



长波红外焦平面材料及器件专题·论文

长波和甚长波及其双色 InAs/GaSb 二类超晶格红外探测器的研究进展

张艳华^{①*}, 马文全^①, 卫炆^①, 黄建亮^①, 曹玉莲^①, 崔凯^①, 郭晓璐^①, 邵军^②

① 中国科学院半导体研究所, 纳米光电子实验室, 北京 100083;

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

*联系人, E-mail: zhangyanhua@semi.ac.cn

收稿日期: 2013-09-18; 接受日期: 2013-11-22; 网络出版日期: 2014-02-11

国家自然科学基金资助项目(批准号: 61290303, 61176014, 61307116, 61021003)

摘要 本文报道了基于 InAs/GaSb 二类超晶格实现长波、甚长波及窄带长波/甚长波双色红外探测器的研究, 生长的材料具有极高的材料质量. 长波探测器单管器件在 77 K 条件下 50%截止波长为 9.6 μm , 峰值响应为 3.2 A/W, 峰值量子效率为 51.6%; 甚长波红外探测器单管器件在 77 K 条件下 50%截止波长为 14.5 μm , 量子效率为 14%, 热噪声限制的探测率为 $4.3 \times 10^9 \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$. 通过改变偏压极性实现双色探测的窄带型长波/甚长波 InAs/GaSb 二类超晶格红外探测器两端器件, 偏压小于 0 V 时在长波区工作, 偏压大于 40 mV 时, 在甚长波区工作. 具体来说, 偏压为 -0.1 V 时, 器件光响应 50% 截止波长为 10 μm ; 而偏压为 40 mV 时, 器件光响应 50%截止波长为 16 μm . 对于长波光响应, $\delta\lambda/\lambda$ 为 44%, 对于甚长波响应, $\delta\lambda/\lambda$ 为 46%. 甚长波对长波的串音为 9.9%, 长波对甚长波的串音为 11.8%.

关键词 InAs/GaSb 二类超晶格, 红外探测器, 长波, 甚长波, 双色**PACS:** 85.60.Gz, 68.65.Cd**doi:** 10.1360/SSPMA2013-00070

1 引言

长波、甚长波及其双色红外探测器在军事和民事方面都有重要应用, 其应用涵盖航天、国防、生物医学、环保等诸多领域. 目前能实现长波、甚长波及其双色红外探测的材料主要包括 InAs/GaSb 二类超晶格、HgCdTe (MCT)和量子阱红外(QWIP)等材料^[1],

其中 InAs/GaSb 超晶格具有二型能带结构^[2], 即 InAs 的导带底比 GaSb 的价带顶还要低, 从而电子和空穴在空间上分离, 空穴主要束缚在 GaSb 中, 而电子主要分布在 InAs 中, 但电子因为具有较小的有效质量而在超晶格中形成微带. 可以通过调节超晶格的周期厚度及 InAs 与 GaSb 的层厚比控制电子与空穴跃迁的“带隙”, 即控制带间跃迁的波长. 二类超晶格材

引用格式: 张艳华, 马文全, 卫炆, 等. 长波和甚长波及其双色 InAs/GaSb 二类超晶格红外探测器的研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 390–395
Zhang Y H, Ma W Q, Wei Y, et al. Long wavelength, very long wavelength and narrow-band long-/very-long wavelength two-color type-II InAs/GaSb superlattice photodetectors (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2014, 44: 390–395, doi: 10.1360/SSPMA2013-00070

料的带间跃迁波长可以覆盖约 2–30 μm 的范围. 另外, 二类超晶格结构中俄歇复合及隧穿电流可以被极大地抑制^[3], 并具有载流子复合寿命长、材料均匀性好等优点, 尤其是当探测波长在长波(8–12 μm)及甚长波(大于 14 μm)波段时, InAs/GaSb 二类超晶格与量子阱材料及传统的 HgCdTe 材料相比, 具有较为明显的优势. 与量子阱材料相比, 二类超晶格探测器利用“带间”跃迁, 量子效率较高, 而量子阱红外探测器利用子带跃迁, 量子效率低; 对于焦平面器件, 它和量子阱红外探测器不同, 无需制作表面光栅. 与 HgCdTe 材料相比, 其俄歇复合可以被较大地抑制, 同时在二类超晶格中, 电子有效质量大约是 HgCdTe 材料的三倍, 这可以有效地抑制一些隧穿效应, 从而降低暗电流; 另外, HgCdTe 探测器随着波长增长, 其材料和工艺难度急剧增大, 且成本极为昂贵, InAs/GaSb 超晶格材料波长调节比 HgCdTe 容易, 同时材料具有价格便宜与极高的均匀性等特性, 尤其适合制作大面阵红外焦平面器件, 因此, InAs/GaSb 二类超晶格探测器在长波及甚长波波段具有非常明显的优势.

2 器件结构设计

2.1 长波器件结构设计

InAs/GaSb 二类超晶格界面类型对探测器性能有较大的影响^[4–8], 在长波器件结构设计方面, 设计了两种超晶格的界面类型, 样品 A 采用所谓的“InSb 界面”, 即 InAs 与 GaSb 两个界面都采用 InSb 界面, 样品 B 采用混合界面即“InAs 在 GaSb 上”界面处采用 GaAs 界面, “GaSb 在 InAs 上”界面处采用 InSb 界面. 样品 A, B 器件结构都采用 pin 结构, p 区采用 Be 掺杂的 100 周期的 InAs(8ML)/GaSb (8ML) 超晶格, 掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, n 区采用 Si 掺杂的 100 周期的 InAs(8ML)/GaSb (8ML) 超晶格, 掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, i 区采用非有意掺杂的 300 周期的 InAs(13ML)/GaSb (8.5ML) 超晶格.

2.2 甚长波器件结构设计

样品 e 甚长波器件结构采用 pin 结构, p 区采用 Be 掺杂的 100 周期的 InAs(8ML)/GaSb(8ML)超晶格, 掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, n 区采用 Si 掺杂的 100 周期的 InAs(8ML)/GaSb (8ML) 超晶格, 掺杂浓度为

$2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, i 区采用非有意掺杂的 250 周期的 InAs (16.2ML)/GaSb (10.75ML)超晶格.

2.3 窄带长波/甚长波双色器件结构设计

窄带响应对双色、多色至关重要, 它能有效地减少光学串音, 降低虚警率. 但是由于 InAs/GaSb 超晶格红外探测器利用的是 InAs/GaSb 带间跃迁, 高于 InAs 和 GaSb 的价带基态与导带基态能量差的光子, InAs/GaSb 超晶格都能吸收或响应. 因此, InAs/GaSb 的光响应谱为以带阶能量对应波长为 50%截止波长, 向短波方向的宽光谱. 既然 InAs/GaSb 二类超晶格红外探测器从本质上是宽光谱, 那么如何实现窄光谱呢, 我们采用吸收波长较短的 InAs/GaSb 超晶格生长在吸收波长较长的超晶格上作为低通滤波器, 吸收掉短波边的光, 从而使本征区超晶格的宽谱探测变为窄光谱探测. 在此用一个简单模型来说明这个设计原理, 忽略电子、空穴态之间跃迁的具体细节. 图 1(a)展示了两个不同超晶格结构的吸收光谱. 50%截止吸收波长较长的超晶格命名为 SLs1, 其吸收光谱命名为 Band1; 50%截止吸收波长较短的超晶格命名为 SLs2 其光谱命名为 Band2. Band1 和 Band2 为归一化光谱, 假设两者具有相似的峰值吸收强度, Band1 的 50%截止波长为 λ_1 , Band2 的 50%截止波长为 λ_2 , 则 $\lambda_2 < \lambda_1$. 超晶格 SLs2 生长在超晶格 SLs1 上, 进入红外探测器的光首先被超晶格 SLs2 所吸收, 则透射光谱为 1-Band2, 光继续通过超晶格 SLs1 形成的吸收光谱为 Band3 ((1-Band2)×Band1)), 即为具有吸收峰值波长在 λ_p 处的窄带吸收光谱, 从而实现了超晶格吸收光谱从宽光谱 Band1 成为窄光谱 Band3. 也就是说, 如果两个 50%吸收截止波长、强度和吸收光谱波形都相近的两个宽光谱, 使用 50%吸收截止波长较短的超晶格作为 50%吸收截止波长较长超晶格的低通滤波器, 则总的吸收光谱就会成为一个窄光谱.

基于这个原理, 我们设计了样品 f 长波/甚长波窄带双色红外探测器结构, 如图 1(b)所示. 这个器件结构为两个 n-i-p 结构背靠背公用一个 p 型掺杂超晶格形成的 n-i-p-i-n 型结构. 本器件结构为正入射结构, 沿着生长方向, 底层 n 型掺杂区由 150 周期的 InAs(8ML)/GaSb(8ML)超晶格组成, 使用 Si 在 InAs 层进行掺杂, 掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 其 50%吸收截止波长为 5 μm . 中间 p 型掺杂区为 100 周期的 InAs(15.2ML)/GaSb(10ML)超晶格, 使用 Be 在 GaSb 里进行 p

型掺杂, 其 50%吸收截止波长为 13 μm . 顶层 n 型掺杂区是由 100 周期的 50%吸收截止波长为 7 μm 的 InAs(10.3 ML)/GaSb(8 ML)超晶格与 20 nm 厚的 InAs 上接触层构成, 两者都使用 Si 在 InAs 层进行掺杂, 掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. 下本征区是由 260 周期的 InAs(16.2 ML)/GaSb(10.75 ML)超晶格组成的吸收层, 其中 50%吸收截止波长为 14.5 μm . 上本征区是由 300 周期的 InAs(13 ML)/GaSb(8.5 ML)超晶格组成, 其 50%吸收截止波长为 9.6 μm . 如果沿着光进入器件的方向看, 光依次被 50%吸收截止波长为 7, 9.6, 13 和 14.5 μm 的超晶格吸收^[9].

3 X 射线双晶衍射

使用 Bede D1 高分辨 X 射线衍射仪对样品的晶体

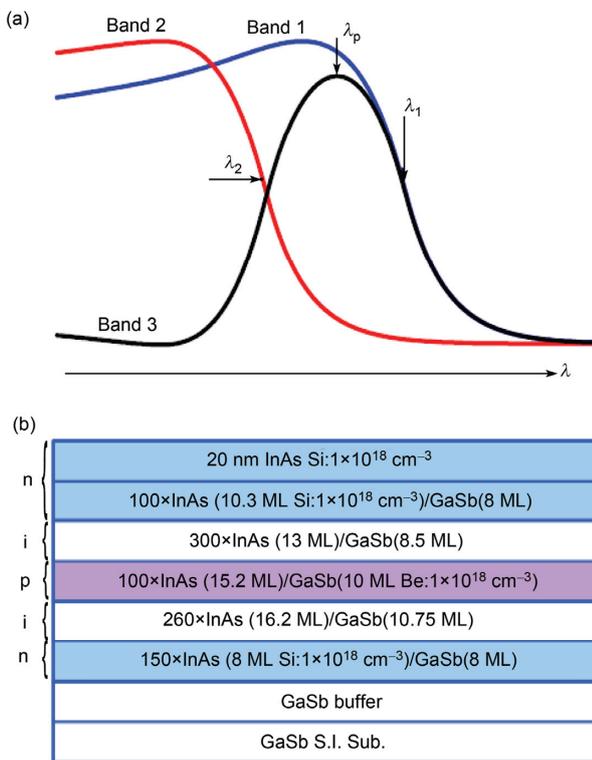


图 1 (网络版彩图)用两个宽光谱形成窄带光谱(a)和窄带长波/双色器件 n-i-p-i-n 结构(b)示意图^[9]

Figure 1 (Color online) Schematic drawings of two absorption spectra of two different Superlattice (SL) structures, denoted as bands 1 and 2 (a). If the infrared light incident to the SL structure with the absorption of band 1 is first absorbed by the SLs with the absorption of band 2, the absorption will be changed from band 1 to peak like band 3. Schematic drawing of the grown structure of the n-i-p-i-n detector (b) [9].

质量进行测试, 测试条件为: 探测器前不加狭缝, 采用 ω - 2θ 扫描方式, ω 扫描的步进为 0.001° 在 GaSb (004) 衍射附近的 ω - 2θ 扫描曲线. 图 2 曲线 a, b 展示了样品 A (上面的曲线), 样品 e (下面的曲线) 在 GaSb (004) 衍射附近的 ω - 2θ 扫描曲线. 由图 2 曲线 a 可以看到两组非常清晰的卫星峰, 一组是由于长波本征区超晶格产生的, 用“L”来命名它们; 另一组是由 p 和 n 区超晶格产生的, 用“M”来命名它们, 从曲线 a “L”组的卫星峰之间的间距可以计算出样品 A 一个周期的厚度, 经过计算, 样品 A 的一个周期的厚度为 65.1 \AA , 数值都非常接近设计值. 根据图 2 曲线 a 可以计算出样品 A 本征区超晶格与衬底的失配度为 3.1×10^{-4} , 由于样品 A 0 级卫星与峰衬底的峰值几乎完全重合, 因此很难准确计算样品 A 的 0 级卫星峰的半高宽, 因此选择样品的 -1 级卫星峰的半高宽来表征其晶体质量. 样品 A -1 级卫星峰的半高宽为 24 s, 说明具有非常高的晶体质量. 同样由图 2 曲线 b 计算出样品 e 甚长波器件的本征区厚度为 82 \AA , 数值非常接近设计值. 另外, 计算出样品 e 本征区超晶格与衬底的失配度为 7.9×10^{-4} , 样品 e-1 级卫星峰的半高宽为 21 s.

4 单管器件制作及其性能

采用标准光刻及湿法腐蚀技术把样品 A, B 制作成两端单管器件, 使用基于 Bruker Vertex 70 傅里叶光谱仪的光电流谱测试系统在相同的条件下测试了 2

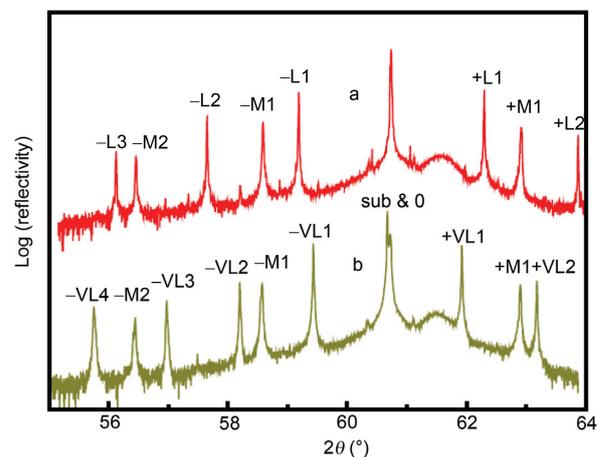


图 2 (网络版彩图)长波(a 曲线)和甚长波(b 曲线)p-i-n 型器件结构 GaSb(004) X 射线双晶衍射曲线

Figure 2 (Color online) X-ray diffraction curves of the ω - 2θ scan around the GaSb (004) reflection for long wavelength (LW) A and very-long wavelength (VLW) B samples.

个样品的光电流谱. 由于采用此光电流谱测试系统测出的是相对光谱, 绝对光响应谱, 是通过测量黑体响应来校准光电流谱获得的. 图 3(a)展示了样品 A, B 在 77 K, 零偏压, 黑体温度为 800 K 相同测试条件下获得的响应光谱. 样品 A, B 的响应最大值都在 7.7 μm , 响应值分别为 3.2 A/W, 2.2 A/W, 量子效率为 51.6%, 35%, 样品 A 响应最大值约为样品 B 的 1.5 倍; 样品 A 50%吸收截止波长为 9.6 μm , 响应值为 1.6 A/W, 量子效率为 20.8%而样品 B 50%吸收截止波长为 10 μm , 响应值为 1.1 A/W, 量子效率为 13.5%^[10].

在 77 K, 相同测试条件下, 测试了样品 A, B 的暗电流与偏压的关系, 并计算出动态电阻与偏压的关系如图 3(b)所示, 图 3(b)中插入图为样品 A, B 的暗电流与偏压的关系, 从图 3 上可以看出两者在 0 V 附近差别非常小, 几乎完全重合. 但随着负偏压的增大, 两条线慢慢分开, 这种趋势在两者的动态电阻随偏压的关系图中更明显. 在零偏压时, 样品 A 和样品 B 的动态电阻比较接近, 但随着负偏压的增加, 与样品 A 相比, 样品 B 的动态电阻随着偏压的增加开始急速下降. 这可能是由于样品 B GaAs 界面处存在 As-Ga 反位缺陷, 此反位缺陷是施主^[10], 因此可能吸引电流而引起电流阻塞, 导致早期击穿机制, 从而导致混合界面超晶格探测器的动态电阻随偏压快速衰减. 基于此我们首次提出这种 As-Ga 反位缺陷的存在可能是 InSb 型界面优于混合型界面的物理原因^[11].

图 4 展示了样品 e 在 77 K, 零偏压条件下光响应谱. 样品 e 的响应最大值在 7.7 μm , 量子效率为 50%; 50%吸收截止波长为 14.3 μm , 量子效率为 14%, 其热噪声限制下的探测率为 $4.3 \times 10^9 \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ ^[12].

对于样品 f, 由于上下电极都是 n 电极, 在此定义上 n 型电极接负电极, 下 n 型电极接正电极为正偏压. 77 K 条件下, 分别在 -0.1 V 和 40 mV 偏压条件测了器件 n-i-p-i-n 的光响应谱, 并相应计算出量子效率, 如图 5 所示, 样品在偏压为 -0.1 V 时, 器件响应峰值在 8 μm , 50%截止波长为 10 μm , 在长波响应范围. 通过计算得出长波光响应谱的 $\delta\lambda/\lambda$ 为 44%, 是窄光谱. 在响应峰值 8 μm 处的响应值为 3.2 A/W, 量子效率为 50%, 在 10 μm 处, 响应值为 1.6 A/W, 量子效率为 23%. 当所加偏压为正偏压 40 mV 时, 器件响应峰值在 13 μm , 50%截止波长为 16 μm , 在甚长波波段. 通过计算得出甚长波光响应谱的 $\delta\lambda/\lambda$ 为 46%, 也是窄光谱. 在响应

峰值 13 μm 处的响应值为 0.61 A/W, 在 16 μm 处, 响应值为 0.3 A/W, 量子效率为 2.4%^[9].

在双色和多色探测器中不同波段间的串音对红外探测器的性能影响很大, 串音是影响双色和多色探测器性能的重要参数. 根据文献[13], 光学串音的定义: 两个波段交叠部分的光谱响应总量与其中一个波段的光谱响应总量的比值. 就设计的长波/甚长波双色两端器件来说, 其在偏压 -0.1 V 和 40 mV 的光谱如图 5(a)所示. 计算出甚长波对长波的串音为

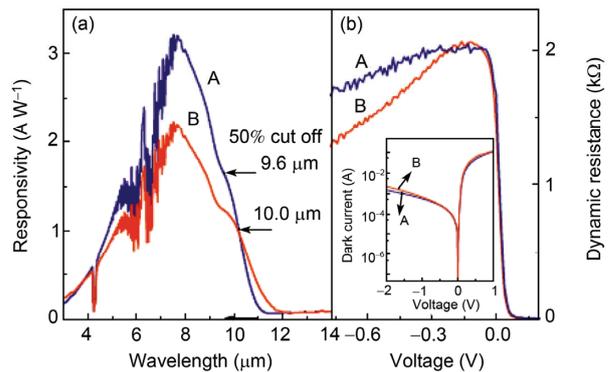


图 3 (网络版彩图) 样品 A InSb 界面和样品 B 混合界面在 77 K, 零偏压时的光响应光谱(a)和样品 A, B 在 77 K 时动态电阻与偏压的关系(b)(插入图为两个样品在 77 K 时暗电流与偏压的关系^[11])

Figure 3 (Color online) Spectral responsivity of the two samples with the InSb-like A and the mixed Interfaces (IFs) B measured at zero bias at 77 K (a) and dependence of the dynamic resistance on the applied bias voltages of the two samples at 77 K. The inset of (b) shows the dark current curves of the two samples also measured at 77 K [11].

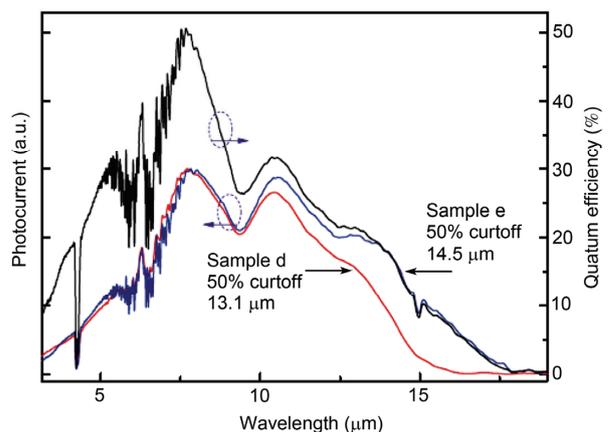


图 4 (网络版彩图) 甚长波器件的光响应谱^[12]
Figure 4 (Color online) Photocurrent of the sample of VLW infrared detector [12].

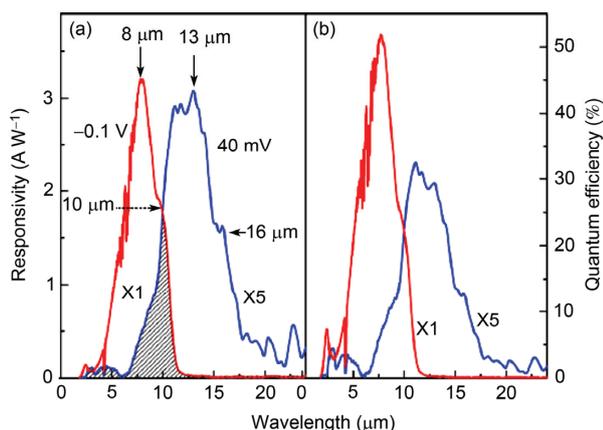


图 5 (网络版彩图) 在 77 K, -0.1 V, 40 mV 时的光响应谱 (a)(阴影部分为两个光谱的交叠部分)和两个波段量子效率与波长的关系(b)^[9]

Figure 5 (Color online) Spectral responsivity with the shaded area denoting the spectral overlap measured at the bias voltage of -0.1 V and 40 mV at 77 K (a) and dependence of quantum efficiency on wavelength for the two bands (b) [9].

9.9%; 而长波对甚长波的串音为 11.8%。这表明两个

波段间的串音还是较小的, 达到了预期目的。

5 结论

设计了 InAs/GaSb 二类超晶格长波、甚长波及窄带长波/甚长波红外探测器器件结构, 生长的材料具有极高的材料质量。长波探测器单管器件在 77 K 条件下 50%截止波长为 9.6 μm , 峰值响应为 3.2 A/W, 峰值量子效率为 51.6%; 甚长波红外探测器单管器件, 77 K 条件下, 50%截止波长为 14.5 μm , 量子效率 14%, 热噪声限制的探测率为 4.3×10^9 $\text{cm Hz}^{1/2} \text{W}^{-1}$; 通过改变偏压极性实现双色探测的窄带型长波/甚长波 InAs/GaSb 二类超晶格红外探测器。此器件在偏压小于 0 V 时, 在长波区工作; 在偏压大于 40 mV 时, 在甚长波区工作。具体来说, 在 -0.1 V 偏压时, 器件光响应 50%截止波长为 10 μm ; 而在偏压为 40 mV 时, 器件 50%截止波长为 16 μm 。对于长波光响应, $\delta\lambda/\lambda$ 为 44%, 对于甚长波响应, $\delta\lambda/\lambda$ 为 46%。甚长波对长波的串音为 9.9%, 长波对甚长波的串音为 11.8%。

参考文献

- 1 Tidrow M Z. New infrared sensors for ballistic missile defense. Proc of SPIE, 2005, 5732: 217–224
- 2 Smith D L, Mailhot G. Proposal for strained type II superlattice infrared photodetector. J Appl Phys, 1987, 62: 2545–2548
- 3 Youngdale E R, Meyer J R, Hoffman C A, et al. Auger lifetime enhancement in InAs/GaInSb superlattices. Appl Phys Lett, 1994, 64(23): 3160–3162
- 4 Tuttle G, Kroemer H, English J H. Effects of interface layersequencing on the transport properties of InAs/AlSb quantum wells: Evidence for antisite donors at the InAs/AlSb interface. J Appl Phys, 1990, 67(6): 3032–3037
- 5 Herres N, Fuchs F, Schmitz J, et al. Effect of interfacial bonding on the structural and vibrational properties of InAs/GaSb superlattices. Phys Rev B, 1996, 53(23): 15688–15705
- 6 Booker G R, Klipstein P C, Lakrimi M, et al. Growth of InAs/GaSb source strained layer superlattices. II. J Cryst Growth, 1995, 146: 495–502
- 7 Lew A Y, Zuo S L, Yu E T, et al. Anisotropy and growth-sequence dependence of atomic-scale interface structure in InAs/Ga_{1-x}In_xSb superlattices. Appl Phys Lett, 1997, 70: 75–77
- 8 Kaspi R, Steinshnider J, Weimer M, et al. As soak control of the InAs-on-GaSb interface. J Cryst Growth, 2001, 225: 544–549
- 9 Zhang Y H, Ma W Q, Wei Y, et al. Narrow-band long-/very-long wavelength two-color type-II InAs/GaSb superlattice photodetector by changing the bias polarity. Appl Phys Lett, 2012, 100: 173511
- 10 Tuttle G, Kroemer H, English J H. Effects of interface layer sequencing on the transport properties of InAs/AlSb quantum wells: Evidence for antisite donors at the InAs/AlSb interface. J Appl Phys, 1990, 67: 3032–3037
- 11 Zhang Y H, Ma W Q, Cao Y L, et al. Long wavelength infrared InAs/GaSb superlattice photodetectors with InSb-like and mixed interfaces. IEEE J Quantum Electron, 2011, 47: 1475–1479
- 12 Wei Y, Ma W Q, Zhang Y H, et al. High structural quality of type II InAs/GaSb superlattices for very long wavelength infrared detection by interface control. IEEE J Quantum Electron, 2012, 48: 512–515
- 13 Nedelcu A, Marcadet X, Huet O, et al. Spectral cross-talk in dual-band quantum well infrared detectors. Appl Phys Lett, 2006, 88: 191113

Long wavelength, very long wavelength and narrow-band long-/very-long wavelength two-color type-II InAs/GaSb superlattice photodetectors

ZHANG YanHua^{1*}, MA WenQuan¹, WEI Yang¹, HUANG JianLiang¹, CAO YuLian¹,
CUI Kai¹, GUO XiaoLu¹ & SHAO Jun²

¹Laboratory of Nano-Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

²National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute for Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

We have demonstrated a long wavelength (LW), a very-long wavelength (VLW) and a narrow-band two-color LW/VLW photodetectors using type-II InAs/GaSb superlattice (SL) materials. For all the detection wavelengths, very high-quality type-II InAs/GaSb SL materials have been grown by molecular beam epitaxy. For the LW device, at 77 K, the achieved 50% cutoff wavelength is 9.6 μm and the maximum response is at 7.7 μm with the responsivity of 3.2 A/W. For the VLW device, at 77 K, the 50% cutoff wavelength is 14.5 μm and the corresponding quantum efficiency is 14%. The Johnson noise limited detectivity D^* is $4.3 \times 10^9 \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ at 14.5 μm . For the first time, we demonstrate a narrow-band two-color detector using type-II InAs/GaSb SL structures. The LW/VLW two-color detector is a two-terminal device and the detection is achieved by changing the bias polarity. The device responds to the LW range when the bias voltage is smaller than 0 V while it works for the VLW range when the bias voltage is larger than 40 mV. Concretely, at 77 K, the 50% cutoff wavelength is 10 μm when the bias voltage is -0.1 V, and is 16 μm when the bias voltage is 40 mV. The achieved $\delta\lambda/\lambda$ is 44% for the LW photoresponse and is 46% for the VLW photoresponse. The spectral crosstalk of the VLW band to the LW band is 9.9% while that of the LW band to the VLW band is 11.8%.

type-II InAs/GaSb superlattice, infrared detectors, long wavelength, very long wavelength, two-color

PACS: 85.60.Gz, 68.65.Cd

doi: 10.1360/SSPMA2013-00070