

长波 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器

周易^{1,2}, 陈建新¹, 徐庆庆¹, 徐志成^{1,2}, 靳川^{1,2,3}, 许佳佳¹, 金巨鹏^{1,2}, 何力¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外材料与器件重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3. 暨南大学光电工程研究所, 广东 广州 510632)

摘要:报道了 50% 截止波长为 12.5 μm 的 InAs/GaSb II 类超晶格长波红外探测器材料及单元器件. 实验采用分子束外延技术在 GaSb 衬底上生长超晶格材料. 吸收区结构为 15ML(InAs)/7ML(GaSb), 器件采用 PBIN 的多层异质结构以抑制长波器件暗电流. 在 77K 温度下测试了单元器件的电流-电压(I-V)特性, 响应光谱和黑体响应. 在该温度下, 光敏元大小为 100 μm \times 100 μm 的单元探测器 $R_{\text{max}}A$ 为 2.5 Ωcm^2 , 器件的电流响应率为 1.29 A/W, 黑体响应率为 2.1 $\times 10^9 \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 11 μm 处量子效率为 14.3%. 采用四种暗电流机制对器件反向偏压下的暗电流密度曲线进行了拟合分析, 结果表明起主导作用的暗电流机制为产生复合电流.

关键词: InAs/GaSb II 类超晶格; 长波 12.5 μm ; 暗电流

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Long wavelength infrared detector based on Type-II InAs/GaSb superlattice

ZHOU Yi^{1,2}, CHEN Jian-Xin¹, XU Qing-Qing¹, XU Zhi-Cheng^{1,2},
JIN Chuan^{1,2,3}, XU Jia-Jia¹, JIN Ju-Peng^{1,2}, HE Li¹

(1. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. College of Science and Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: A 12.5 μm long wavelength infrared detector based on InAs/GaSb Type-II superlattice was presented in this work. Superlattice materials were grown on GaSb substrates using MBE technology. Absorber structure for long wavelength detector was designed to be 15ML(InAs)/7ML(GaSb). The detector used a PBIN multiple heterostructures to decrease the dark current. The dark current *I-V* curve, responsivity spectra and blackbody current responsivity were measured at 77 K. At this temperature, $R_{\text{max}}A$ product was 2.5 Ωcm^2 for the device with a photo sensitive area of 100 μm \times 100 μm . At zero bias, a current responsivity of 1.29 A/W was measured for the detector, which correspond to a blackbody detectivity of 2.1 $\times 10^9 \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$. Quantum efficiency at 11 μm was measured to be 14.3%. Dark current characteristics were simulated with four kinds of probable transport mechanisms. The results showed that the dominated dark current of the detector is Generation-Recombination current.

Key words: InAs/GaSb superlattice; long wavelength; dark current

PACS: 85.60.Gz

引言

InAs/GaSb II 类超晶格概念自 1977 年被 Esaki^[1]等提出以后, 受到了很多研究小组广泛的关注,

在国际上发展极为迅速^[2-4]. InAs/GaSb II 类超晶格材料体系被认为是一种有前途的红外探测的替代技术, 该技术基于材料性能稳定, 均匀性好, 工艺成熟的 III-V 族化合物半导体材料体系, 并且其理论预期

收稿日期: 2012-04-12, 修回日期: 2012-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(61176082)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61176082)

作者简介 (Biography): 周易 (1986-), 男, 江苏南通人, 中国科学院上海技术物理研究所, 博士, 主要从事 II 类超晶格红外探测器材料与器件研究. E-mail: zhouyi@mail.sitp.ac.cn.

Received date: 2012-04-12, **revised date:** 2012-06-28

的探测性能可以超越碲镉汞技术,对发展下一代红外焦平面探测器技术具有十分明确的应用前景.尤其对于长波波段,实验报道的 InAs/GaSb II 类超晶格单元探测器的峰值探测率等关键性能均可以与 HgCdTe 相比拟,展现出极其光明的应用前景^[5-6].

暗电流是影响长波红外探测器性能的关键参数.对于超晶格红外探测器,降低暗电流尤为迫切.近年来,研究人员采用了各种新型的探测器结构,用来抑制 InAs/GaSb 超晶格长波探测器的暗电流,以获得高性能的长波红外探测器,如美国西北大学的“M”型结构^[7],喷气动力实验室的互补势垒红外探测器(CBIRD)结构^[8]和新墨西哥大学的双势垒异质结构(PBIN)^[9]等.这些新型的结构利用超晶格材料体系能带可调的优势,人工设计的电子势垒和空穴势垒,既能够抑制台面器件的纵向漏电,又能够将耗尽区主要形成在势垒区,减少长波器件的隧穿电流.

本文报道了 InAs/GaSb II 类超晶格单势垒异质结构(PBIN)长波红外探测器.探测器的 50% 响应截止波长达到了 $12.5\mu\text{m}$, 77K 温度下,黑体探测率达到 $2.1 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$.

1 实验:

InAs/GaSb 超晶格红外探测器采用固态分子束外延技术生长. As 源和 Sb 源分别由带阀的裂解炉提供 As_2 和 Sb_2 . In 源和 Ga 源分别是高纯金属 In 和 Ga. 实验采用 (100) 晶向 GaSb 衬底,衬底表面的脱氧过程由在线的反射式高能电子衍射(RHEED)花样监控,材料外延生长的速率由 RHEED 强度振荡曲线获得, In/As 和 Ga/Sb 的束流比由在线的离子规测量得到,衬底温度由红外测温仪监控.材料生长的衬底温度为 $400\text{ }^\circ\text{C}$, InAs 层的生长速率为 0.25ML/s , GaSb 层的生长速率为 0.7ML/s . 界面处通过快门顺序的变化引入 InSb 界面以补偿 InAs 层的张应变,获得应力补偿的超晶格材料^[10]. 超晶格红外单元探测器材料为 PBIN 结构,首先在衬底上沉积 $1\mu\text{m}$ 的 P-GaSb 缓冲层(金属接触区),缓冲层 Be 掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,随后是 25 个周期的 P 型长波超晶格(15ML) InAs/(7ML) GaSb;紧接着的是势垒区,为 60 个周期的弱 P 型中波超晶格, (7ML) InAs/(7ML) GaSb;吸收区是 200 周期未掺杂的长波超晶格材料;最后是 50 周期的 N 型长波超晶格材料,上面覆盖了 30nm 的 InAs 层用来做金属接触,其中 Si 掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. 电子势垒

中波超晶格的导带位置高于长波吸收区超晶格的导带位置,从而阻挡了电子的扩散,减少了器件的暗电流.同时该势垒区的价带位置与吸收区的价带位置相持平,不会影响光电流的输运.

单元探测器的结构示意图如图 1 所示,器件采用正照射的模式来避免衬底的吸收.光敏元台面通过常规的光刻工艺和湿法腐蚀形成.台面侧壁通过磁控溅射的 SiO_2 进行钝化保护,该方案从实验上被证明是提高器件性能的有效手段^[11].台面的上下电极均为电子束蒸发 Ti/Pt/Au 金属,随后热蒸发 500nm 的加厚金层,最终将探测器芯片压焊到杜瓦中进行测试.探测器光敏元面积分别从 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 到 $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ 不等,变面积的器件结果用以分析体漏电和表面漏电的贡献.

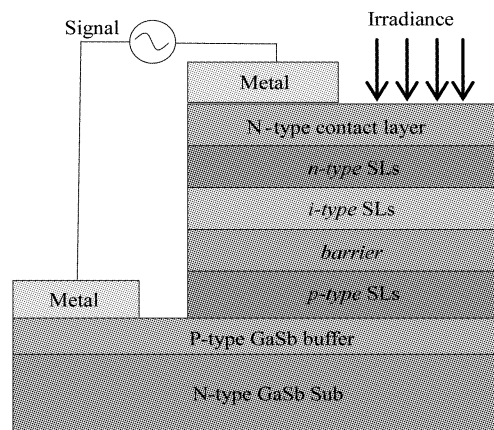


图 1 PBIN 长波单元器件剖面示意图,器件采用正入射

Fig. 1 The cross section profile of a PBIN long wavelength single element detector

2 结果与讨论

生长的 InAs/GaSb 超晶格材料首先采用高分辨 X 射线衍射仪测试(0 0 4)面的摇摆曲线.图 2 是器件结构的材料 X 射线 $\omega/2\theta$ 衍射图,中间的两个峰分别为衬底峰和外延峰.超晶格 X 射线衍射卫星峰位置满足公式:

$$L = \lambda / (2\Delta\theta \cos\theta_{SL}) \quad (1)$$

其中, L 为超晶格周期厚度, λ 为 X 射线入射波长, $\Delta\theta$ 为相邻卫星峰的角间距, θ_{SL} 为超晶格外延材料的布拉格角.

根据卫星峰位置公式,可以分别计算出长波和中波超晶格材料的 0 级峰的位置和周期厚度.长波外延层与衬底的晶格失配为 7.3×10^{-5} ,中波势垒层

与衬底的晶格失配为 4×10^{-4} . 因此衍射图中的外延峰为中波 0 级峰, 长波的 0 级峰因为与衬底失配很小所以与衬底峰重合. 长波超晶格 1 级卫星峰的全宽半高峰 (FWHM) 为 36 弧秒, 这显示了材料的晶格质量完整. 长波材料拟合周期为 69 \AA , 设计值是 66.2 \AA , 两者相差大约 1ML. 这里相差的 1ML 为 InSb 界面, 因为设计的周期中没有包括界面厚度. 从 X 射线衍射摇摆曲线上可以看到, 超晶格器件结构中长波本征区与中波势垒区材料的晶格质量完整, 并且与设计相吻合.

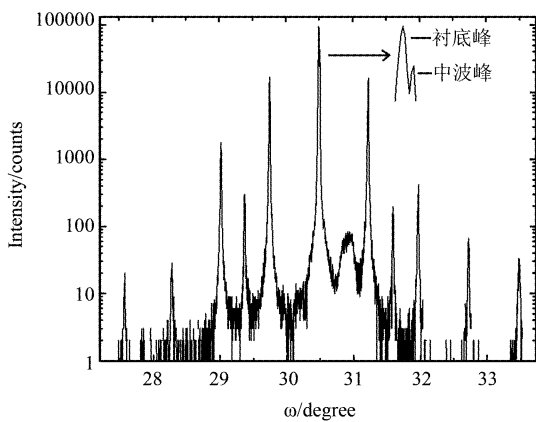


图2 器件结构的 XRD 摇摆曲线, 长波超晶格 1 级卫星峰的全宽半高峰 (FWHM) 为 36 弧秒, 显示材料晶格质量完整
Fig. 2 The XRD ω - 2θ curves for the device, the FWHM of 1st order satellite peak is 36 arcsec for long wavelength super-lattice material, indicating good lattice quality of the sample

为了分析器件性能, 对完成的单元探测器进行 80K 下的 I-V 测试以及黑体响应测试. 暗电流 I-V 与动态电阻采用 Keithley236 与自编的 LabVIEW 完成测试. 图 3 是光敏元大小为 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 的单元探测器在 80K 下实测的 IV 曲线与动态电阻-电压曲线, 器件的 $R_{\text{max}}A$ 为 $2.5 \Omega\text{cm}^2$. 台面器件的暗电流是体漏电和侧边漏电贡献之和. 由于台面结构一半面积为光敏元, 另一半面积为电极, 因此:

$$\frac{1}{R_{\text{max}}A} = \frac{1}{(R_{\text{max}}A)_{\text{bulk}}} + \frac{1}{\rho_{\text{surface}}} \cdot \frac{P}{A} \quad (2)$$

$P = 6a$ 是台面周长, $A = 2a^2$ 是台面面积, ρ_{surface} 为表面电阻率, 可以假设器件体漏电密度和表面电阻率都是常数, $R_{\text{max}}A$ 的值的倒数与光敏元边长的倒数成线性关系. 对不同台面尺寸单元器件 $R_{\text{max}}A$ 的值进行拟合, 可以获得体电阻面积乘积

$(R_{\text{max}}A)_{\text{bulk}}$ 与表面电阻率 ρ_{surface} . 图 4 是单元探测器的动态电阻与台面尺寸的关系以及拟合曲线.

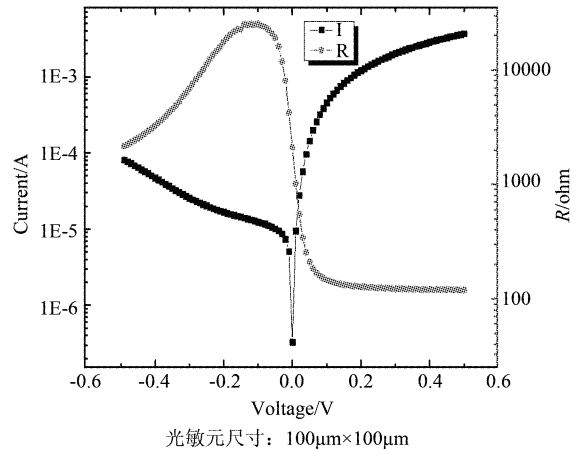


图3 光敏元大小为 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 的单元探测器在 80K 下实测 IV 曲线与动态电阻曲线
Fig. 3 I - V and R - V characteristics for single element device with photo sensitive area of $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$

小面积光敏元单元探测器有更大的侧边漏电流的贡献和小的 $R_{\text{max}}A$. 拟合出的 $(R_{\text{max}}A)_{\text{bulk}}$ 为 $5.4 \Omega\text{cm}^2$, 表面电阻率 ρ_{surface} 为 $720 \Omega\text{cm}$. 说明探测器的侧边钝化还需要进一步的研究和改进, 以减少侧边漏电流, 获得更高性能的器件. 对于 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 光敏元器件, $R_{\text{max}}A$ 值为 $2.5 \Omega\text{cm}^2$, 而 $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 光敏元器件 $R_{\text{max}}A$ 值为 $4.17 \Omega\text{cm}^2$, 因此大面积光敏元器件的 $R_{\text{max}}A$ 值更接近于拟合出的 $(R_{\text{max}}A)_{\text{bulk}}$, 侧边漏电流的贡献相对越小.

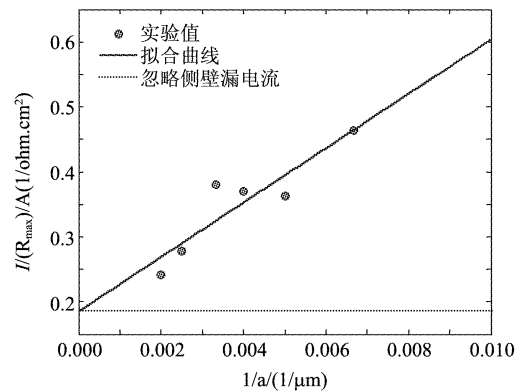


图4 变面积光敏元的 $R_{\text{max}}A$ 与台面尺寸的关系
Fig. 4 $R_{\text{max}}A$ value changes with different photo sensitive area

为了研究 80K 下探测器的暗电流的机理, 我们拟合了器件反向偏压下的暗电流曲线. 拟合只针对体漏电流, 由于小面积器件侧壁漏电贡献不可忽略, 而对于光敏元尺寸为 $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 的器件, 侧壁漏电流几乎可以忽略, 因此这里对光敏元尺寸为

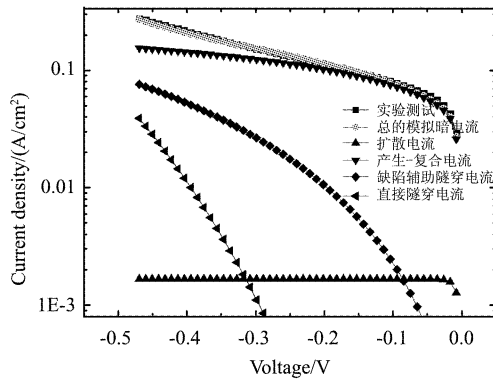


图5 四种暗电流机制拟合反偏下的电流电压曲线
Fig.5 Measured and simulated dark current density curves

500 $\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ 的器件暗电流进行拟合. 暗电流模型包含了产生复合电流, 扩散电流, 缺陷辅助隧穿电流和带间隧穿电流 4 种机制^[12].

带间直接隧穿电流:

$$I_{btb} = \frac{A \sqrt{2m_e^*} q^3 EV \exp\left(\frac{-4 \sqrt{2m_e^*} E_g^{1.5}}{3qEh}\right)}{4\pi^2 h^2 \sqrt{E_g}} \quad (3)$$

缺陷辅助隧穿电流:

$$I_{tat} = \frac{Aq^2 m_e^* VM^2 N_i \exp\left(\frac{-4 \sqrt{2m_e^*} (E_g - E_i)^3}{3qEh}\right)}{8\pi h^3} \quad (4)$$

扩散电流:

$$I_{diff} = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

$$I_0 = Aq \left(\frac{D_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{D_h n_i^2}{L_h N_D} \right) \quad (6)$$

产生复合电流:

$$I_{GR} = \frac{qn_i WA}{\sqrt{\tau_{GR}}} \frac{2k_B T}{q(V_{bi} - V)} \sinh\left(\frac{qV}{2k_B T}\right) f(b) \quad (7)$$

$$f(b) = \int_0^{\infty} \frac{du}{u^2 + 2bu + 1}$$

$$b = \exp\left(-qV/2k_B T\right) \cosh\left(\frac{E_t - E_i}{k_B T}\right) \quad (8)$$

其中 A 是器件台面面积, m_e^* 是电子有效质量, E 是电场强度, 拟合中使用最大电场强度 E_{\max} 进行计算. E_g 为吸收区超晶格材料有效禁带宽度. N_i 是缺陷密度, 缺陷势能 $M^2 = 1 \times 10^{-23} \text{ eV}^2$, E_i 为缺陷能级. K_B 是玻尔兹曼常数, T 是温度, D_e 和 D_h 分别是电子和空穴扩散系数, L_e 和 L_h 分别是电子和空穴扩散常数, N_A 和 N_D 分别是受主和施主的浓度, n_i 是本征载流子浓度. W 是耗尽区宽度, 为产生复合寿命, V_{bi} 为内建电势大小.

图5 是对截止波长 12.5 μm II 类超晶格单元红外探测器实测的反偏暗电流和拟合出的电流密度曲线. 拟合得到的暗电流密度是模型中四种暗电流机制作用之和, 并且与实测的暗电流密度曲线有很好的吻合. 在拟合中, 我们采用的材料参数, 如表 1 所示. 同时, 假设平行于生长方向上的电子迁移率为 1000 cm^2/Vs , 空穴迁移率为 100 cm^2/Vs . 拟合参数中吸收区的本征浓度结果为 $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 这与我们 C-V 电学测试以及去衬底霍尔测试的结果相吻合, 实验中 C-V 测试所拟合出的材料本底浓度为 n 型 $2.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$; 耗尽区的产生复合寿命为 1.6ns, 暗电流密度主要来自产生复合电流. 相比 HgCdTe 材料, 隧穿电流不再是超晶格长波探测器的主要暗电流来源, 这是因为超晶格材料有相比 HgCdTe 更高的电子有效质量. 但是, 80K 下高的产生复合电流抑制了探测器的性能, 因此需要进一步降低超晶格中的非辐射复合中心, 从而有效降低器件暗电流.

表 1 拟合计算中所用到的部分参数

Table 1 Parts of parameters used in the dark current simulation

部分拟合参数	
m_e	0.03 m_0
m_h	0.4 m_0
μ_e	1000 cm^2/Vs
μ_h	100 cm^2/Vs
N_i	$3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
$E_t - E_i$	0.025 eV
M_2	$1 \times 10^{-23} \text{ eV}^2$

黑体响应测试采用标准黑体, 温度设为 500 K, 斩波器频率设为 800 Hz, 信号采集由 SR570 前置放大器和锁相放大器完成. 在零偏下, 探测器的电流响应率测试结果为 1.29 A/W, 黑体探测率为 $2.1 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$. 响应光谱曲线通过傅里叶变换红外光谱仪测得, 77K 下 InAs/GaSb II 类超晶格单元红外探测器 50% 截至波长在 12.5 μm . 通过测得的响应光谱和黑体电流响应率, 可以计算出电流响应率光谱以及量子效率, 如图 6 所示. 器件在 11 μm 处的量子效率为 14.3%, 薄的吸收区与较大的接触电阻是导致实际整体量子效率偏低的原因. 当吸收区厚度增加到 400 周期时, 理论上的量子效率可以达到 45%^[13-14].

3 结论

成功制备了 InAs/GaSb II 类超晶格长波红外材料
(下转第 224 页)

- 1993, **63**(23): 3203–3206.
- [2] Hayne M, Razinkova O, Bersier S, *et al.* Optically induced charging effects in self-assembled GaSb/GaAs quantum dots [J]. *Phys. Rev. B*, 2004, **70**(8): 081302–081306.
- [3] Bansal B, Hayne M, Geller M, *et al.* Excitonic Mott transition in type-II quantum dots [J]. *Phys. Rev. B*, 2008, **77**(24): 241304–241308.
- [4] Motlan, Butcher KSA, Goldys EM. Multilayer GaSb/GaAs self-assembled quantum dots by metalorganic chemical vapor deposition [J]. *Materials Chemistry and Physics*. 2003, **81**(1), 8–10.
- [5] Moltan, Goldys EM, Tansley TL. Growth optimization of GaSb/GaAs self-assembled quantum dots grown by MOCVD [J]. *J. of Crystal growth*. 2002, **236**(4): 621–626.
- [6] Krier A, HUANG X L, Hammiche A. Midinfrared photoluminescence of InAsSb quantum dots grown by liquid phase epitaxy [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2000, **77**(23): 3791–3794.
- [7] Huang X L, Labadi Z, Hammiche A Growth of self-assembled PbSe quantum-dots on GaSb(100) by liquid phase epitaxy [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2002, **35**(23): 3091–3095.
- [8] Lang C. The interdependency of morphology, strain and composition in buried GeSi/Si(001) quantum dots [J]. *Philosophical Magazine*. 2010, **90**(35-36): 4703–4709.
- [9] Heldmaier M, Hermannstadter C, Witzany M, *et al.* Growth and spectroscopy of single lateral InGaAs/GaAs quantum dot molecules [J]. *Physic Status Solidi B-basic Solid state Physics*. 2012, **249**(4): 710–720.
- [10] M Ahmad Kamarudin1, Hayne1 M, Zhuang Q D, *et al.* GaSb quantum dot morphology for different growth temperatures and the dissolution effect of the GaAs capping layer [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2010, **43**(6) 065402–065407.

(上接 213 页)

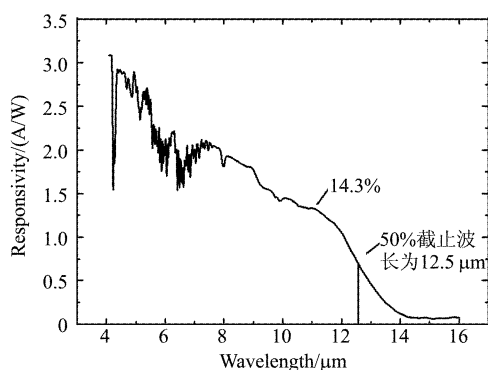


图 6 长波单元器件电流响应率与截止波长的关系
Fig. 6 Responsivity of device with 200 period absorber regions

料和单元探测器. 超晶格材料采用 MBE 技术生长在 GaSb 衬底上. 单元器件采用 PBIN 的多层异质结构. 制备的单元探测器 50% 截止波长为 12.5 μm. 单元器件的电流响应率在液氮温度零偏下达到 1.29 A/W, 器件的黑体探测率达到 $2.1 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 器件峰值量子效率为 14.3%.

REFERENCES

- [1] Sa-Halasz G A, Tsu R, Esaki L, A new semiconductor superlattice [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30**: 651–653.
- [2] Johnson J L, Samoska L A, Gossard A. C., *et al.* Electrical and optical properties of infrared photodiodes using the InAs/Ga_{1-x}In_xSb superlattice in heterojunctions with GaSb [J]. *J. Appl. Phys.* 1996, **80**: 1116–1127.
- [3] Razeghi M, Wei Y, Bae J, *et al.* Type II InAs/GaSb superlattices for high-performance photodiodes and FPAs [J]. *Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering*, 2003, 5246: 501–511.
- [4] Rogalski A. Material consideration for third generation infrared photon detectors [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2007, **50**: 240–252.
- [5] Soibel A, Ting D Z-Y, Hill C J, *et al.* Gain and noise of high-performance long wavelength superlattice infrared detectors [J], *Appl. Phys. Lett.* 2010, **96**: 111102.
- [6] Haddadi A, Darvish S R, Chen G, *et al.* High Operability 1024 × 1024 Long Wavelength Infrared Focal Plane Array Base on Type-II InAs/GaSb Superlattice, *AIP Conf. Proc.* 2011, 1416: 56–58.
- [7] Nguyen B M, Hoffman D, Delaunay P Y, *et al.* Band edge tenability of M-structure for heterojunction design in Sb based Type-II superlattice photodiodes [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2008, **93**: 163502.
- [8] Ting D Z. -Y, Hill C J, Soibel A, *et al.* A high-performance long wavelength superlattice complementary barrier infrared detector [J], *Appl. Phys. Lett.* 2009, **95**: 183502.
- [9] Gautam N, Plis E, Kim H S, *et al.* Heterostructure Band Engineering of Type-II InAs/GaSb Superlattice based Long-wave Infrared Photodiodes using Unipolar Current Blocking Barriers [J]. *Proc. Of SPIE*, 2010, Vol. 7660, doi:10.1117/12.849889.
- [10] Xu Qing-qing, Chen Jian-xin, Zhou Yi, *et al.* Mid-wavelength infrared InAs/GaSb superlattice grown by molecular beam epitaxy. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*. (徐庆庆, 陈建新, 周易, 等. InAs/GaSb 超晶格中波焦平面材料的分子束外延技术. 红外毫米波学报), 2011, **30**(5): 406–408.
- [11] Gin A, Wei Y, Bae J, *et al.* Passivation of Type-II InAs/GaSb superlattice photodiodes [J], *Thin Solid Films*, 2004, 447: 489–492.
- [12] Nguyen J, Ting D Z, Hill C J, *et al.* Dark current analysis of InAs/GaSb superlattice at low temperatures [J], *Infrared Physics and Technology* 2009, **52**: 317–321.
- [13] Wei Yajun, Razeghi Manijeh. Modeling of type-II InAs/GaSb superlattices using an empirical tight-binding method and interface engineering [J]. *Phys. Rev. B*, 2004, **69**: 085316.
- [14] Zhou Yi, Chen Jian-xin, He Li. Band structure calculation of InAs/GaSb superlattice under 4 layers model. *J. Infrared Millim. Waves*, (周易, 陈建新, 何力. 四层结构模型下的 InAs/GaSb 超晶格材料能带计算. 红外毫米波学报), 2013, **32**(1): 13–17.