

一种可吸收垂直入射光的管状量子阱红外探测器

王晗^{1,2}, 李世龙¹, 甄红楼¹, 李梦瑶^{1,2}, 聂晓飞^{1,2}, 黄高山³, 梅永丰^{3*}, 陆卫^{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;

3. 复旦大学 材料科学系, 上海 200433)

摘要: 基于传统的光刻和化学湿法腐蚀工艺, 通过卷曲技术, 提出一种三维管状量子阱红外探测器。该管状器件相比于未卷曲的平面器件, 在垂直入射光照下, 展现了优良的暗电流、黑体响应和光电流响应率特性曲线。当工作温度 60 K, 偏置电压 0.45 V 时, 管状器件峰值响应率为 20.6 mA/W, 峰值波长 3.62 μm , 最大量子效率 2.3%。从几何光学的角度分析了管状器件的垂直光吸收原理, 进而揭示了一种特殊的光耦合方式。最后, 进一步测试了不同角度入射光照射下的光电流响应率谱。由于微管的近似圆形对称性, 器件具有很宽的视角, 有助于红外探测系统的设计。

关键词: 卷曲微管; 红外探测器; 量子阱; 光耦合

中图分类号: TN362

文献标示码: A

引言

量子阱红外探测器(quantum well infrared photodetector, QWIP)作为 20 世纪 90 年代发展起来的第三代红外探测器, 具有材料生长工艺成熟、器件均匀性好、光响应速度快及波长连续可调等优点^[1-2], 在国防、航空航天、天文观测和民用领域等有广阔的应用前景^[3]。QWIP 基于量子阱的子带跃迁, 即在吸收外界光子后电子从阱内的基态跃迁到第一激发态进而形成光电流来实现红外探测。由于量子阱的一维限制结构(电子在材料生长方向上受限), 只有电场分量沿着量子阱生长方向的入射光才能被其吸收^[4]。因此, QWIP 存在着如何耦合外界光的问题。图 1(a)为最简单的光耦合方式——布儒斯特角耦合^[5], 器件响应和量子效率非常低; 图 1(b)为 45° 边耦合^[6-7], 即入射光从器件边缘打磨出的 45° 斜面入射, 这种方式不适用于大规模的焦平面阵列; 此外, 在器件表面制作出金属或介质光栅、随机发射层或波纹层后, 器件可以实现光栅耦合^[8-10]、随机反射耦合^[11]或波纹耦合^[12], 如图 1(c)、1(d)和 1(e)所示。由于 QWIP 的子带跃迁工作模式, 其量子效率较带间跃迁红外探测器偏小。因此, 为提高 QWIP 的量子效率, 一些具有电磁共振效果的光耦合结构被广泛采用。图 1(f)展示了一种光子晶体耦合结构^[13], 它可以实现器件的窄带增强响应; 图 1(g)和 1(h)分别为金属二维孔洞阵列耦合结构^[14]和金属-绝缘体-金属微腔耦合结构^[15], 同样可以提高器件的量子效率。值得指出的是, 由于利用耦合结构的共振模式, 这些 QWIP 只能实现窄带的响应增强。我们提出一种管状的量子阱红外探测器(tubular QWIP), 其无需额外的结构就能直接吸收垂直入射光, 并具有宽视角和宽频率的响应特点^[16]。

本工作介绍了三维管状量子阱红外探测器的设计和制备, 给出了该器件在 60 K 温度下的暗电流、黑体响应和光电流响应等电学测试结果, 并从几何光学的角度理解了器件吸收垂直入射光的基本原理, 最后探索了器件在不同入射角下的光电流谱。

基金项目: 国家自然科学基金(51322201, 61575213), 上海市科学技术委员会(14JC1400200)

Foundation items: Natural Science Foundation of China (51322201, 61575213), Shanghai Municipal Science and Technology Commission (14JC1400200)

作者简介(Biography): 王晗(1986-), 男, 湖北随州人, 博士研究生, 主要研究领域为三维量子阱红外探测器。E-mail:

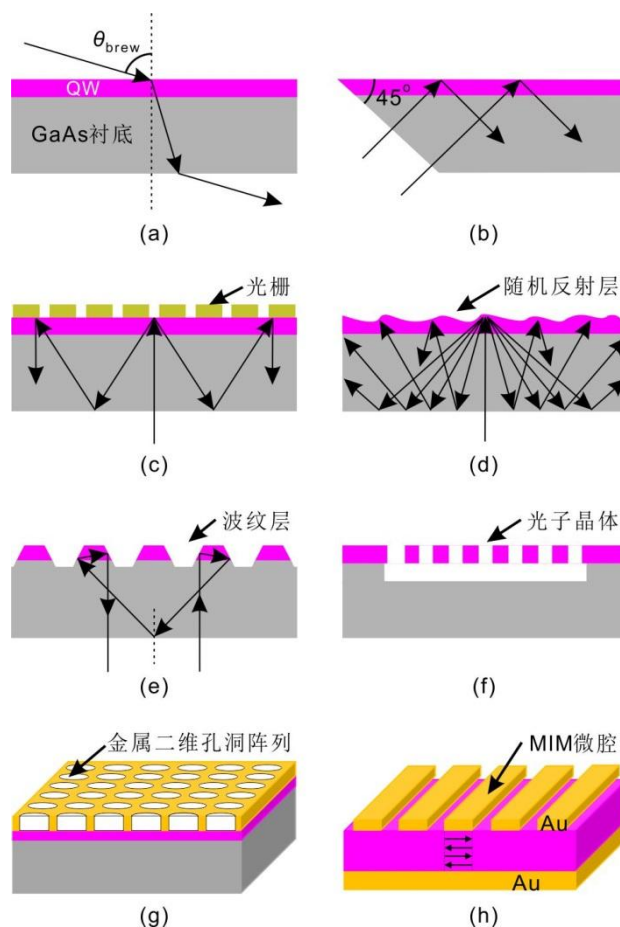


图 1 (a) 布儒斯特角耦合；(b) 45° 边耦合；(c) 光栅耦合；(d) 随机反射耦合；(e) 波纹耦合；(f) 光子晶体耦合；(g) 金属二维孔洞阵列耦合；(h) 金属-绝缘体-金属微腔耦合

Fig. 1 (a) Brewster's angle coupling; (b) 45° edge-facet coupling; (c) Grating coupling; (d) Random reflection coupling; (e) Ripple coupling; (f) Photonic crystal coupling; (g) Two-dimensional metal hole array coupling; (h) Metal-insulator-metal (MIM) microcavity coupling

1 器件设计和制备

器件材料通过分子束外延技术(Molecular Beam Epitaxy, MBE, 型号: Riber compact 21)制备。如图 2(a)所示, 首先将 30 nm 的 AlAs 牺牲层沉积在 GaAs (100)衬底上; 然后生长 20 nm 的 $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 应力层, 提供用于薄膜卷曲的内应力。接着, 依次生长 50 nm 高硅掺杂的 GaAs 下电极层, 2 nm 的 AlAs 腐蚀阻挡层和一个周期的量子阱有源层, 该量子阱由 30 nm 的 $\text{Al}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{As}$ 势垒和 2 nm 的 $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 势阱组成。随后, 30 nm 的硅掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 GaAs 电导层覆盖其上, 用来传导电流。最后沉积的是 2 nm 的 AlAs 腐蚀阻挡层和 190 nm 的高硅掺杂 GaAs 上电极层。其中, 上、下电极层的硅掺杂浓度均为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

器件的制备采用标准的光刻和化学湿法腐蚀工艺。首先, 样品经过光刻和湿法腐蚀依次制作出上电极台面和光吸收区台面, 如图 2(b)所示, 下电极层也暴露出来。此处腐蚀 GaAs 上电极层和量子阱层使用的是配比为 4:1 的柠檬酸/双氧水混合液, 腐蚀 AlAs 阻挡层使用的是浓度为 10% 的氢氟酸溶液。然后, 利用电子束蒸发在上下电极层上沉积 AuGe/Ni/Au 金属

电极，并经过快速热退火处理 (380° 保持 30s) 形成欧姆接触，如图 2(c) 所示。接着，用重铬酸钾、氢溴酸和乙酸混合液（配比为 1:2:1）腐蚀出一个很深的沟道以形成薄膜卷曲的起始边，如图 2(d) 所示。最后，将样品置于氢氟酸稀释液中，图 2(e) 显示随着 AlAs 牺牲层的腐蚀移除，应变薄膜由于内应力的释放开始向上弯曲。在经过一段时间的卷曲后，如图 2(f) 所示一个完整的管状螺旋微管形成。图 2(g) 显示的是制备出的 tubular QWIP 显微照片，微管的直径为 $20.7\ \mu\text{m}$ ，卷曲圈数为 1.8 圈，横向长度为 $600\ \mu\text{m}$ ，未卷曲的平面器件也在图 2(h) 中给出。

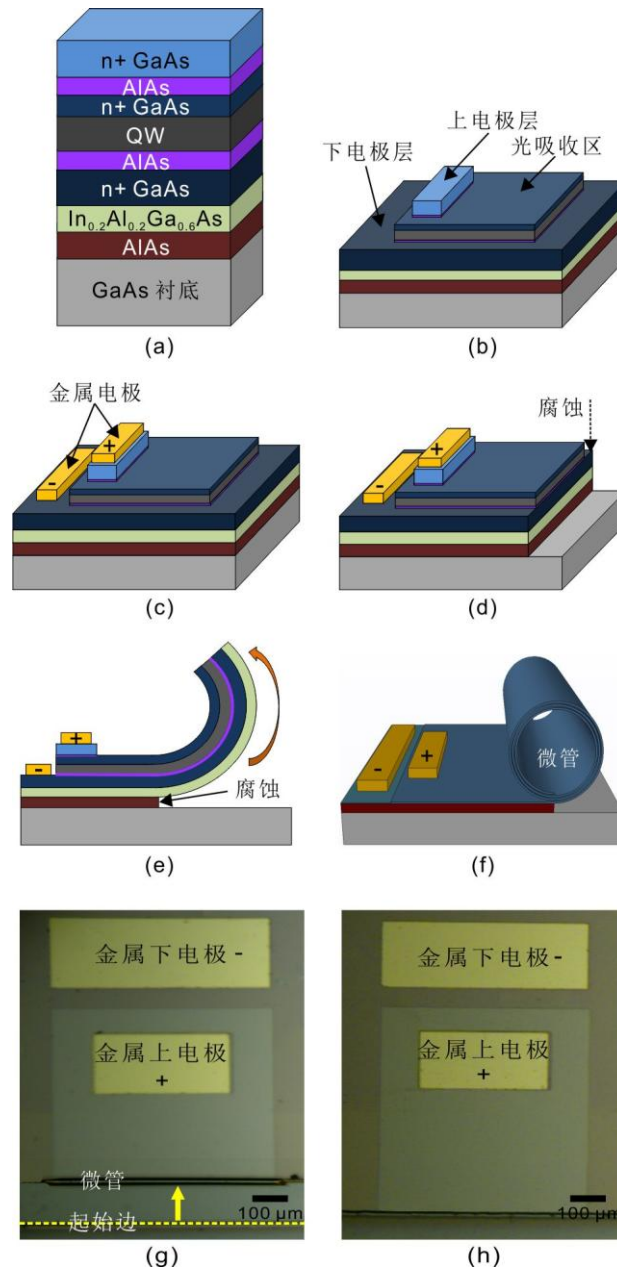


图 2 (a) 材料结构示意图；(b) 上电极层和光吸收区腐蚀；(c) 金属电极沉积；(d) 起始边的深湿法腐蚀；(e) 牺牲层腐蚀导致应力薄膜自卷曲；(f) 管状器件结构示意图；(g) 管状器件的显微照片；(h) 平面器件的显微照片

Fig. 2 (a) Schematic diagram of the material structure; (b) Etching of the top contact layer and the light-absorption region; (c) Deposition of the metal electrodes; (d) Deep wet etching of the starting edge; (e) Self-rolling of the strained nanomembrane caused by the corrosion of the sacrificial layer; (f) Schematic diagram of the tubular

device structure; (g) Microscope image of the tubular device; (h) Microscope image of the planar device

2 器件测试与分析

2.1 器件的电学特性

将制备好的器件封装在变温杜瓦中并设置工作温度为 60 K。在测试暗电流时，为了尽可能地降低背景辐射，需要用锡纸包裹杜瓦内的冷屏。图 3(a)为平面和管状器件在 60 K 下的暗电流测试结果。当应变薄膜卷成微管后，其暗电流与平面器件的基本相同。同时，两个器件的暗电流都表现出在正负偏压下的不对称，即在 -0.2 V 到 -0.4 V 时曲线下凹。这是因为负偏压时紧挨着量子阱的 AlAs 腐蚀阻挡层成为了一个高的势垒，阻挡了暗电流的隧穿。

器件的黑体响应电流利用 SR570 前置放大器和 SR830 锁相放大器锁相获取，外界红外入射光（黑体辐射）的垂直入射如图 3(b)插图所示。从平面和管状器件的黑体响应随偏置电压变化曲线（图 3(b)）可以看出：管状 QWIP 具有极强的黑体吸收，即在 0.48 V 偏压时响应电流达到了 214 pA，对应的峰值黑体响应率为 2.3 mA/W；而平面 QWIP 在大偏压时(0.48 V)也测得到了微小的黑体响应电流，这是由于化学湿法腐蚀过程中器件光吸收区台面的边缘形成了斜坡^[17]（类似于 45° 斜边），从而导致一小部分垂直入射光经此斜坡进入器件而被量子阱吸收。在图 3(b)中，当器件外加偏压为正时才测到黑体响应信号，这是由于负偏压时毗邻量子阱的 AlAs 腐蚀阻挡层同样阻挡了光生载流子的流动。

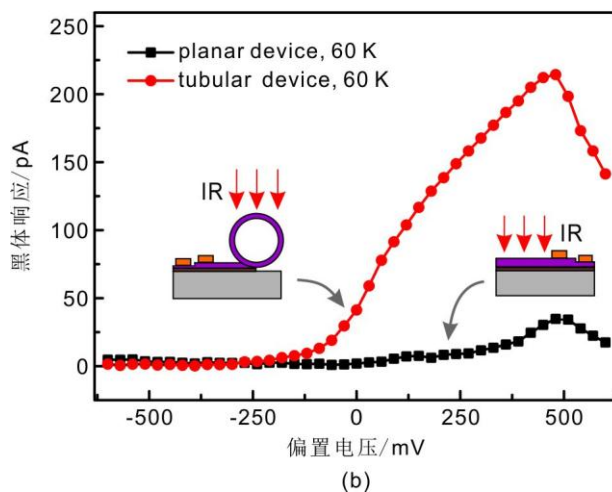
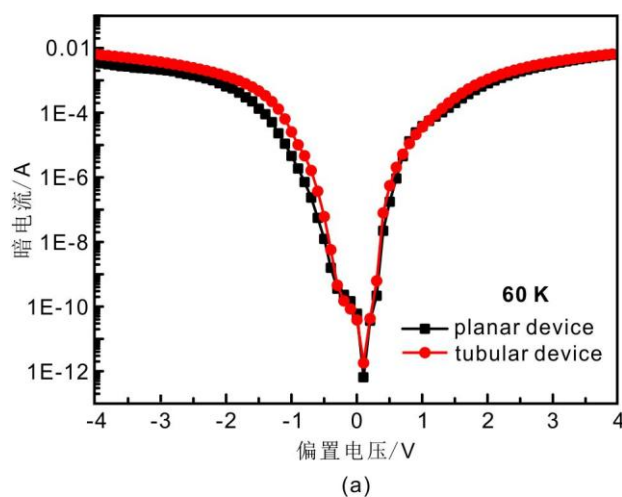


图 3 (a) 平面和管状器件在 60 K 下的暗电流谱； (b) 平面和管状器件在 60 K 温度下黑体响应随偏置电压的变化特性。插图表明外界光垂直照射到器件表面

Fig. 3 (a) Dark current spectra of the planar and tubular devices at 60 K; (b) Plot of the blackbody response as a function of the bias of the planar and tubular devices at 60 K. The insets show that the devices are vertically illuminated by the external light

器件的光电流响应谱通过 Nicolet 6700 傅里叶红外光谱仪的光电流测试系统获取。由于平面器件光响应弱，此处仅测试了管状器件在不同偏压下的光电流响应率谱。如图 4 所示，随着偏置电压的增加，器件的光电流响应率的变化类似于黑体响应先增大再减小，并在 0.45 V 时达到最大峰值 20.6 mA/W，对应的峰值响应波长为 3.62 μm ，该峰位是由量子阱内的基态电子在吸收外界光子后跃迁到连续态形成的光电流导致的。基于 QWIP 的量子效率公式^[1]，即：

$$\eta = \frac{R}{qg_{\text{photo}}} \frac{hc}{\lambda}, \quad (1)$$

其中， R 为器件的光电流响应率， g_{photo} 为光电导增益， λ 为器件的响应波长， q 为电子电荷量， h 为普朗克常数， c 为真空中的光速。计算得知，管状器件在 0.45 V 偏压下的峰值量子效率为 2.3%。在传统的量子阱红外探测器中，单周期量子阱的量子效率一般不超过 1%^[5,6,18]，即小于管状器件的值，表明了三维管状结构能够有效地耦合垂直入射光。图 5 中，偏置电压的变化同时引起了器件峰值响应波长的微小偏移（如虚线所示），这是由于应变薄膜卷成微管后，材料应变态的变化导致了量子阱的能带边发生偏移^[19]，进而当改变外加电场时，量子阱内的能级发生变化即器件响应峰产生微小移动。

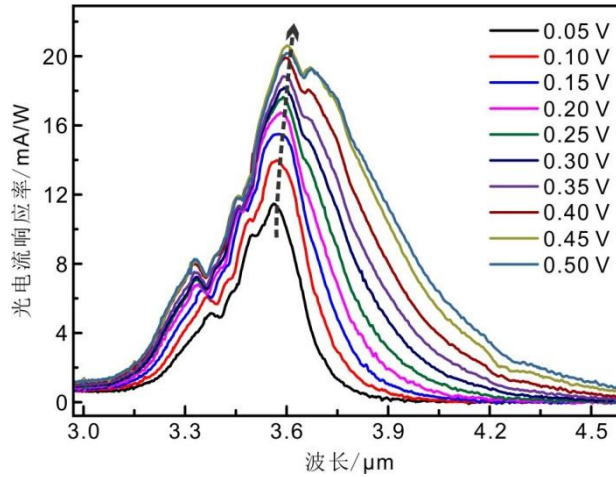


图 4 不同偏压下管状器件的光电流响应率随波长的变化关系

Fig. 4 Photocurrent responsivity as a function of the wavelength of the tubular device under different biases

2.2 管状器件不同入射角下的光响应

对于管状 QWIP 器件，当入射光垂直入射时，如图 65 器件光吸收示意图和插图所示，射向微管侧壁的光线与管壁/空气界面处的法线成夹角 θ (入射角)，在经过管壁折射后仍以 θ (出射角) 进入到微管空腔；光在穿越管壁内的量子阱区域过程中，一部分电场分量平行于法线方向的折射光 I_t 会被量子阱吸收并形成光电流。并且，进入到空腔内的光束穿出管壁时会被再次吸收。由于微管的近似圆形对称结构，仅有射向微管顶部的少量入射光无法被量子阱吸收。因此，三维管状 QWIP 展现出一种新的光吸收原理。这种光耦合方式意味着量子

阱的响应波长几乎不受微管结构的影响，可用于宽波段探测。这是 QWIP 的电磁共振光耦合结构如光栅、光子晶体和 MIM 微腔等所不具备的。

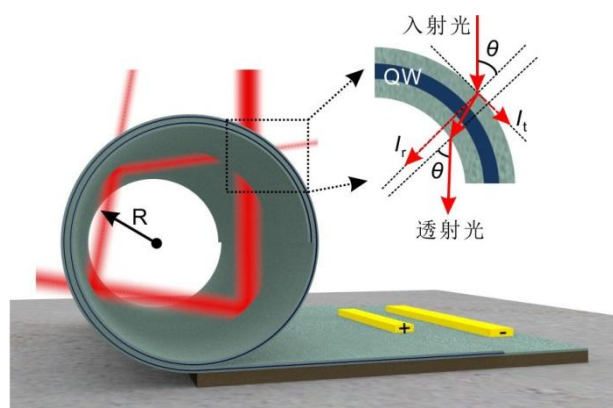


图 5 管状器件光吸收示意图。插图显示出管壁/空气界面处的光路径

Fig. 5 Schematic diagram of the light absorption in tubular devices. The inset shows the light path in the tube wall/air interface

同时，为了进一步研究管状 QWIP 的结构对光耦合的影响，我们测试了器件在 60 K 工作温度和 0.3 V 偏置电压下外界光以 -45° 、 0° 和 45° 角度入射时的光电流响应率谱。如图 76 所示，量子阱的响应光谱形状与峰位（图 6 虚线所示）几乎不受入射角变化的影响，峰值光电流响应率都约为 16 mA/W。这是由于螺旋微管的近似圆形对称结构，导致在不同角度的入射光照下管壁内量子阱的等效吸收面积都保持不变，因而改变入射光方向时器件光响应基本不受影响。众所周知，在传统的平面 QWIP 中，为了确保器件获得最大的响应率和探测率，入射光一般需要垂直照射器件并且入射角的角度变化很小，这加重了红外探测系统的设计难度。因此，我们的管状 QWIP 在 -45° 到 45° 宽角度下响应不变的特性能够为红外探测系统的设计工作带来便利。

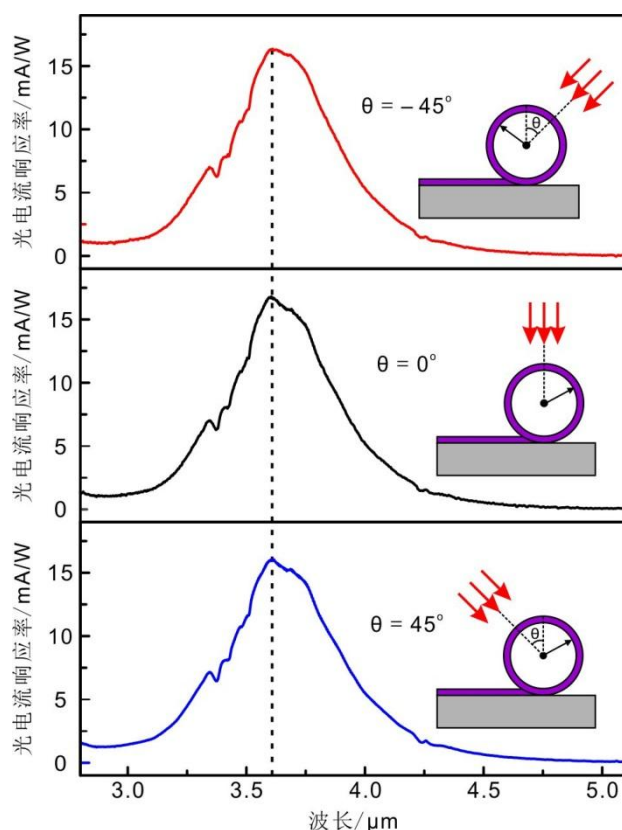


图 6 -45° 、 0° 和 45° 入射角下管状器件的光电流响应率谱。插图为外界光的不同入射角示意图

Fig. 6 Photocurrent responsivity spectra of the tubular device at the incident angles of -45° , 0° and 45° , respectively. The insets show that the devices are illuminated by the external light from different angles

3 结论

基于应变工程提出了一种卷曲型三维管状结构量子阱红外探测器。该设计利用传统的光刻和化学湿法腐蚀实现，具有结构简单和相对易制备的优点。通过与未卷曲的平面器件相对比，研究了该器件的暗电流、黑体响应和光电流响应特性。结果显示，在垂直入射光照射下管状器件能够进行光电转换。器件在工作温度为 60 K 和偏置电压为 0.45 V 时，获得了峰值响应率 20.6 mA/W，峰值波长 3.62 μm ，最大量子效率 2.3%。分析了微管的光吸收原理表明，独特的三维管状结构展现了一种新型的光耦合模式。进一步改变了入射光的照射方向，管状器件的光电流响应率几乎不受影响，这意味着其能够进行宽视角（至少 -45° 到 45° ）的探测。本研究结果为红外探测器的性能优化提供了一种新的思路，呈现出的其它光耦合方式所不具备的优势有助于红外探测系统的设计。

参考文献：

- [1] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **105**(9): 091101.
- [2] YUAN Ji-jun. Review of infrared detector development [J]. *Infrared and Laser Engineering* (袁继俊. 红外探测器发展述评, *红外与激光工程*), 2006, **36**(12): 1099-1102.
- [3] LI Xian-jie, QI Li-fang. Status of the commercialization for quantum well infrared photodetector focal plane array [J]. *Infrared and Laser Engineering* (李献杰, 齐丽芳. 量子阱红

外探测器焦平面阵列的商业化进程, 红外与激光工程), 2007, **36**(z1): 175-183.

[4] Liu H C, Buchanan M, Wasilewski Z R. How good is the polarization selection rule for intersubband transition? [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, **72**(72): 1882-1694.

[5] West L C, Eglash S J. First observation of an extremely large-dipole infrared transition within the conduction band of a GaAs quantum well [J]. *Applied Physics Letters*, 1985, **46**(12): 1156-1158.

[6] 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.

[7] Levine B F, Malik R J, Walker J, *et al.* Strong 8.2 μm infrared intersubband absorption in doped GaAs/AlAs quantum well waveguides [J]. *Applied Physics Letters*, 1987, **50**(5): 273-275.

[8] Zhang R, Guo X G, Song C Y, *et al.* Metal-grating-coupled terahertz quantum-well photodetectors [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2011, **32**(5): 659-661.

[9] Lundqvist L, Andersson J Y, Paska Z F, *et al.* Efficiency of grating coupled AlGaAs/GaAs quantum well infrared detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 1993, **63**(24): 3361-3363.

[10] SHU Xiao-zhou, WU Yan-rui, CHEN Xiao-shuang, *et al.* Finite difference time domain modeling of grating-coupled quantum well infrared photodetector [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (疏小舟, 吴砚瑞, 陈效双, 等. 时域有限差分法模拟量子阱红外探测器光栅的耦合, 红外与毫米波学报), 2004, **23**(6): 401-404.

[11] 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.

[12] Chen C J, Choi K K, Chen W H, *et al.* Corrugated quantum well infrared photodetectors [C]. *Proc. of SPIE, Infrared Technology and Applications XXIII*, 1997, **3061**: 728-738.

[13] Kalchmair S, Detz H, Cole G D, *et al.* Photonic crystal slab quantum well infrared photodetector [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **98**(1): 011105.

[14] Wu W, Bonakdar A, Mohseni H. Plasmonic enhanced quantum well infrared photodetector with high detectivity [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**(16): 161107.

[15] LI Qian, LI Zhi-feng, LI Ning, *et al.* High-polarization-discriminating infrared detection using a single quantum well sandwiched in plasmonic micro-cavity [J]. *Scientific Report*, 2014, **4**(5): 934-949.

[16] WANG Han, ZHEN Hong-lou, LI Shi-long *et al.* Self-rolling and light-trapping in flexible quantum well-embedded nanomembranes for wide-angle infrared photodetectors [J]. *Science Advances*, 2016, **2**(8): e1600027.

[17] LUO Yue-chuan, HAN Shang-jun, WANG Xue-min, *et al.* Steepness of the etching of GaAs/AlGaAs multilayer [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Engineering* (罗跃川, 韩商君, 王雪敏, 等. GaAs/AlGaAs 多层膜刻蚀的陡直度, 太赫兹科学与电子信息学报), 2011, **9**(3): 347-350.

[18] Schneider H, Liu H C. *Quantum well infrared photodetectors: Physics and Applications* [M].

Berlin: Springer-Verlag, 2007, 21-27.

[19] Binder R, Gu B, Kwong N H. Quantum-confined strain gradient effect in semiconductor nanomembranes [J]. *Physical Review B*, 2014, **90**(19): 195208.

A tubular quantum well infrared photodetector under vertically-incident light coupling

WANG Han^{1,2}, LI Shi-long¹, ZHEN Hong-lou¹, LI Meng-yao^{1,2}, NIE Xiao-fei^{1,2}, HUANG Gao-shan³, MEI Yong-feng^{3*}, LU Wei^{1*}

(1. National Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Department of Materials Science, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: A three-dimensional tubular quantum well infrared photodetector (QWIP) was demonstrated via rolled-up technology, which was on the basis of conventional lithography and wet chemical etching. When the tubular QWIPs and the corresponding planar devices were illuminated by the vertically-incident light, their dark current, blackbody response, and photocurrent responsivity spectra were characterized. Under the operating temperature of 60 K and the bias of 0.45 V, a peak responsivity of 20.6 mA/W and a peak quantum efficiency of 2.3% at the peak response wavelength of 3.62 μm were obtained in the tubular devices. By clarifying the principle of optical absorption, the tubular QWIP presents a novel optical coupling manner. The device photocurrent responsivity spectra for the external light were further studied at different incident angles. It is shown, that as the approximate circular symmetry of the microtubes, the tubular devices have a wide perspective, which is advantageous to the design of infrared detection system.

Key words: rolled-up microtube, infrared photodetector, quantum well, optical coupling