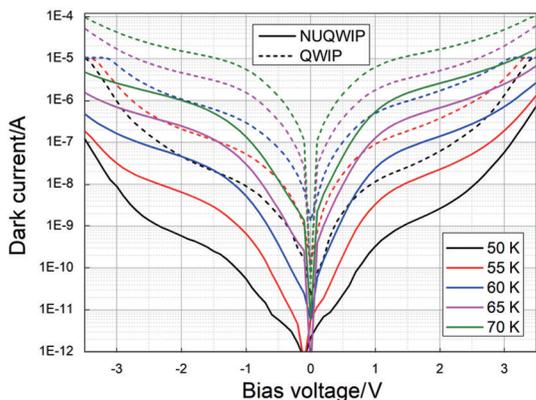


图5 在不同温度下暗电流随偏压的依赖关系,实线为非均匀量子阱,虚线为常规量子阱

Fig. 5 The dependence of dark current on bias voltage at different temperatures, the solid line is NUQWIP, and the dotted line is a conventional QWIP

非均匀结构与常规结构的量子阱在性质上存在差异。相较于常规结构,非均匀结构的量子阱因其非均匀势垒宽度和非均匀掺杂的势阱,导致了量子内部电场分布的改变,从而影响其工作机制。为了更好地阐述为何非均匀结构的暗电流低于常规结构,我们需要进一步深入分析量子阱内部电场分布的情况。根据电流连续性理论,通过平衡每个量子阱中捕获和逃逸的载流子数量可以分析非均匀量子阱的内部电场分布情况^[21]。非均匀掺杂和势垒宽度变化的影响,导致非均匀量子阱中的电场分布非常不均匀。在高掺杂区域,由于自由载流子数量较多,电场强度较弱;而在低掺杂区域,由于自由载流子数量较少,电场较强。这种高度不均匀的场分布为降低暗电流提供了可能性。由于低掺杂阱具有较大的动态电阻,暗电流主要集中在高电场区域;而在高掺杂阱上只有很小的一部分压降^[22]。因此,在相同总载流子密度下,常规结构比非均匀结构具有更大的暗电流。该现象在正向和反向偏压条件下都是成立的。

图6为量子阱探测器的响应光谱(PC谱),可以观察到非均匀QWIP的PC谱半高宽比常规QWIP的半峰全宽明显减少, $\Delta\lambda/\lambda$ 从16%下降至8%,这是由于第一激发态逐渐从势阱口外向势阱口内移动,从侧面可印证跃迁模式发生了变化。此外,图7比较了非均匀结构(样品C)和常规结构(样品D)QWIP在50 K和60 K温度下,黑体响应率随偏压变化的曲线。从图中可以看出,在0至-1 V偏压区间内,均匀结构QWIP的黑体响应率上升较快,在-1 V偏压后趋于饱和,这表明其跃迁模式为束缚态到连续态(B-C);而非均匀结构QWIP在该区间内的黑体响应率变化较小,符合束缚态到束缚态(B-B)的跃迁模式特性。尽管非均匀量子阱器件具有较低的暗电流,但其黑体响应率比常规量子阱器件低。我们分析是由于非均匀结构的能级分布变化和掺杂浓度产生的影响。首先,由于非均匀量子阱为B-B跃迁模式,第一激发态位于量子阱内,具有较低的能级,降低了电场很小的高掺杂区域的载流子逃逸概率。其次,在非均匀结构中,在负偏压下仅有靠近负极的5个量子阱拥有高掺杂浓度;对于其余部分量子阱,由于平均掺杂浓度低于均匀结构中的量子阱,因此非均匀结构的整体量子效率应低于均匀结构的量子效率。结合这两种效应,非均匀量子阱的响应率低于常规结构的量

子阱。

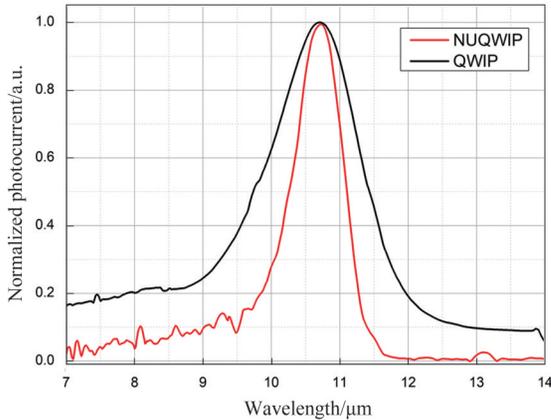


图6 非均匀量子阱与常规量子阱在 50 K 温度下的光电流响应谱

Fig. 6 Photocurrent response spectra of NUQWIP and Conventional QWIP at 50 K

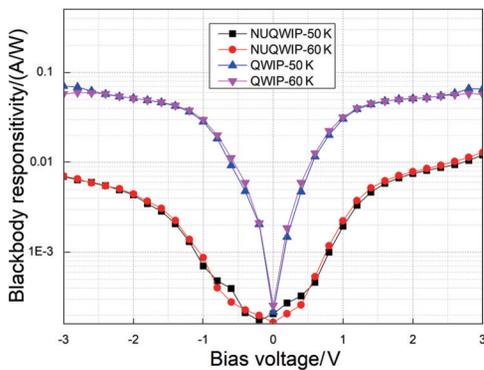


图7 非均匀量子阱和常规量子阱在不同温度下黑体响应率随偏压的变化关系

Fig. 7 Relationship between blackbody responsiveness and bias voltage in Non-uniform QWIP and Conventional QWIP at different temperatures

2.2.2 不同阱宽 NUQWIP 的光电性能

为了研究势阱宽度改变对非均匀量子阱电学性能的影响,我们生长了样品 A、样品 B 和样品 C,除了阱宽不相同外(样品 A、B、C 阱宽分别为 6.1、6.3、6.5 nm),其他参数均保持一致。图 8 显示了样品 A、样品 B 和样品 C 在 50 K 下的光电流谱。从图中可以看出,当阱宽从 6.1 nm 增加到 6.3 nm 时,量子阱的峰值响应波长从 9.95 μm 增加到 10.74 μm ,发生了红移。量子阱宽度的变化对探测器的光谱特性有显著影响,当第一激发态位于阱外时,随着阱宽的增加,探测器的峰值响应波长发生蓝移;对于基态和第一激发态均位于阱内跃迁发生在量子阱中的探测器来说,随着阱宽的增加,第一激发态更

远离阱口的位置,峰值响应波长会向长波方向移动,即出现红移现象^[24]。

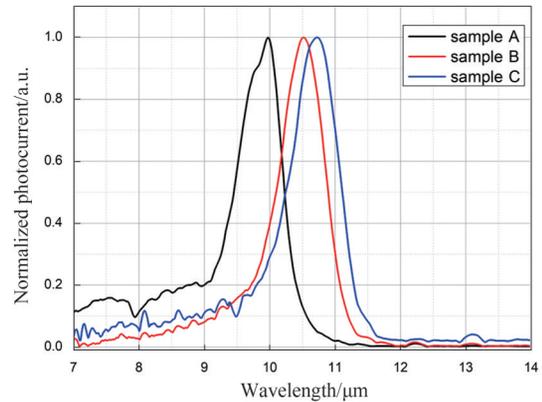


图8 样品 A、样品 B 和样品 C 在 50 K 下的光电流响应谱

Fig. 8 Photocurrent response spectra of samples A, B, and C at 50 K

图 9 展示了不同势阱宽度下的非均匀量子阱的暗电流随偏压的变化关系图。从图中可以明显观察到,暗电流随着器件偏压的增加而快速增大,这是由于偏压增大导致量子阱的能带倾斜,从而增加了电子的碰撞电离能,进而增加了暗电流。在 40 K 的温度时,我们可观察到 3 个非均匀量子阱暗电流均处于同一数量级,差别不大。在 40 K 温度区间,属于载流子隧穿效应引起的暗电流,隧穿是从一个量子阱中的局域态到另一个量子态的载流子散射过程,热激发效应对暗电流的影响较小,三者没有表现出明显差异。当温度从 40 K 升高到 77 K 时,三个样品的暗电流都显著增大,每升高 5 K 暗电流大约升高一个数量级的趋势。这主要是因为暗电流受温度的影响较大,尤其是热激发暗电流。暗电流的产生机制分析表明,当温度开始升高时,热激发效应占据主导地位,载流子通过热激发从基态上升到更高的能量状态。在高温下,这种传输机制是暗电流的主要来源。另外,暗电流的大小也受到跃迁模式变化的影响。当阱中掺杂浓度相同时,器件暗电流相差较大,这可能与跃迁模式不同有关。

如图 10 所示,显示了不同阱宽下非均匀量子阱红外探测器在不同温度下,黑体响应率随偏压变化的曲线。从图中可以看出,样品 B 的响应率最高,样品 C 居中,样品 A 最低。这说明量子阱宽度的变化对探测器的光谱特性有显著的影响。根据黑体响应和光电流谱分析,三个样品的第一激发态均在势阱内,但样品 B 的暗电流与样品 C 相当,且其黑体响

应率高于样品C,这说明样品B的跃迁模式为束缚态到准束缚态(B-QB)。而样品A和样品C的跃迁模式均为束缚态到束缚态(B-B),由于样品A的基态低于样品B和样品C,载流子需要更高的能量才能激发到第一激发态,因此其暗电流最低,但也导致了样品A的黑体响应率最低。

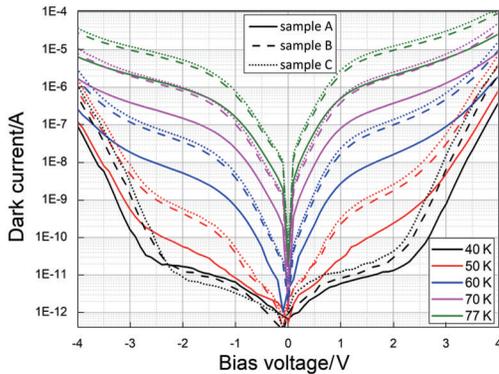


图9 样品A、样品B和样品C在不同温度下暗电流随偏压的依赖关系

Fig. 9 The dependence of dark current on bias voltage of sample A, sample B and sample C at different temperatures

此外,非均匀量子阱结构和常规量子阱结构的黑体响应率在温度依赖性方面表现出部分差异。对于传统量子阱结构,在不同温度下,响应率基本保持恒定。温度与响应率存在依赖性的现象,此前仅在具有单个量子阱周期的QWIP中发现。如图10所示,对于非均匀量子阱结构,在负偏压下,响应率与温度依赖性较弱;但在正偏压下(高于1.5 V),响应率随着温度升高而增大。这是由于非均匀量子阱中每个量子阱的注入电流受到温度影响,这可从量子阱内部电场分布来解释。由于低掺杂阱的注入电流较低,电场分布在低温下分为两部分,分别为一个均匀的高场区以及一个较长的几乎为零的低场区。由于该区域的低量子效率和高捕获概率,因此响应率较低。而随着温度的升高,这个低场区域减小,响应率逐渐增加。

3 结论

本文利用分子束外延(MBE)技术成功生长了非均匀GaAs/AlGaAs量子阱红外探测器材料,通过高分辨透射电子显微镜(HRTEM)结合能谱仪(EDS)对非均匀外延微结构进行了详细的表征分析,并利用二次离子质谱仪(SIMS)对非均匀势阱掺杂进行了表征。对非均匀GaAs/AlGaAs量子阱红外

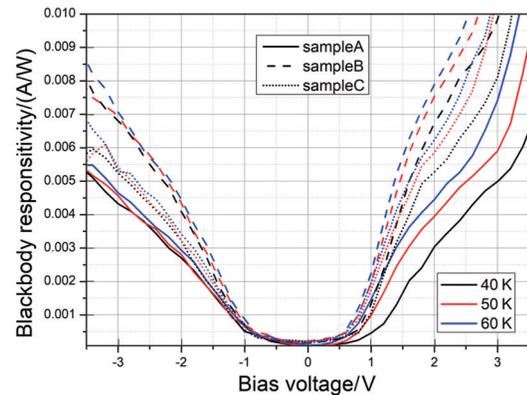


图10 样品A、样品B和样品C在不同温度下黑体响应率随偏压的变化关系

Fig. 10 Relationship between blackbody responsiveness and bias voltage for samples A, B, and C at different temperatures

探测器和常规量子阱红外探测器性能做了研究比较,并分析了不同势阱宽度对非均匀量子阱红外探测器性能的影响。结果表明,使用MBE技术成功生长了高质量的非均匀量子阱外延材料,通过改变每个阱的掺杂浓度和势垒宽度,可以改变电场分布,使暗电流下降一个数量级。在不同阱宽下,可以改变非均匀量子阱的跃迁模式,束缚态到准束缚态跃迁模式下(B-QB)器件拥有更强的黑体响应率以及较低的暗电流。这些工作有助于实现焦平面量子阱红外探测器的性能提升,也为研制非均匀量子阱红外探测器应用于长波红外成像领域打下了基础。

致谢:感谢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的李宁研究员和李志锋研究员在器件研制和测试方面提供的指导和具体帮助。

References

- [1] 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.
- [2] Rogalski A. Recent progress in infrared detector technologies [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, **54**(3): 136-154.
- [3] Sarusi G. QWIP or other alternative for third generation infrared systems [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2003, **44**(5-6):439-444.
- [4] Norton P R, Campbell J B, Horn S B, *et al.* Third-generation infrared imagers [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2000, **4130**: 226-236.
- [5] Gunapala S D, Ting D Z, Hill C J, *et al.* Large area III - V infrared focal planes [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, **54**(3):155-163.
- [6] Binzoni T, Leung T, Delpy D T, *et al.* Mapping human

- skeletal muscle perforator vessels using a quantum well infrared photodetector (QWIP) might explain the variability of NIRS and LDF measurements[J]. *Physics in Medicine & Biology*, 2004, **49**(12):165–73.
- [7] Gunapala S D, Bandara S V, Liu J K, *et al.* Long-wavelength 256×256 GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetector (QWIP) palm-size camera[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2000, **47**(2):326–332.
- [8] Levine B F, Gunapala S D, Kuo J M, *et al.* Normal incidence hole intersubband absorption long wavelength GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum well infrared photodetectors [J]. *Applied Physics Letters*, 1991, **59**(15):1864–1866.
- [9] Weber E R, Liu H C, Willardson R K. Semiconductors and semimetals: Intersubband transitions in quantum wells physics and device applications[J]. *Semiconductors & Semimetals*, 1999, **73**(11):325–330.
- [10] Rogalski A. New material systems for third generation infrared detectors[C]// International Conference on Correlation Optics. Ninth International Conference on Correlation Optics, 2009.
- [11] Moon J, Li S S, Lee J H. A high performance quantum well infrared photodetector using superlattice-coupled quantum wells for long wavelength infrared detection[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2003, **44**(4):229–234.
- [12] Levine B. F. Quantum-well infrared photodetectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, **74**(8):R1–R81.
- [13] Wei L, Li L, Zheng H L, *et al.* Development of an infrared detector: Quantum well infrared photodetector[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2009(7):9.
- [14] Rogalski A. Comparison of the performance of quantum well and conventional bulk infrared photodetectors[J]. *Infrared Physics & Technology*, 1997, **38**(5):295–310.
- [15] Bethea G C, Levine B F. Long wavelength infrared 128* 128 Al_xGa_{1-x}As/GaAs quantum well infrared camera and imaging system [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1993, **40**(11):P.1957–1963.
- [16] Rogalski A. Quantum well photoconductors in infrared detector technology[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, **93**(8):4355–4391.
- [17] Negi C, Kumar J. Investigation of p-type multicolour-broadband quantum dot infrared photodetector [J]. *Superlattices & Microstructures*, 2015, **82**(JUN.):336–348.
- [18] Wang S Y, Lee C P. Nonuniform quantum well infrared photodetectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, **87**(1):522–525.
- [19] Ershov M, Liu H C, Perera A, *et al.* Optical interference and nonlinearities in quantum-well infrared photodetectors [J]. *Physica E Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2000, **7**(1–2):115–119.
- [20] Ershov M, Ryzhii V, Hamaguchi C. Contact and distributed effects in quantum well infrared photodetectors [J]. *Applied Physics Letters*, 1995, **67**(21):3147–3149.
- [21] Thibaudeau L, Bois P, Duboz J Y. A self-consistent model for quantum well infrared photodetectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 1996, **79**(1):446–454.
- [22] Wang S Y, Chin Y C, Lee C P. A detailed study of non-uniform quantum well infrared photodetectors [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2001, **42**(3–5):177–184.
- [23] El-Tokhy M S, Mahmoud I I. Effects of nonuniform distribution of quantum well and quantum wire base on infrared photodetectors under dark conditions [J]. *Optical & Quantum Electronics*, 2017, **49**(4):152.
- [24] Steele A G, Liu H C, Buchanan M, *et al.* Importance of the upper state position in the performance of quantum well intersubband infrared detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 1992, **59**(27):3625–3627.