

# 共振隧穿弱光探测器的分子束外延生长条件优化

董 宇<sup>1</sup> 王广龙<sup>1</sup> 倪海桥<sup>2\*</sup> 陈建辉<sup>1</sup> 乔中涛<sup>1</sup> 裴康明<sup>2</sup> 李宝晨<sup>1</sup> 牛智川<sup>2</sup>

<sup>1</sup>军械工程学院纳米技术与微系统实验室, 河北 石家庄 050003

<sup>2</sup>中国科学院半导体研究所半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083

**摘要** 对一种共振隧穿弱光探测器的分子束外延生长条件进行了研究。对探测器结构进行设计,研究了不同Al束流和不同生长温度下 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 材料的生长质量,结合X射线衍射及原子力显微镜测试结果确定了 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 材料的最佳生长条件。研究了不同Ga束流下 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料的生长质量,并采用一种衬底变温的生长方法解决了恒温生长较厚 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 外延层时表面容易出现点状突起的问题,获得了平整的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 外延表面。分别采用恒温和变温的生长方法制备了探测器样品,并对其电流-电压特性及光响应进行了测试,测试结果表明,采用变温生长方法制备的探测器样品具有更高的峰值电流和光响应。

**关键词** 探测器; 分子束外延; 共振隧穿二极管; 黑体响应度

中图分类号 TN215 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0817001

## Optimization of Molecular Beam Epitaxy Conditions of Resonant Tunneling Diode Photodetector

Dong Yu<sup>1</sup> Wang Guanglong<sup>1</sup> Ni Haiqiao<sup>2</sup> Chen Jianhui<sup>1</sup> Qiao Zhongtao<sup>1</sup>

Pei Kangming<sup>2</sup> Li Baochen<sup>1</sup> Niu Zhichuan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Nanotechnology and Microsystems, Mechanical Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China

<sup>2</sup>State Key Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

**Abstract** Molecular beam epitaxy conditions of resonant tunneling diode photodetector (RTD-PD) are researched. The structure of the detector with  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  absorption layer and  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  double barrier structure is designed. The growth quality of  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  material under different Al flux and growth temperature is tested and the optimal growth conditions are determined through X-ray diffraction and atomic force microscope test. The growth quality of  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  material under different Ga flux is researched. As there are punctate embossments on  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  surface grown under constant temperature, the  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  material is grown under varying temperature and the punctate embossments are eliminated. Two RTD-PD samples grown under constant temperature and varying temperature are fabricated. The current-voltage and photo response test show that the sample grown under varying temperature reaches higher peak current and photo response.

**Key words** detectors; molecular beam epitaxy; resonant tunneling diode; blackbody responsivity

**OCIS codes** 230.0040; 230.5160; 060.4510

收稿日期: 2015-03-12; 收到修改稿日期: 2015-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(61274125,61176012,61435012)、国家973计划(2013CB932904,2012CB932701)、国家自然科学基金科学仪器基础研究专款(2012YQ140005)、中国工程物理研究院高功率激光器实验室开放基金(2013HEL03)

作者简介: 董宇(1989—),男,博士研究生,主要从事新型半导体异质结构、高灵敏度探测器等方面的研究。

E-mail: dongyu@semi.ac.cn

导师简介: 王广龙(1964—),男,博士,教授,主要从事微纳米技术、量子技术、光电子技术等方面的研究。

E-mail: glwang2005@126.com

\*通信联系人。E-mail: hqni@semi.ac.cn

## 1 引 言

高灵敏度近红外光探测在微光夜视、精确制导、激光三维成像、空间遥感等方面具有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>,尤其是随着近年来量子信息技术的飞速发展,对 1310 nm 和 1550 nm 波段的光探测技术提出了越来越高的要求<sup>[4-7]</sup>。目前,在近红外波段使用较为广泛的探测器类型主要是雪崩光电二极管(APD)。为了实现较高的灵敏度,APD需要工作于盖革模式,这需要很高的工作电压,并将不可避免地增大过剩噪声和后脉冲计数<sup>[8-11]</sup>。因此,对于高性能新型光电探测器的探索和研究,非常具有必要性和迫切性。

2012年,Hartmann等<sup>[12]</sup>在GaAs基GaAs/AlGaAs共振隧穿二极管中加入GaInNAs吸收层,实现了近红外波段的光探测。该类型探测器在室温下对1.3 μm入射光的响应度高达1000 A/W,其噪声等效功率为34 fW/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。与APD同等倍数地放大信号电流和噪声电流不同,该类型探测器的内增益高达6000,而噪声电流增益仅为30<sup>[13]</sup>。2014年,Pfenning等<sup>[14]</sup>采用共振腔增强技术,将该类型探测器在室温下对1.3 μm入射光的响应度提高至 $3.1 \times 10^4$  A/W,并使该类型探测器具备了单光子探测能力。

然而,GaInNAs四元化合物在分子束外延(MBE)生长时难度较大,这将严重影响器件制备的稳定性及可重复性。本文在InP基InGaAs/InAlAs共振隧穿二极管中加入InGaAs吸收层,实现了近红外波段的光探测,通过对MBE生长条件进行优化,研究不同的生长条件对探测器生长质量及光响应的影响。

## 2 探测器结构设计

探测器结构设计及工作原理如图1所示。探测器的外延结构按照外延生长方向依次包括:100 nm(厚度)n型 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 作为发射极、7 nm(厚度) $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 隔离层、3 nm(厚度) $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ /6 nm(厚度) $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ /3 nm(厚度) $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 构成双势垒结构(DBS)、600 nm(厚度) $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 作为吸收层、100 nm(厚度)n型 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 作为集电极。器件工作时,集电极加正向偏压,入射光在吸收区产生光生电子空穴对,在电场作用下,光生电子向集电极方向漂移,光生空穴向发射极方向漂移,由于受到空穴势垒的阻挡作用,光生空穴将在 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 势垒和吸收层的界面处堆积。空穴的堆积改变了DBS附近的电场,进而改变了探测器的隧穿特性,造成探测器隧穿电流的变化,产生可探测的电信号。

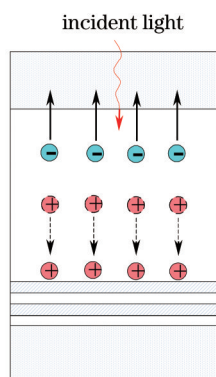


图1 探测器结构设计及工作原理

Fig.1 Structure and working principle of the detector

## 3 探测器生长条件优化

探测器外延结构包括 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 和 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 两种材料,其生长质量对探测器的性能有重要影响,为此首先对 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 和 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 两种材料进行单独生长,研究其最优生长条件。各源炉的束流通过束流计测定,采用等效束流压强表示。探测器MBE生长采用Veeco Mod GEN 930全固源MBE系统,在进行生长之前,首先需要对InP衬底进行脱氧处理。由于Veeco Mod GEN 930缺少P源,采用的脱氧方式为首先将衬底温度加热至400 °C,然后在As保护下升温至510 °C,并在该温度下保持5 min,最后降温至生长温度。

### 3.1 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 生长条件优化

为了研究Al束流对 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 生长条件的影响,分别采用 $8.32 \times 10^{-8}$ 、 $8.98 \times 10^{-8}$ 、 $9.53 \times 10^{-8}$ 、 $1.15 \times 10^{-7}$  Torr

(1 Torr=133.32 Pa)4种 Al束流生长了4个 InAlAs 样品,分别编号为 a1~a4,生长过程中 In束流始终保持为  $2.79 \times 10^{-7}$  Torr, V/III束流比为 20,生长温度为 480 °C,生长厚度为 800 nm。

图2为样品 a1~a4的 X射线衍射(XRD)测试结果,图中对衬底峰做了归零处理。从图中可以看出,样品 a1的外延峰位于衬底峰的左侧,随着 Al束流的增加,外延峰逐渐右移。样品 a2的衬底峰与外延峰的距离最近,说明 InP衬底与 InAlAs外延层获得了较好的晶格匹配。由于半导体晶面间距  $d$  符合布拉格公式

$$2d \sin \theta = \lambda, \tag{1}$$

式中  $\theta$  为衍射半角,  $\lambda$  为 X射线波长。同时,  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  的晶面间距符合公式

$$d_{\text{InAlAs}} = (0.3983x + 5.66)/4. \tag{2}$$

根据(1)式、(2)式及样品 a2的 XRD测试结果,可以求出样品 a2中 InAlAs材料在完全非弛豫的情况下,其 In的组分为 0.519,与探测器要求的  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  材料基本吻合。

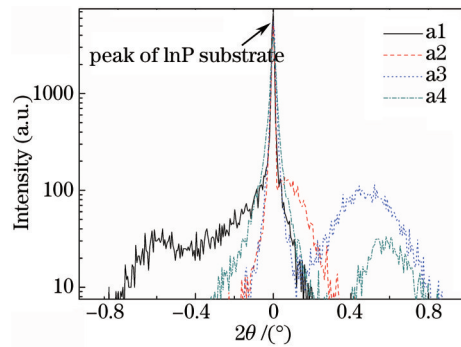


图2 样品 a1~a4的 XRD 测试结果

Fig.2 XRD test results of sample a1~a4

图3为样品 a1~a4的原子力显微镜(AFM)测试结果,各样品的均方根(RMS)粗糙度依次为 4.2、0.9、1.9、2.5 nm。从图中可以看出,虽然样品 a2的 RMS粗糙度最小,但其表面仍有明显起伏。样品的 RMS粗糙度和表面形貌表征了材料的生长质量,较大的 RMS粗糙度说明材料层内部存在较强的内应力和较多的缺陷,而较差的表面形貌则由材料层内部的线位错或混和位错所造成,这将使得材料层内部产生大量的复合中心,探测器吸收层产生的光生电子空穴对将被复合中心复合,严重影响探测器的光响应能力。为此有必要对  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  的生长温度进行优化,分别采用 440 °C、460 °C、500 °C 的生长温度生长 InAlAs 样品 b1~b3,样品的其它生长条件与样品 a2 相同。

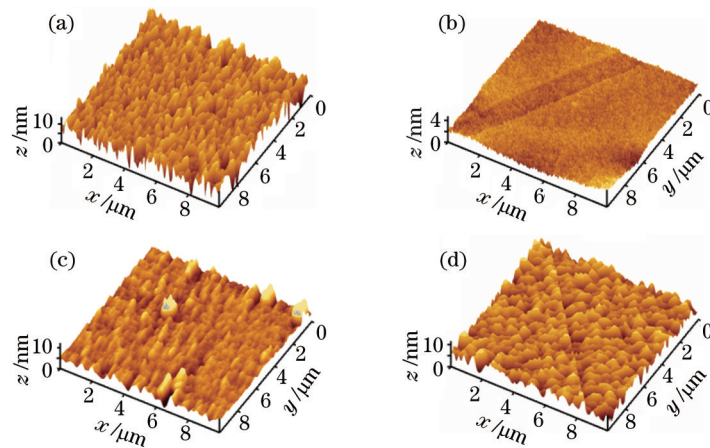


图3 AFM测试结果。(a) 样品 a1; (b) 样品 a2; (c) 样品 a3; (d) 样品 a4

Fig.3 AFM test results of sample. (a) a1; (b) a2; (c) a3; (d) a4

图4为样品 b1~b3的 AFM测试结果,图中左侧为样品的二维形貌,右侧为样品的三维形貌,其中样品 b1和 b3的三维形貌对应蓝色方框内的区域,样品 b2的三维形貌对应整个测试区域,样品 b1~b3的 RMS粗糙度依次为 0.9、0.4、1.1 nm。从图中可以看出,样品 b1和 b3都存在局部区域粗糙度很大的情况,而样品 b2则不

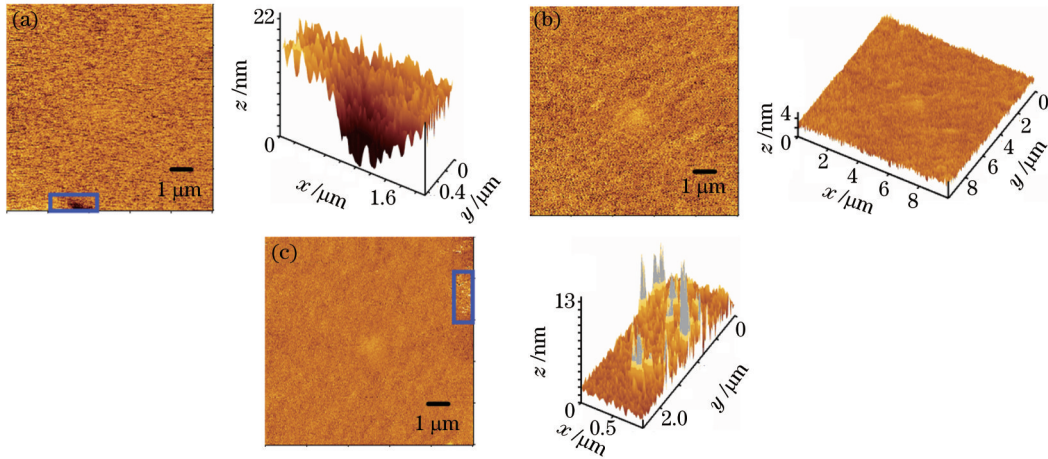


图4 AFM测试结果。(a) 样品 b1; (b) 样品 b2; (c) 样品 b3

Fig.4 AFM test results of sample. (a) b1; (b) b2; (c) b3

存在这种现象,因此将 460 °C 作为  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  的最佳生长温度。

### 3.2 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 生长条件优化

为了研究 Ga 束流对  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  生长条件的影响,分别采用  $1.46 \times 10^{-7}$ 、 $1.52 \times 10^{-7}$ 、 $1.60 \times 10^{-7}$ 、 $1.67 \times 10^{-7}$  Torr 4 种 Ga 束流生长了 4 个  $\text{InGaAs}$  样品,分别编号为 c1~c4,生长过程中 In 束流始终保持为  $2.79 \times 10^{-7}$  Torr, V/III 束流比为 20,生长温度为 480 °C,生长厚度为 800 nm。

图 5 为样品 c1~c4 的 XRD 测试结果,图中对衬底峰做了归零处理。可以看出,样品 c3 的衬底峰与外延峰的距离最近,说明 InP 衬底与  $\text{InGaAs}$  外延层获得了较好的晶格匹配。由于  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  的晶面间距符合公式

$$d_{\text{InGaAs}} = (0.405y + 5.653)/4. \quad (3)$$

根据(1)式、(3)式可以计算出样品 c3 中  $\text{InGaAs}$  材料在完全非弛豫的情况下,其 In 的组分为 0.529,与探测器要求的  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  材料基本吻合。

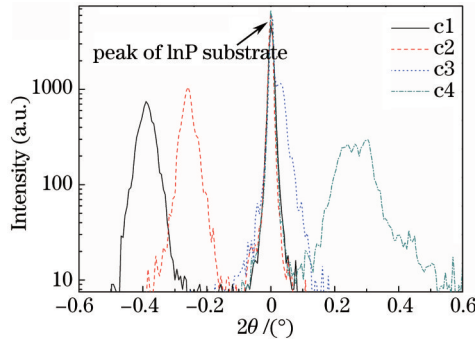


图5 样品 c1~c4 的 XRD 测试结果

Fig.5 XRD test results of sample c1~c4

图 6 为样品 c1~c4 的 AFM 测试结果,各样品的 RMS 粗糙度依次为 3.7、2.6、0.7、1.9 nm。可以看出,虽然样品 c3 的 RMS 粗糙度最小,但其表面存在大量点状突起,这将对探测器的性能造成很大影响。为解决该问题,分别采用 440 °C、460 °C、500 °C 的生长温度生长了 3 个样品并进行 AFM 测试,各样品表面均存在大量点状突起。

造成该现象的原因可能是  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  的带隙较窄,其对于衬底加热器和源炉的辐射能吸收系数很高,随着  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  生长厚度的增加,外延层的表面温度逐渐增加,根据文献[15],在  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  生长过程中,外延层的表面温度和衬底温度之差最高可达 64 °C。过高的表面温度改变了  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  的表面生长动力学平衡,造成外延层表面产生点状突起。而  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  的带隙较宽,其对于衬底加热器和源炉的辐射能吸收系数较低,因此在  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  的生长过程中没有出现这种现象。

为了解决该问题,对  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  采用变温生长方法,即衬底加热器起始温度设置为 480 °C,然后线性降温,在  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  生长厚度达到 200 nm 时,衬底温度降至 420 °C,并保持到样品生长结束。采用变温生长方

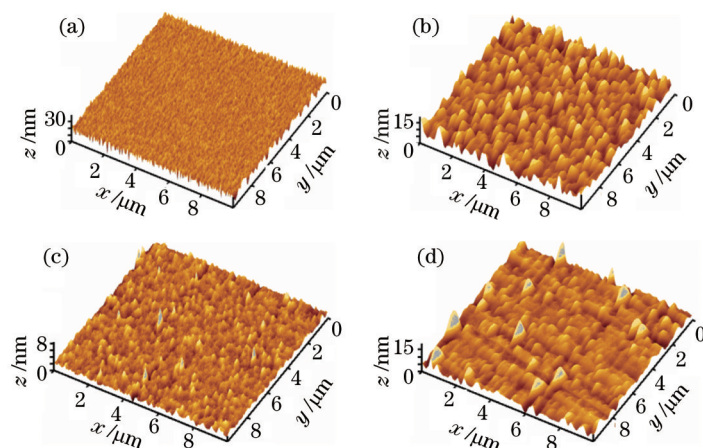


图6 AFM测试结果。(a) 样品 c1; (b) 样品 c2; (c) 样品 c3; (d) 样品 c4

Fig.6 AFM test results of sample. (a) c1; (b) c2; (c) c3; (d) c4

法对样品 d 进行生长,生长过程中的其它参数与样品 c3 相同,样品 d 的 AFM 测试结果如图 7 所示,其 RMS 粗糙度为 0.5 nm。从图中可以看出,采用变温生长方法生长的  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  外延层表面点状突起消失。

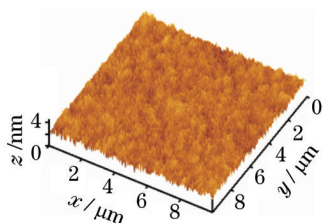


图7 样品 d 的 AFM 测试结果

Fig.7 AFM test results of sample d

#### 4 探测器制备及性能测试

采用上文确定的参数,对探测器进行生长及制备,在生长  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  外延层时分别采用 480 °C 恒温生长和变温生长方法,对应样品编号分别为 e1、e2。图 8 为样品 e1、e2 的 AFM 测试结果,其 RMS 粗糙度分别为 0.7、0.5 nm。由图可见,采用 480 °C 恒温生长的样品表面仍有点状突起,而采用变温生长的样品表面点状突起消失。

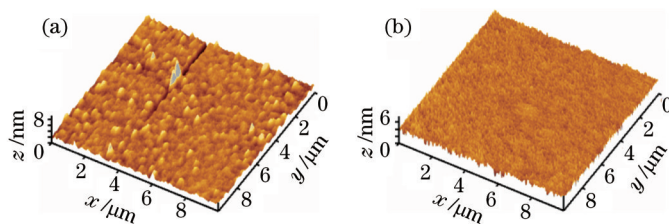


图8 AFM测试结果。(a) 样品 e1; (b) 样品 e2

Fig.8 AFM test results of sample. (a) e1; (b) e2

图 9 为样品 e1 和 e2 的电流-电压(I-V)曲线,测试样品的台面面积均为  $1963 \mu\text{m}^2$ 。可以看出,样品 e1 和 e2 的峰值电流分别为 35.18 mA 和 36.17 mA,样品 e2 的峰值电流强度相比样品 e1 提高了约 3%,另外,由于生长质量较好,样品 e2 在负微分电阻区域的震荡更小。优化后的样品 e2 的峰谷比为 7.8,而文献[12]中探测器的峰谷比为 3.83,说明样品 e2 具有更明显的负微分电阻效应。

图 10 为样品 e1、e2 的光响应测试结果。测试中采用黑体作为光源,黑体温度设置为 1073 K,通光孔孔径为 6.4 mm,由于黑体辐射为宽谱辐射,因此采用中心波长为 1500 nm,带宽为 1000 nm 的滤波片对黑体辐射进行滤波。滤波后黑体辐射的波段辐射出射度为  $0.68 \text{ W}/\text{cm}^2$ 。测试样品与黑体的距离为 12 cm,其光敏面面积均为  $1808 \mu\text{m}^2$ 。经过计算,样品光敏面的入射光功率为 4.77 nW。可以看出,样品 e1 和 e2 的光电流均大

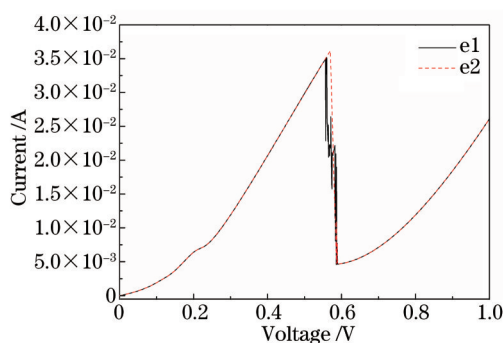


图9 样品 e1、e2 的 I-V 特性

Fig.9 I-V characteristics of sample e1 and e2

于暗电流。在 0.52 V 偏压下,样品 e1 的电流变化为 59.5  $\mu\text{A}$ ,样品 e2 的电流变化为 78.3  $\mu\text{A}$ ,对应的光响应度分别为  $1.25 \times 10^4 \text{ A/W}$  和  $1.64 \times 10^4 \text{ A/W}$ ,相比样品 e1,样品 e2 的光响应度提高了 30%,相比文献[12]中 1000 A/W 的光响应度,则提高了一个数量级。

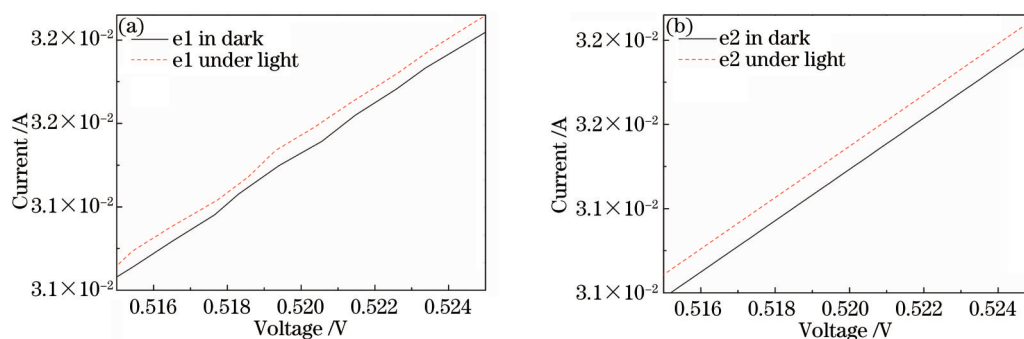


图10 光响应测试结果。(a) 样品 e1; (b) 样品 e2

Fig.10 Photoresponse of sample. (a) e1; (b) e2

## 5 结 论

对共振隧穿弱光探测器的 MBE 生长条件进行了优化。首先设计了探测器结构,通过在 InP 基 InGaAs/InAlAs 共振隧穿二极管中加入 InGaAs 吸收层实现近红外波段的光探测。对  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  材料的生长条件进行了研究,通过 XRD 和 AFM 测试确定了生长  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  时 In、Al 的束流分别为  $2.79 \times 10^{-7}$ 、 $8.98 \times 10^{-8}$  Torr,最佳生长温度为 460  $^{\circ}\text{C}$ 。研究了不同 Ga 束流下  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  材料的生长质量,并通过 XRD 测试确定了生长  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  时 In、Ga 的束流分别为  $2.79 \times 10^{-7}$ 、 $1.60 \times 10^{-7}$  Torr,采用变温生长方法获得了最优的  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  外延层表面形貌。分别采用恒温 and 变温的生长方法对探测器样品进行了制备,对样品的 I-V 及光响应测试结果表明,采用变温生长方法制备的探测器样品,其峰值电流提高了 3%,光响应提高了 30%。

## 参 考 文 献

- 1 M Binda, A Iacchetti, D Natali, *et al.*. High detectivity squaraine-based near infrared photodetector with  $\text{nA}/\text{cm}^2$  dark current[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(7): 073303.
- 2 Jin Lufan, Zhang Yating, Wang Haiyan, *et al.*. Acceleration aging of InGaAs PIN photoelectric detectors[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1008002.  
金露凡, 张雅婷, 王海艳, 等. InGaAs PIN 光电探测器的加速老化研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1008002.
- 3 J O Kjellman, M Sugiyama, Y Nakano. Near-infrared electroluminescence and photo detection in InGaAs p-i-n microdisks grown by selective area growth on silicon[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(24): 241103.
- 4 D Li, Y Jiang, Y J Ding, *et al.*. Approaching single-photon detection in near-infrared region[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(14): 141126.
- 5 R E Warburton, G Intermite, M Myronov, *et al.*. Ge-on-Si single-photon avalanche diode detectors: design, modeling, fabrication,

- and characterization at wavelengths 1310 and 1550 nm[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013, 60(11): 3807–3813.
- 6 A Restelli, J C Bienfang, A L Migdall. Single-photon detection efficiency up to 50% at 1310 nm with an InGaAs/InP avalanche diode gated at 1.25 GHz[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(14): 141104.
- 7 X N Xu, Z D Xie, J J Zheng, *et al.*. Near-infrared Hong-Ou-Mandel interference on a silicon quantum photonic chip[J]. Optics Express, 2013, 21(4): 5014–5024.
- 8 J Mata Pavia, E Charbon, M Wolf. Single-photon avalanche diode imagers applied to near-infrared imaging[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(6): 3800908.
- 9 A Gallivanoni, I Rech, M Ghioni. Progress in quenching circuits for single photon avalanche diodes[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57(6): 3815–3826.
- 10 Hai-Qiang Ma, Jian-Hui Yang, Ke-Jin Wei, *et al.*. Afterpulsing characteristics of InGaAs/InP single photon avalanche diodes[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(12): 120308.
- 11 Hao He, Jun Ji, Mehua Bi, *et al.*. 20-Gbps low cost WDM-OFDM-PON downstream transmission with tunable filter and linear APD module[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(4): 040603.
- 12 F Hartmann, F Langer, D Bisping, *et al.*. GaAs/AlGaAs resonant tunneling diodes with a GaInNAs absorption layer for telecommunication light sensing[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(17): 172113.
- 13 F Hartmann, F Langer, D Bisping, *et al.*. Characterization of GaAs/AlGaAs resonant tunneling diodes with a GaInNAs absorption layer as 1.3  $\mu\text{m}$  photo sensors[C]. SPIE, 2012, 8511: 85110G–1.
- 14 A Pfenning, F Hartmann, F Langer, *et al.*. Cavity-enhanced resonant tunneling photodetector at telecommunication wavelengths[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(10): 101109.
- 15 J A Roth, J J Dubray, D H Chow, *et al.*. Feedback control of substrate temperature and film composition during MBE growth of lattice-matched InGaAs on InP[C]. Indium Phosphide and Related Materials, 1997: 253–256.

栏目编辑: 刘丰瑞