

可见增强的 32×32 元平面型 InGaAs/InP 面阵探测器

杨波^{1,2,3}, 邵秀梅^{1,2}, 唐恒敬^{1,2}, 邓洪海^{1,2}, 李雪^{1,2}, 魏鹏^{1,2},
王云姬^{1,2,3}, 李淘^{1,2}, 龚海梅^{1,2*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;
3. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 为了实现 InGaAs 探测器响应波段向可见增强, 在传统的外延材料中加入一层 InGaAs 腐蚀阻挡层, 制备了 32×32 元平面型 InGaAs 面阵探测器, 采用机械抛光和化学湿法腐蚀相结合的方法, 去除了 InP 衬底. 结果表明, 探测器的响应波段为 $0.5 \sim 1.7 \mu\text{m}$, 室温下在波长为 500 nm 处的量子效率约为 16% , 850 nm 处量子效率约为 54% , 1550 nm 处量子效率约为 91% . 暗电流大小与衬底减薄之前基本保持一致. 理论分析了材料参数对器件量子效率的影响, 为进一步优化可见波段探测器的量子效率提供了依据.

关键词: 镓砷探测器; 可见增强; 衬底减薄; 量子效率

中图分类号: TN215 文献标识码: A

32×32 pixel planar InGaAs/InP detector with response extended to visible wavelength band

YANG Bo^{1,2,3}, SHAO Xiu-Mei^{1,2}, TANG Heng-Jing^{1,2}, DENG Hong-Hai^{1,2}, LI Xue^{1,2},
WEI Peng^{1,2}, WANG Yun-Ji^{1,2,3}, LI Tao^{1,2}, GONG Hai-Mei^{1,2*}

(1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to extend the response of InGaAs short-wave infrared detectors to visible wavelength band, a InGaAs etch stop layer was added to the standard InGaAs epitaxial structure. After the fabrication of 32×32 pixel planar InGaAs detectors, the InP substrate was removed with mechanical thinning and chemical wet etching. The results indicated that the response of detectors after substrate removal covered the wavelength band from 400 nm to 1700 nm . Quantum efficiency is approximately 16% at 500 nm , 54% at 850 nm , and 91% at 1550 nm . The detectors achieved almost the same low dark current as they did before the substrate removal process. The effect of parameters of epitaxial material on the quantum efficiency has been analyzed and simulated, and then the method to optimize the visible response of detectors was given.

Key words: InGaAs detectors, visible response, substrate removal, quantum efficiency

PACS: 78.30.Fs

收稿日期: 2014-06-08, 修回日期: 2015-02-08

Received date: 2014-06-08, revised date: 2015-02-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助 973 项目 (2012CB619200); 国家自然科学基金 (61376052)

Foundation items: National Key Basic Research and Development Program of China (2012CB619200); the National Natural Science Foundation of China (61376052)

作者简介 (Biography): 杨波 (1986-) 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 主要从事短波红外探测器的研究, E-mail: bobyang@mail.sitp.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: hmgong@mail.sitp.ac.cn

引言

在短波红外 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 波段中,很多物质具有独特的光谱特性,而且在黑暗环境中仅有的自然光,包括月光、星光、大气辉光等,大部分能量集中在这个波段,因此短波红外探测和成像技术在空间遥感、对地观测以及微光夜视等领域有广泛的应用前景. InGaAs短波红外探测器在相对较高温下仍有较好的性能,包括量子效率高、迁移率高、可靠性好等,因此同其他众多短波红外探测器相比有较大的优势^[1].

常规的PIN型InGaAs短波红外探测器所使用的外延材料包括InP帽层、InGaAs吸收层以及InP衬底.由于InP帽层或衬底无效吸收,晶格匹配的InGaAs短波红外探测器的响应波段为 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$.美国传感无限公司相继制作了 320×240 ^[2]、 640×512 ^[3]、 1280×1024 ^[4]元可见增强的InGaAs短波红外探测器,响应波段为 $0.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$,在波长为 500 nm 处量子效率为 15% , 850 nm 时为 70% , 1310 nm 为 85% , 1550 nm 为 80% .Judson公司也制作了 320×256 元的InGaAs短波红外探测器,响应波段为 $0.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$ ^[5].在响应波长向可见延伸之后,InGaAs探测器可同时进行可见光和短波红外探测,有利于简化成像系统,减小了成像系统的尺寸和重量^[2],在微光夜视、农业检测、主被动联合探测等领域拥有广泛的应用前景.因此研究可见增强的InGaAs短波红外探测器具有十分重要的意义,研究中十分关注提高InGaAs探测器在可见波段的量子效率.

采用具有腐蚀阻挡层的外延材料,制备了 32×32 元平面型InGaAs面阵探测器,衬底减薄后测试分析了光敏芯片的光电性能,并对探测器的量子效率进行模拟.

1 实验

1.1 光敏芯片制备

实验用外延材料采用MOCVD技术在InP衬底上依次外延生长 $\text{N}^+ - \text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 腐蚀阻挡层(Si掺杂)、 $\text{N}^+ - \text{InP}$ 缓冲层(Si掺杂 $n > 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)、 $\text{N}^- - \text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 吸收层(Si轻掺杂 $n \approx 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)、 $\text{N}^- - \text{InP}$ 帽层(Si轻掺杂 $n \approx 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$),如图1所示.

采用感应耦合等离子(ICP)刻蚀技术刻蚀出扩散孔,扩散方式采用 Zn_3P_2 的闭管扩散,采用SiN薄

膜进行钝化,电极采用Cr/Au金属膜系.探测器芯片为 32×32 的面阵,其中心距为 $30 \mu\text{m}$,光敏元大小包括 $23 \times 23 \mu\text{m}^2$ 和 $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ 两种规格.

1.2 衬底减薄

光敏芯片制备完成后通过In柱与电极板实现倒焊互连,在电极板与芯片之间充入低温胶并固化.首先使用机械抛光的方法进行衬底减薄,去除掉大部分InP衬底,然后使用盐酸溶液:磷酸溶液(体积比为 $3:1$)的腐蚀液在水浴中腐蚀掉剩余的InP衬底,腐蚀温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$,接着使用酒石酸溶液(重量比酒石酸: $\text{H}_2\text{O} = 1:1$): H_2O_2 的腐蚀液腐蚀掉 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 阻挡层,腐蚀液的体积比为 $5:1$,腐蚀温度为 $35 \text{ }^\circ\text{C}$.最后得到的器件的剖面如图1所示.

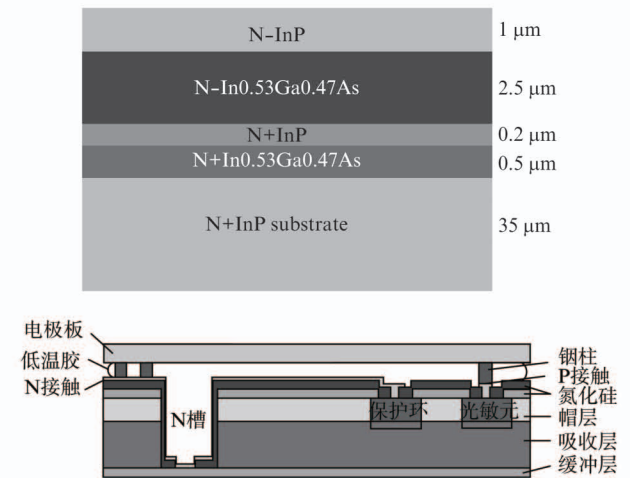


图1 外延材料结构示意图(上)和减薄后的器件剖面示意图(下)

Fig. 1 Scheme of epitaxial material (top) and detectors after substrate removal (bottom)

2 实验结果与分析

2.1 表面形貌

在衬底减薄后,光敏芯片的背面形貌如图2所示,从图中可以清晰的分辨出光敏元和N电极.光敏芯片表面较为平整光滑,没有出现明显的划痕或者碎裂.衬底减薄前后光敏芯片背面的AFM三维图像如图3所示.表面的凸起分布大致均匀,减薄前后的RMS值分别为 2.76 nm 和 1.62 nm ,衬底减薄的过程中表面的平整度保持较好.

2.2 探测器I-V特性及暗电流分析

将光敏芯片封装在杜瓦中,使用安捷伦公司的B1500A测量器件的I-V特性.衬底减薄前后器件的典型I-V曲线如图4所示.在室温下,衬底减薄前后器

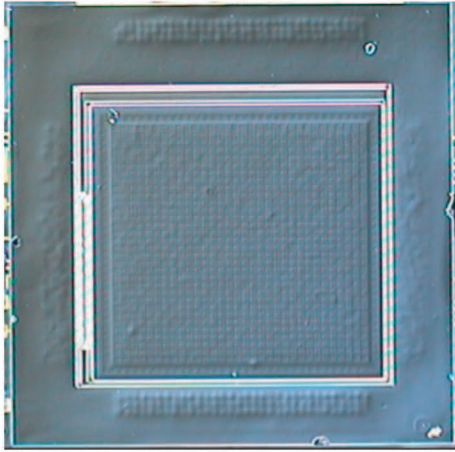


图2 减薄后光敏芯片的背面形貌
Fig. 2 Image of detectors after substrate removal

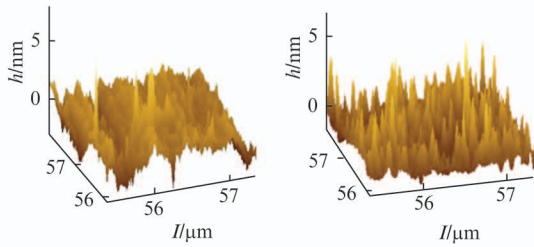


图3 衬底减薄前(上)后(下)芯片背面的 AFM 图像
Fig. 3 AFM images of detectors before (top) and after (bottom) substrate removal

件的零偏电阻 R_0 分别为 $1.45 \times 10^{11} \Omega$ 和 $1.90 \times 10^{11} \Omega$, 相应的优值因子 $R_0 A$ 从 $1.31 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 增加到 $1.71 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 变化不大, 是测试波动带来的影响. 在 -100 mV 偏压下, 器件的暗电流密度分别为 34.4 nA/cm^2 和 24.9 nA/cm^2 , 考虑到测量误差, 在衬底减薄前后, 器件的暗电流基本没有变化. 在以上计算中, 考虑到横向扩散与光敏元侧向收集的作用^[6], 光敏元面积均取为 $30 \times 30 \mu\text{m}^2$.

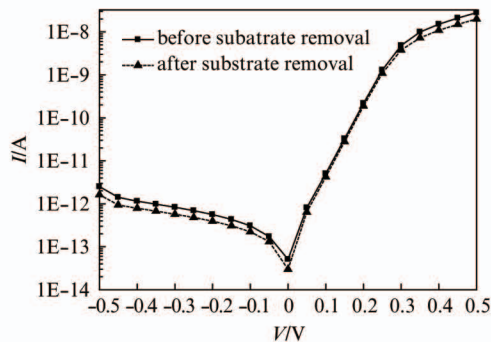


图4 衬底减薄前后器件在室温下的 I - V 特性
Fig. 4 I - V characteristics of detectors at room temperature

2.3 响应光谱特性

使用溴钨灯作为入射光的光源, 采用单色仪系统对探测器进行响应光谱的测试, 使用硅标准器件和近红外标准器件分别对可见波段和近红外波段的光谱进行校正. 衬底减薄前后光敏芯片在室温下的归一化响应光谱如图 5 所示. 衬底减薄前, 器件的响应波段为 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$; 衬底减薄后, 器件在长波方向的截止波长没有变化, 在短波方向的截止波长向可见方向延伸, 响应波段为 $0.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$. 通过去除 InP 衬底, 减小了 InP 衬底的有效吸收, 提高了器件在可见波段的响应.

衬底减薄后器件的量子效率如图 5 所示, 在波长为 500 nm 处, 量子效率达到约 16% , 而常规的背后照射 InGaAs 短波红外探测器在 500 nm 波长的量子效率小于 1% . 在波长为 850 nm 处, 器件的量子效率约为 54% , 在 1310 nm 处量子效率约为 94% , 在 1550 nm 处量子效率约为 91% . 器件在保持近红外波段较高量子效率的同时, 在可见波段的量子效率大大提高.

短波红外 InGaAs 面阵探测器采用背照射的工作模式, 光入射的示意图如图 6 中所示, 当入射光辐照 Φ_0 照在器件表面时, 通过 InP 缓冲层后进入 InGaAs 吸收层. 光电流由三部分组成: N 区空间电荷区外通过扩散作用进入空间电荷区被收集的光生空穴产生的光电流 J_1 ; 空间电荷区光生载流子形成的光电流 J_2 ; P 区空间电荷区外通过扩散作用被收集的光生电子产生的光电流 J_3 . 下面分别对三部分光电流进行计算.

通过求解稳态下的连续性方程得到光电流分布 J_1 和 J_3 , 从而得到对应的内量子效率 η_1 和 η_3 . 在吸收层耗尽区外的少子连续性方程:

$$\frac{d\Delta p}{dt} = \Phi_0 \cdot e^{-\alpha_1 \cdot d_1} \cdot \alpha_2 \cdot e^{-\alpha_2 \cdot x} - \frac{\Delta p}{\tau} + D_h \frac{d^2 \Delta p}{dx^2}, \quad (1)$$

其中 D_h 为空穴扩散系数, 稳态情况下的解为:

$$\Delta p(x) = A_1 e^{-x/L_h} + A_2 e^{x/L_h} + M e^{-\alpha_2 x}, \quad (2)$$

其中 $M = \frac{\alpha_2 \Phi_0 e^{-\alpha_1 d_1} \tau}{1 - L_h^2 \alpha_2^2}$, L_h 为空穴扩散长度.

边界条件为:

$$D_h \frac{d\Delta p}{dx} \Big|_{x=0} = S\Delta p, \Delta p \Big|_{x=d_2-l} = 0,$$

其中 S 为界面复合速度, l, n 区电荷区宽度, 代入计算后得到 A_1 和 A_2 :

由这部分光电流贡献的内量子效率:

$$\eta_1 = J_1 / q\Phi_0 = -qD \frac{d\Delta p}{dx} \Big|_{x=d_2-l} / q\Phi_0, \quad (3)$$

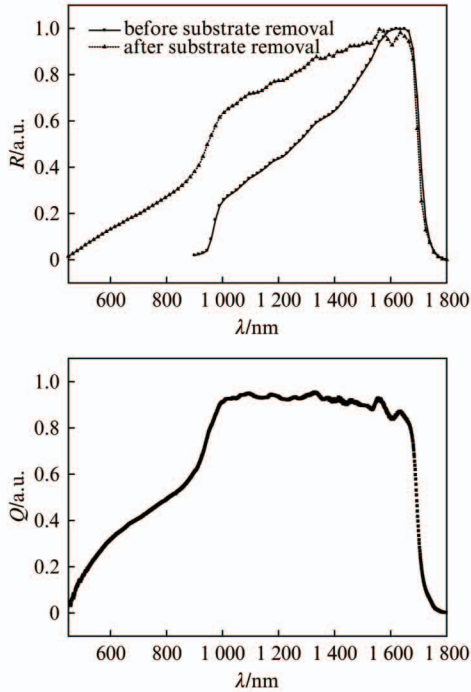


图 5 器件的响应光谱(上)和减薄后器件的量子效率随波长的变化(下)
Fig.5 Responsive spectrum of detectors (top) and quantum efficiency of detectors versus wavelength after substrate removal (bottom)

采用相似的方法可以得到 η_3 .

在空间电荷区内,势垒区的净热复合可以忽略,另外对于势垒区内的界面复合和能带不连续所带来的影响也暂不考虑^[7,8],假设空间电荷区内收集效率为 1,光激发的电子和空穴立即被结电场分开,分别漂向 N 区和 P 区,只要积分这里的光生电子空穴对,即能算出内量子效率 η_2 :

$$\eta_2 = \exp(-\alpha_1 d_1) \cdot \alpha_2 \int_{d_2-l}^{d_2} \exp(-\alpha_2 x) dx \quad (4)$$

由于扩散后帽层掺杂浓度远远高于吸收层,因此空间电荷区的宽度近似认为等于 l .

总的内量子效率:

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 + \eta_3 \quad (5)$$

采用以上模型对器件的光谱响应进行模拟,衬底减薄后器件的归一化响应光谱的理论值与实验值如图 6 所示,可以看到,两者较为吻合,说明该模型是适用的.

使用该模型模拟外延材料参数对器件可见波段内量子效率的影响,考虑的因素包括缓冲层的厚度、吸收层的厚度以及吸收层的掺杂浓度.衬底减薄后的器件在 850 nm 波长的内量子效率随 InP 缓冲层厚度以及在 750 nm 波长随吸收层厚度的变化分别

如图 7 和 8 所示.可以看到,随着缓冲层厚度的增加,InP 的无效吸收增加,内量子效率迅速减小,而此时吸收层掺杂浓度对内量子效率的影响则相对很小.在缓冲层厚度固定时,InP 层的无效吸收一定,在吸收层较薄时,吸收层均为空间电荷区,随着吸收

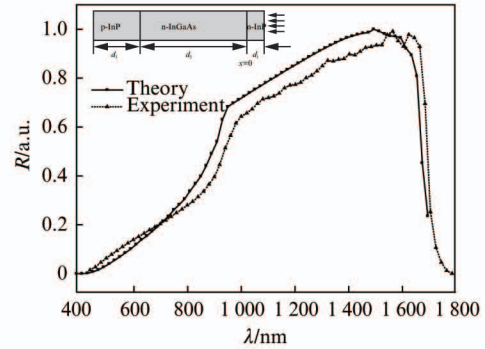


图 6 理论拟合与实验所得的归一化响应光谱
Fig.6 Normalized response spectrum of simulation and experiment

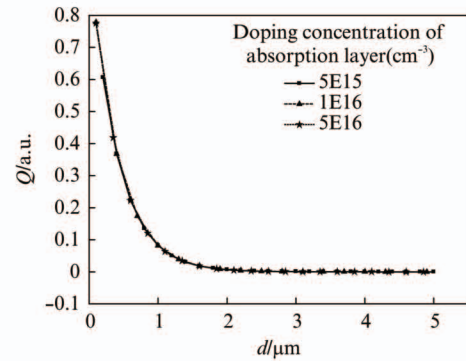


图 7 850 nm 波长器件的量子效率随缓冲层厚度的变化($d_2 = 2.5 \mu\text{m}$)
Fig.7 QE of detectors at wavelength of 850 nm versus the thickness of buffer layer ($d_2 = 2.5 \mu\text{m}$)

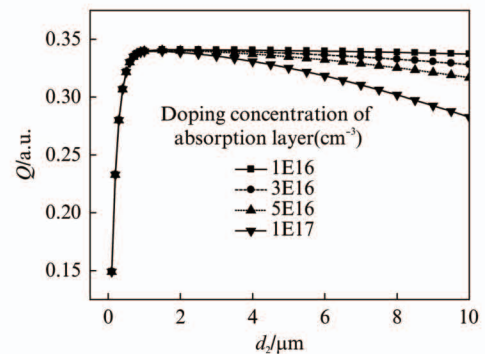


图 8 700 nm 波长器件的量子效率随吸收层厚度的变化($d_1 = 0.2 \mu\text{m}$)
Fig.8 QE of detectors at wavelength of 700 nm versus the thickness of buffer layer ($d_1 = 0.2 \mu\text{m}$)

层厚度的增大,空间电荷区增大,光生载流子增多,使内量子效率增大,随后空间电荷区的宽度保持固定,吸收层厚度的增大使得通过扩散作用进入到空间电荷区的光生空穴增多,内量子效率增大,随着吸收层厚度增大到一定值,空穴的扩散作用饱和,但是 InGaAs 的无效吸收增加,因此内量子效率出现下降. 吸收层厚度固定时,随着载流子浓度的增大,空间电荷区变窄,内量子效率下降. 相对于其他两个因素而言,缓冲层厚度对可见波段的内量子效率作用较为显著,因此,减小缓冲层的厚度是提高器件在可见波段的内量子效率的一个有效途径.

3 结论

采用具有缓冲层的外延材料制备了 32×32 元平面型 InGaAs 面阵探测器,衬底减薄后表面平整度保持较好,并且测试了探测器的光电性能,衬底减薄前后暗电流变化较小,在可见波段的光谱响应增强,在 500 nm 波长的量子效率达到了 16%. 建立模型对探测器的量子效率进行模拟,与实验结果较为吻合,表明缓冲层 InP 的厚度对探测器在可见波段量子效率影响最为显著,减小缓冲层厚度是实现 InGaAs/InP 短波红外探测器可见增强的一个有效途径.

References

[1] Howard W Yoon, Matt C Dopkiss, George P Eppeldauer.

- Performance Comparisons of InGaAs, extended InGaAs and Short-wave HgCdTe Detectors between $1 \mu\text{m}$ and $2.5 \mu\text{m}$: Infrared Spaceborne Remote Sensing XIV, 2006 [C]. San Diego: Marija Strojnik, 2006: 6297031 ~ 10.
- [2] Tara Martin, Peter Dixon, Mari Anne Gagliardi. 320×240 pixel InGaAs/InP focal plane array for short-wave infrared and visible light imaging: Semiconductor Photodetectors II, 2005 [C]. Bellingham: Marshall J Cohen, Eustace L Dere-niak, 2005: 85 - 91.
- [3] Tara Martin, Robert Brubaker, Peter Dixon. 640×512 In-GaAs focal plane array camera for visible and SWIR imaging: Infrared Technology and Applications XXXI, 2005 [C]. Bjorn F Andersen, Gabor F Fulop, 2005: 12 - 20.
- [4] Battaglia J, Blessinger M, Enriquez M, *et al.* An uncooled 1280×1024 InGaAs focal plane array for small platform, shortwave infrared imaging: Infrared Technology and Applications XXXV, 2009 [C]: Bjorn F Andersen, Gabor F Fulop, 2009: 72983C-1 ~ 8.
- [5] Henry Yuan, Gary Apgar, Jongwoo Kim, *et al.* FPA Development: from InGaAs, InSb, to HgCdTe: Infrared Technology and Applications XXXIV, 2008 [C]: Bjorn F Andersen, Gabor F Fulop, 2008: 69403C-1 ~ 11.
- [6] Honghai Deng, Hengjing Tang, Tao Li, *et al.* The temperature-dependent photoresponse uniformity of InGaAs sub-pixels infrared detector by LBIC technique [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2012, **27**(115018): 1 - 5.
- [7] Emziane M, Nicholas R J. Optimization of InGaAs(P) photovoltaic cells lattice matched to InP [J], *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**: 054503.
- [8] Lal R, Jain M, S Gupta, P Chakrabarti. An analytical model of a double hetero-structure mid-infrared photodetector [J], *Infrared. Phys. Technol.*, 2003, **44**: 125 - 132.