

低占空比红外增强吸收的量子阱微柱阵列

叶新辉^{1,2}, 谢天^{1,2}, 夏辉², 陈熙仁², 李菊柱^{2,3}, 张帅君^{1,2}, 姜新洋^{2,4},
邓伟杰^{2,4}, 王文静^{2,3}, 李玉莹², 刘伟伟², 刘芳^{1*}, 李天信^{2*}

(1. 上海理工大学材料科学与工程学院, 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;

3. 上海师范大学数理学院, 上海 200234;

4. 上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 201210)

摘要: 为了提高长波红外量子阱探测器的光耦合效率和信噪比, 以 $8.7 \mu\text{m}$ 为中心波长, 设计和制备了量子阱亚波长微柱阵列结构。与已经报道的金属或介质微腔结构不同, 本文的微柱结构有源区包含 50 周期的量子阱/垒层, 结合低至 0.18 的占空比, 可望在增强吸收的同时显著抑制暗电流。红外光谱测量验证了制备的微柱阵列在 $8\sim 9 \mu\text{m}$ 波段 8% 以内的低反射率特征, 从而为高工作温度、高信噪比的长波红外探测提供了新方案。

关键词: 量子阱红外探测器; 亚波长微柱阵列; 占空比; 红外反射谱

中图分类号: TN215

文献标识码: A

Quantum well micropillar arrays with low filling factor for enhanced infrared absorption

YE Xin-Hui^{1,2}, XIE Tian^{1,2}, XIA Hui², CHEN Xi-Ren², LI Ju-Zhu^{2,3}, ZHANG Shuai-Jun^{1,2}, JIANG Xin-Yang^{2,4}, DENG Wei-Jie^{2,4}, WANG Wen-Jing^{2,3}, LI Yu-Ying², LIU Wei-Wei², LIU Fang^{1*}, LI Tian-Xin^{2*}

(1. School of Materials Science and Engineering, 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;

3. Mathematics and Science College, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China;

4. School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China)

Abstract: To improve the efficiency of optical coupling and the signal-to-noise ratio of long wavelength quantum well infrared detector (LW-QWIP), we designed and fabricated a quantum well subwavelength micropillar arrays structure targeting at $8.7 \mu\text{m}$ central wavelength. Different from the reported metal or dielectric microcavity structures, each pillar contains 50 periods of quantum wells and barriers, which combined with the filling factor lower than 0.18 is expected to considerably suppress the dark current while enhancing the efficiency of light absorption. Infrared spectrum measurement discloses that the micropillar arrays reflect only 8% in the wavelength range of $8\sim 9 \mu\text{m}$. Our study offers a practical scheme for sensitive infrared detection at high operation temperature.

Key words: quantum well infrared detector, subwavelength micropillar arrays, filling factor, infrared reflectance spectrum

PACS: 07. 57. Hm, 68. 65. Fg, 52. 25. Os, 42. 66. Lc, 42. 60. Da

收稿日期: 2020-03-30, 修回日期: 2020-10-25

Received date: 2020-03-30, Revised date: 2020-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(11574336, 11991063); 中国科学院战略性先导科技专项(XDB43010200); 上海市自然科学基金(19ZR1465700, 14ZR1446200, 18JC1420401)

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (11574336, 11991063), The Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XD43010200), STCSM(19ZR1465700, 14ZR1446200, 18JC1420401)

作者简介(Biography): 叶新辉(1989—), 男, 江苏泰州人, 硕士研究生, 主要研究领域为量子阱红外探测器. E-mail: yexinhui0506@126.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: liufang@usst.edu.cn, txli@mail.sitp.ac.cn

引言

在长波红外探测器中,量子阱材料具有工艺成熟、均匀性和热稳定性好的优点,克服了碲镉汞(HgCdTe)材料在这些方面的不足,有利于大面积焦平面的制备^[1-2]。然而,子带间跃迁选择定则使N型量子阱只能吸收电场分量垂直于量子阱层的电磁波^[3],所以,需要采用光栅等结构耦合入射光^[4-6]。相对于HgCdTe超过70%的量子效率^[7],量子阱只有10%的量子效率。另外,对于光导型量子阱红外探测器(Quantum Well Infrared Detector, QWIP),温度高于70 K以上时,热激发电子是产生暗电流的主要原因,温度在77 K时,其暗电流大约比HgCdTe高2个数量级^[8-9]。

为了提高量子阱对红外光的吸收,人们相继提出新颖的人工微结构来增强光耦合,例如王晗等制备了不受入射角影响的管状量子阱^[10];唐伟伟等人提出全介质共振腔耦合入射光^[11],降低了介质引起的损耗,其峰值吸收效率有望超过80%;甄涛等人采用的金属等离子微腔结构理论上可以达到82%的光吸收^[12]。Daniele Palaferri等人制备了一种亚波长金属谐振器结构^[13],将电场压缩进亚波长微腔中,在光子收集面积不变的情况下减少电学面积,使暗电流随电学面积减少而降低,不过其有源区只有386 nm厚、总计只有5层的量子阱;Hideki T. Miyazaki^[14]等人使用经过优化的折叠导线将单量子阱连接起来形成天线,其在78 K时的外量子效率达到61%,响应率达到3.3 A/W,在低温下展现了优异的探测性能,然而,由于有源区只含一个周期的阱/垒,在接近室温时,随着暗电流的急剧上升,信噪比迅速恶化。可以看出,目前为止人们采用的金属或介质微腔等陷光结构可以形成强的局域光学模式,实现量子阱对红外光的高效吸收;但同时有源区厚度被控制在较小的范围,极大地限制了量子阱/垒的周期数,难以有效抑制暗电流,因此在提高量子效率的同时,如何降低器件的暗电流,是量子阱光电结构设计面临的突出难题。还值得指出的是,上述方案都涉及深亚微米的结构制备,并且形成超薄的微腔还需要剥离、卷曲等工艺,因此在推广到大面积焦平面时会面临很大的工艺挑战。

本文提出了一种亚波长微柱阵列的量子阱红外探测结构。一方面,利用GaAs基量子阱材料自身的高折射率特性以及微柱阵列的导模共振效应有效地提升光吸收^[15];另一方面,微柱阵列的低占空

比^[16-18]使探测结构的电学面积远小于光子收集面积,结合暗电流与量子势垒/阱周期数的反比关系^[19],有望实现较高温度下量子阱的高信噪比红外探测。首先,采用有限时域差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)仿真软件,设计并优化了基于50层GaAs/AlGaAs量子阱地最佳微柱阵列结构,并对该尺寸下的电场分布进行了仿真,分析了亚波长微柱阵列的光耦合作用。接着,采用接触式紫外光刻工艺和感应耦合等离子体(Inductively Coupled Plasma, ICP)刻蚀工艺,制备了亚波长微柱阵列结构,红外反射谱测量验证了量子阱微柱阵列的长波红外光学共振模式和低反射率特性。

1 结构设计

图1为基于GaAs/AlGaAs量子阱微柱阵列的原型器件示意图,其中量子阱材料构成的微柱阵列同时作为亚波长光栅和红外吸收介质,其四周可采用红外波段透光率高、耐高温的苯并环丁烯^[20](Benzocyclobutene, BCB)作为填充介质以便支撑电极,上方的条栅电极通过天线效应能够进一步增强半导体微柱的光学耦合^[13-14],下电极从下接触层引出。图右侧为量子阱材料生长结构示意图,有源区包含50周期的量子阱,每一周期由5.4 nm厚度的GaAs和50 nm厚度的AlGaAs组成,阱/垒层总厚度为2.77 μm ,上下接触层由重掺杂的GaAs构成,厚度分别为1.1 μm 和1.2 μm 。

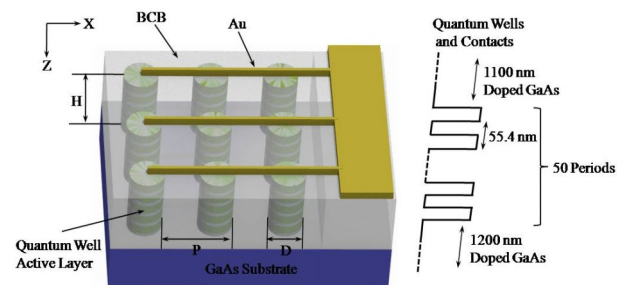


图1 基于量子阱微柱阵列的原型器件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the quantum well based micro-pillar array

亚波长阵列结构QWIP器件,其电磁性质除了依赖于材料本身属性,还依赖于它的几何构造。为了实现对光场的调控,使用FDTD对其结构尺寸进行优化。量子阱介电常数根据45°边耦合器件的光电流谱拟合而来^[12,21-22],其虚部 $\text{Im}(\epsilon_2)$ 随波长变化如图3(a)所示,x轴和y轴方向虚部设为0,以平面光源垂直入射。为了发挥多量子阱对入射光的吸收

能力和多周期阱/垒层对暗电流的抑制作用,将微柱高度 H 设为 $4 \mu\text{m}$,这一高度到达了量子阱的下接触层,并且增大高宽比提高了阵列的陷光能力^[23]和导模共振^[24]效应增强光耦合的效果。当微柱直径 D 分别为 $1.5 \mu\text{m}$ 、 $2 \mu\text{m}$ 、 $2.5 \mu\text{m}$ 时,亚波长阵列导致的反射极小值分别对应于波长 $\lambda = 7.2 \mu\text{m}$ 、 $8.7 \mu\text{m}$ 、 $10.4 \mu\text{m}$,如图 2 所示。直径每增加 $0.5 \mu\text{m}$ 引起的反射波谷红移在 $1.5 \mu\text{m}$ 以上,而周期 P 的变化对反射率的波谷位置影响不大。当直径为 $2 \mu\text{m}$ 时,出现的反射极小与量子阱 $8.7 \mu\text{m}$ 峰值响应波长一致,周期为 $4 \mu\text{m}$ 、 $4.5 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m}$ 时的反射率均低于 5%。

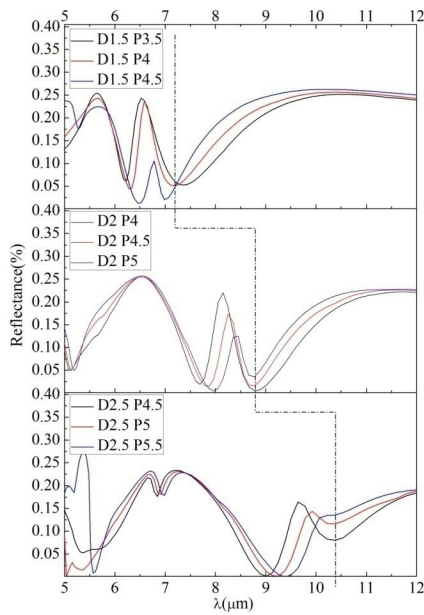


图 2 FDTD 模拟微柱尺寸变化对反射率的影响

Fig. 2 Simulated reflectivity of the micropillar arrays with different dimensions

如图 3(b) 所示,根据量子阱介电常数,使用 FDTD 模拟微柱阵列(黑线)与 45° 边耦合(红线)的吸收率。经过尺寸优化,直径为 $2.2 \mu\text{m}$ 、周期为 $4 \mu\text{m}$ 时,微柱阵列在 $8.7 \mu\text{m}$ 处吸收达到最大,峰值吸收率为 30.7%,相对于 45° 边耦合增强 1.3 倍。由于结构同时影响反射率和透射率,因此在 $8.7 \mu\text{m}$ 波长处得到的反射极小对应的直径与吸收极大时对应的直径存在偏差。图 3(c,d) 给出了该优化尺寸下电场分量 E_z 在微柱结构中的分布,图 3(c) 为 x - z 面分布,图 3(d) 为 $z=1.6 \mu\text{m}$ 处 x - y 面分布。可以观察到,在波长 $8.7 \mu\text{m}$ 处,微柱内部出现了明显的吸收增强,表明由亚波长阵列引起的导模共振效应将电磁波压缩到微柱中,有效改善量子阱对入射光的吸收能力。所以,在此结构中,量子阱微柱既作为亚

波长结构耦合入射光,又作为有源区起到吸收红外光的作用。

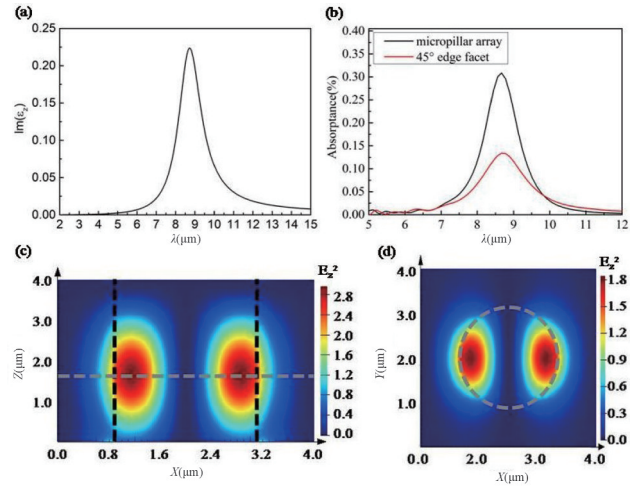


图 3 量子阱微柱阵列(直径 $D = 2.2 \mu\text{m}$ 、周期 $P = 4 \mu\text{m}$ 、高度 $H = 4 \mu\text{m}$)在 $\lambda = 8.7 \mu\text{m}$ 处增强吸收效果图 (a) 量子阱介电常数虚部 $\text{Im}(\epsilon_2)$ 随波长的变化, (b) 微柱阵列与 45° 边耦合的模拟吸收谱, (c) 电场分量 E_z 在 x - z 面的分布, (d) 电场分量 E_z 在 $z = 1.6 \mu\text{m}$ 处 x - y 面的分布

Fig. 3 Enhanced absorption effect of quantum well micropillar arrays ($D = 2.2 \mu\text{m}$, $P = 4 \mu\text{m}$, $H = 4 \mu\text{m}$) at $\lambda = 8.7 \mu\text{m}$ (a) Imaginary part of the permittivity in the z direction ($\text{Im}(\epsilon_2)$) of quantum well vary with wavelength, (b) Simulated absorption spectrum of micropillar array and 45° edge facet, (c) Simulated E_z distribution for $D = 2.2 \mu\text{m}$, $P = 4 \mu\text{m}$, $H = 4 \mu\text{m}$ on the x - z plane, (d) Simulated E_z distribution on the x - y plane at $z = 1.6 \mu\text{m}$

2 制备与表征

由于设计的微柱直径已经接近接触式紫外光刻工艺的精度下限,同时刻蚀深度需要达到下接触层,因此制备工艺要实现微米级厚胶窄线宽的目标。图 4 为量子阱微柱阵列制备流程,由于光刻胶与量子阱材料较低的刻蚀交换比,为达到设计深度,采用 SiN_x 作为中间级掩膜层,工艺参数如下:光刻胶与 SiN_x 的刻蚀交换比为 1.2:1, SiN_x 与量子阱的刻蚀交换比为 1:5。首先,在 330°C 温度下采用等离子体增强化学气相沉积法(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)在量子阱晶圆上沉积 $0.9 \mu\text{m}$ 厚的 SiN_x 。接着,在表面旋涂 $1.2 \mu\text{m}$ 厚的 BCI3511 光刻胶作为掩膜进行紫外光刻。再通过 ICP 干法刻蚀分别采用 SF_6 气体和 Cl_2 气体依次刻蚀 SiN_x 和量子阱,成功地制备出兼顾直径和高度的微柱。

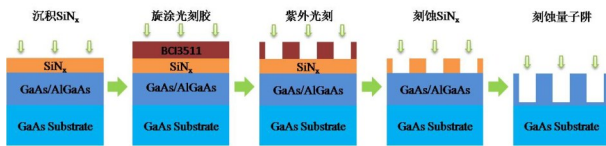
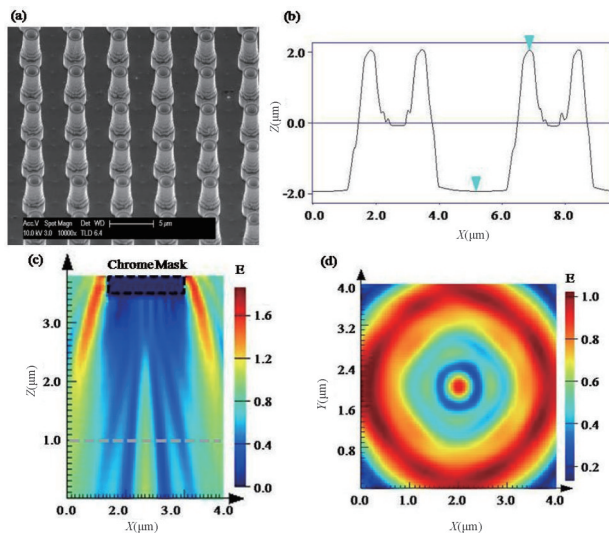


图4 量子阱微柱阵列结构制备工艺

Fig. 4 Process of quantum well micropillar arrays

分别采用扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 和原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM) 表征样品形貌, 如图 5(a, b) 所示。经测量, 微柱高度达到 $4\ \mu\text{m}$, 顶端直径分别为 $1.6\ \mu\text{m}$ 、 $2.1\ \mu\text{m}$ 、 $2.6\ \mu\text{m}$, 尺寸与设计值接近。但是, 由于光刻时的光学衍射效应, 在波长为 $365\ \text{nm}$ 的汞灯曝光下, 微柱侧面会产生驻波, 并在圆中心产生泊松亮斑, 所以真实制备的微柱形貌出现中空现象。光刻时衍射出现的泊松亮斑如图 5(c, d) 所示, (c) 为光刻工艺中衍射效应引起的光场在 $x-z$ 面分布情况, (d) 是铬掩膜 (Chrome Mask) 下方 $z = 1.0\ \mu\text{m}$ 处的 $x-y$ 面光场分布。最终制备的结构中空深度约 $2\ \mu\text{m}$, 平均内径约 $1.1\ \mu\text{m}$, 形貌底部直径较顶部偏大 $0.6\ \mu\text{m}$ 左右。微柱的直径渐变和中空特征一方面有助于拓宽阵列结构的光谱响应范围, 同时进一步

图5 GaAs/AlGaAs量子阱微柱阵列形貌和光刻衍射模型 (a) SEM 形貌, (b) AFM 截面形貌, (c) 光刻工艺衍射模型的 $x-z$ 截面图, (d) 光刻工艺衍射模型在 $z = 1.0\ \mu\text{m}$ 处的 $x-y$ 截面图Fig. 5 Images of GaAs/AlGaAs quantum well based micropillar arrays and diffraction pattern of lithography (a) SEM image, (b) AFM section image, (c) diffraction pattern of lithography process on $x-z$ plane, (d) diffraction pattern of lithography process on $x-y$ plane at $z = 1.0\ \mu\text{m}$

降低了材料的体积占空比。

3 光谱测量与分析

采用 IF V80 型傅里叶红外变换光谱仪 (Fourier Transform Infrared, FTIR) 分析样品反射谱, 以 Au 膜作为标样, 光源中心入射角为 30° , 测量室温下 $5-12\ \mu\text{m}$ 波段的反射率。

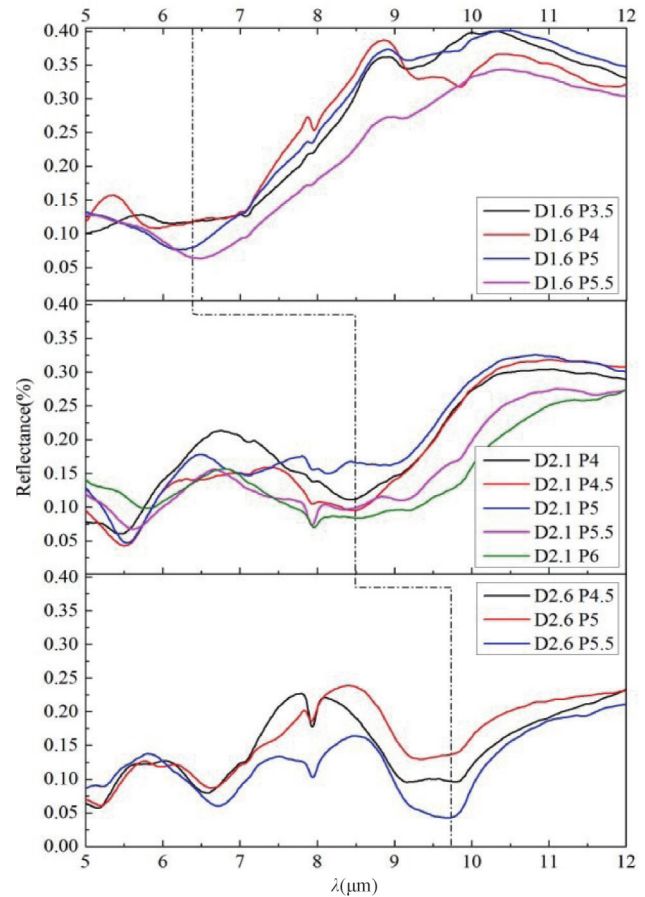


图6 微柱阵列反射谱随直径和周期的变化

Fig. 6 Reflectance spectrum of micropillar arrays at different periods and diameters

图 6 为微柱阵列反射谱随直径 D 和周期 P 的变化, 顶端直径依次为 $1.6\ \mu\text{m}$ 、 $2.1\ \mu\text{m}$ 、 $2.6\ \mu\text{m}$, 直径每增加 $0.5\ \mu\text{m}$, 反射谱波谷随微柱直径的增加产生 $1\ \mu\text{m}$ 以上的红移, 而周期增加产生的红移并不明显, 与理论计算结果一致。其中, 顶端直径为 $2.1\ \mu\text{m}$ 时, 反射率极小值位于 $8 \sim 9\ \mu\text{m}$ 区间, 最小反射率只有 8% 左右。相对于圆柱结构, 中空特征与锥形结构对入射光的响应使反射谱波谷较宽 (Full-Width Half-Maximum, FWHM $> 2\ \mu\text{m}$), 有利于完全覆盖量子阱子带吸收 $1\ \mu\text{m}$ 左右的宽度。直径变化带来的另一个规律是, 小直径阵列在短波长区间的

减反效果明显小于 15%,长波长一侧的反射率普遍较高(大于 35%),所以反射谱“左低右高”,减反效果位于短波段;反射极小值随着直径增加而红移时,由于较小尺寸的中空结构对短波波段的减反作用,与主结构共同作用,使减反效果大大展宽,将整个谱段反射率降至 15% 以下。

由于实验因素难以完全体现在数值建模中,包括实测反射谱时光路的角度范围较宽($\pm 15^\circ$),而且权重无法估测;中空结构的精确立体构型;刻蚀形成的微柱表面不完美度等,这些因素使得实验反射谱的光学模式波长、展宽等相对理论计算产生偏离。尽管如此,微柱阵列的主要光学模式特征在红外反射谱上均已体现出来,特别是长波和中波红外波段的主要反射极小对应了基础阶和高阶的共振模,并且受微柱直径变化产生规律性的影响。另一方面,实验制备微柱结构的具体构型和尺寸渐变特征形成模式展宽和宽谱段减反效应,提高了加工工艺的容差,也有利于较宽谱段的增强吸收。在电学方面,中空微柱结构将占空比减小至 0.18,从而在不减少光子收集面积的同时,进一步降低探测材料的电学面积,形成对暗电流的抑制^[25],有望提高长波红外探测的信噪比。微柱阵列增加了探测器件的侧面积,这在带间跃迁的材料中会引起少数载流子寿命下降,增加表面钝化的难度,而量子阱是子带跃迁的光导型探测机制,尤其 GaAs/AlGaAs 材料的表面钝化工艺已经成熟,沉积 SiN_x 等可以有效抑制低占空比大表面积的表面漏电^[13-14,26]。

4 结论

针对 QWIP 器件降低暗电流和增强吸收的双重要求,设计了一种包含 50 周期量子阱/垒层的亚波长微柱阵列结构,并采用紫外光刻等工艺成功地制备出样品。FDTD 计算表明,相比于 45° 边耦合方式,微柱阵列结构对 $8.7 \mu\text{m}$ 红外光的峰值吸收增强 1.3 倍。形貌表征显示,制备的微柱直径和高度与设计值接近;而由光刻时泊松亮斑产生的中空结构将微柱阵列的体积占空比进一步降至 0.18。光谱分析表明,直径为 $2.1 \mu\text{m}$ 的微柱在 $8\sim 9 \mu\text{m}$ 的宽波段仅有 8% 左右的低反射率。亚波长微柱阵列在有效光学吸收面积不变的条件下减少了电学面积,形成的 $4 \mu\text{m}$ 高、低占空比量子阱微柱,不仅产生导模共振效应增强光吸收,而且抑制了暗电流,有利于高温探测性能的改善。另外,将量子阱本身制作成二维光栅结构,不需要引入其他耦合介质,降低了

工艺难度,易于实现大面阵耦合结构的制备,为量子阱长波红外焦平面的设计和性能优化提供了新方案。

References

- [1] Goldberg A, Choi K K, Jhabvala M, et al. Large-format and multispectral QWIP infrared focal plane arrays [J]. *SPIE*, 2003, **5074**: 83-94.
- [2] Tan C L, Mohseni H. Emerging technologies for high performance infrared detectors [J]. *Nanophotonics*, 2017, **7**(1): 169-197.
- [3] Liu H C, Buchanan M, Wasilewski Z R. How good is the polarization selection rule for intersubband transitions? [J]. *Applied Physics Letters*, 1985, **46**(12): 1156-1158.
- [4] Andersson J Y, Lundqvist L, Paska Z F. Quantum efficiency enhancement of AlGaAs/GaAs quantum well infrared detectors using a waveguide with a grating coupler [J]. *Applied Physics Letters*, 1991, **58**(20): 2264-2266.
- [5] Sarusi G, Levine B F, Pearton S J, et al. Improved performance of quantum well infrared photodetectors using random scattering optical coupling [J]. *Applied Physics Letters*, 1994, **64**(8), 960-962.
- [6] Xiong Da-Yuan, Zeng Yong, Li Ning, et al.. The grating optical coupling of the very long wavelength quantum well infrared photodetectors [J]. *Acta Physica Sinica* (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**(7): 3642-3648.
- [7] Rogalski A. Quantum well photoconductors in infrared detector technology [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, **93**(8): 4355-4391.
- [8] Yao J, Tsui D C, Choi K K. Noise characteristics of quantum-well infrared photodetectors at low temperatures [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, **76**(2): 206-208.
- [9] Singh A, Manasreh M O. Quantum well and superlattice heterostructures for space-based long wavelength infrared photo detectors [J]. *SPIE*, 1995, **2397**: 193-209.
- [10] Wang Han, Li Shi-Long, Zhen Hong-Lou, et al. A tubular quantum well infrared photodetector under vertically-incident light coupling [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王晗, 李世龙, 甄红楼, 等, 一种可吸收垂直入射光的管状量子阱红外探测器, *红外与毫米波学报*), 2017, **36**(2): 191-195.
- [11] Tang W W, Zhou J, Zheng Y L, et al. All-dielectric resonant waveguide based quantum well infrared photodetectors for hyperspectral detection [J]. *Optics Communications*, 2018, **427**: 196-201.
- [12] Zhen T, Zhou J, Li Z F, et al. Realization of both high absorption of active materials and low ohmic loss in plasmonic cavities [J]. *Advanced Optical Material*, 2019, **7**(11): 1801627(1-8).
- [13] Palaferri D, todorov Y, Bigioli A, et al. Room-temperature nine- μm -wavelength photo-detectors and GHz-frequency heterodyne receivers [J]. *Nature*, 2018, **556**: 85-88.
- [14] Hideki H T, Mano M, Kasaya T, et al. Synchronously wired infrared antennas for resonant single-quantum-well photodetection up to room temperature [J]. *Nature Commu-*

- nications*, 2020, **565**(11).
- [15] Hu Wei-Da, Li Qing, Chen Xiao-Shuang, *et al.* Recent progress on advanced infrared photodetectors [J]. *Acta Physica Sinica*(胡伟达,李庆,陈效双,等.具有变革性特征的红外光电探测器,物理学报), 2019, **68**(12): 7-41.
- [16] Yu N, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces [J]. *Nature Materials*, 2014, **13**(2): 139-150.
- [17] Yamada I, Ishihara T, Yanagisawa J. Reflective waveplate with subwavelength grating structure [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2015: **54**(9), 092203.
- [18] Kosulnikov S Y, Yankovskaya E A, Maslovski S I, *et al.* Optimal filling factor of nanorod lenses for subwavelength imaging[J]. *Physical Review A*, 2011, **84**(6):065801.
- [19] Andrews S R, Miller B A. Experimental and theoretical studies of the performance of quantum-well infrared photodetectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 1991, **70**(2): 993-1003.
- [20] Yang Jun. Synthesis and properties of novel Benzocyclobutene monomers [D]. Fudan University(杨军.新型苯并环丁烯(BCB)单体的合成及其树脂性能研究,复旦大学), 2012.
- [21] Skauli T, Kuo P S, Vodopyanov K L, *et al.* Improved dispersion relations for GaAs and applications to nonlinear optics [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, **94**(10): 6447-6455.
- [22] Dini D, Köhler R, Tredicucci A, *et al.* Microcavity Polariton Splitting of Intersubband Transitions [J]. *Physical Review Letters*, 2003, **90**(11):116401.
- [23] Garnett E, Yang P. Light Trapping in Silicon Nanowire Solar Cells[J]. *Nano Letters*, 2010, **10**(3): 1082-1087.
- [24] S.Tibuleac. Guided-mode resonance reflection and transmission filters in the optical and microwave spectral ranges [D]. Arlington: University of Texas, 2001.
- [25] Nga Chen Y, Todorov Y, Askenazi B, *et al.* Antenna-coupled microcavities for enhanced infrared photo-detection. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(3): 031113.
- [26] Mikulla M, Schneider H, Benkhelifa F, *et al.* Passivation of III/V-based compound semiconductor devices using high-density plasma deposited silicon nitride films [J]. *Proceedings-Electrochemical Society*, 2005: 338-349.