

离子注入型硅掺砷阻挡杂质带长波红外探测器的研究

王超^{1,2}, 李宁¹, 戴宁^{1*}, 石旺舟³, 胡古今^{3*}

(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. 上海师范大学 数理学院物理系, 上海 200234)

摘要:研究了基于离子注入技术制备硅掺砷阻挡杂质带探测器的工艺,通过优化工艺条件和相关器件的结构与材料参数,制造了具有良好光电响应性能的长波红外探测器。在温度 5 K, -3.8 V 工作偏压下,探测器的峰值响应波长为 23.8 μm , 黑体响应率为 3.7 A/W, 3.2 V 时最大探测率为 $5.2 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。性能指标堪与文献报道的结果相媲美甚至更好,展示了离子注入工艺在制作阻挡杂质带探测器方面的潜在优势,特别是离子注入工艺与目前的微电子电路技术相兼容,能将探测器与读出电路集成到一块芯片上,在降低成本的同时提高探测器成像性能。

关键词:阻挡杂质带;长波红外探测器;硅掺砷;离子注入工艺

中图分类号: TN36 文献标识码: A

Ion-implanted Si:As blocked impurity band detectors for VLWIR detection

WANG Chao^{1,2}, LI Ning¹, DAI Ning^{1*}, SHI Wang-Zhou³, HU Gu-Jin^{3*}

(1. State Key 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 Physics, College of Mathematics and Science, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: An ion-implant technique for fabricating Si:As blocked impurity band detectors for VLWIR detection had been investigated, and the detectors with good photoelectric response performance had been demonstrated by optimizing both the processing condition and the device structural parameters together with material characteristic parameters. At 5 K temperature, with a dc bias voltage of -3.8 V, the peak response wavelength of the fabricated devices is 23.8 μm , the blackbody responsivity is 3.7 A/W, and the detectivity is $5.3 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ at 3.2 V, which are comparable to (and even superior to) those reported in literatures. Especially, the device manufacturing process is compatible with that for fabrication of integrated circuit, and the detectors can be integrated with readout circuits on one chip, resulting in a remarkable reduction in produce cost and a significant improvement in the imaging performance.

Key words: blocked impurity band, long-wavelength infrared detectors, Si:As, ion-implant process

PACS: 85.60.Gz, 61.72.-y, 61.72.-y, 73.20.Hb

收稿日期: 2019-10-05, 修回日期: 2020-03-23

Received date: 2019-10-05, Revised date: 2020-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(11933006, 61805060, 61290304, 10904158, 10990103)和国家重点基础研究发展计划项目(2013CB632802, 2011CB922004)

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (11933006, 61805060, 61290304, 10904158, and 10990103), National Basic Research Program of China (2013CB632802 and 2011CB922004).

作者简介(Biography): 王超(1989-), 男, 安徽芜湖人, 博士研究生, 主要研究领域为长波红外探测器的研制与性能分析. E-mail: wangchao@mail.sitp.ac.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: ndai@mail.sitp.ac.cn, hugj@shnu.edu.cn

引言

长波红外探测器在红外天文物理、地外生命追寻、航空航天和国防等领域有重要的应用前景^[1]。阻挡杂质带(Blocked Impurity Band, BIB)红外探测器属于非本征杂质带跃迁光导型探测器^[2],是杂质带电导(Impurity Band Conductor, IBC)探测器中的一员。杂质带电导红外探测器在远红外长波探测波段表现出优异的性能,但是也存在许多不足^[3]。为了提高对光子的吸收效率,需要增加掺杂杂质的浓度。随着杂质浓度提高的,暗电流也会增大;掺杂浓度达到一定程度时,杂质能级就会形成杂质带,电子可以通过杂质带跃迁形成光电导电流^[4]。为了克服跳跃电导作用、改善抗辐射性和降低阵列相邻像素间的光学串扰,最初由美国 Petroff 和 Stapelbroek 等在 1979 年提出了阻挡杂质带探测器^[2]。通过在杂质带电导探测器中引入阻挡层,阻挡层由未掺杂或低掺杂衬底材料构成,吸收层中重掺形成的杂质带能级在阻挡层被隔断,杂质带能级不连续,成功的抑制了暗电流^[5]。改进后的非本征杂质带探测器被称为阻挡杂质带探测器。阻挡杂质带探测器的吸收层掺杂浓度比传统非本征探测器上升了约 2 到 3 个数量级,因此其量子效率得到显著提高,约 40%~80%^[6]。而且阻挡杂质带探测器的器件体积相比原来的非本征探测器显著减小,体积的缩小增强了其抗辐照能力,更加有利于空间天文红外探测^[7]。阻挡杂质带探测器具有暗电流低、光电导增益高、响应速度快和抗辐照性能高的优点,已经取代杂质带探测器成为天文用红外探测器主流器件^[4]。

另外,阻挡杂质带探测器的最早提出者不仅从实验上成功制作了外延型硅掺砷(Si:As)阻挡杂质带探测器而且还建立了这类器件光电响应和噪声分析方法与理论模型^[7]。早期的硅基阻挡杂质带探测器的研究主要围绕硅掺砷展开的,硅掺砷阻挡杂质带探测器响应波段为 2~30 μm ^[9]。利用不同半导体材料和掺杂元素,可实现对不同波长的吸收和探测。硅基的阻挡杂质带探测器主要覆盖 5~40 μm ,锗基的覆盖 40~200 μm ,砷化镓的探测波长可以达到 300 μm ^[10]。

目前,越来越多的高性能阻挡杂质带探测器被运用到太空望远镜上^[1],为人类太空探测提供了强有力的工具。随着微电子行业的进步,特别是集成电路技术的快速发展,磷(P)和砷(As)元素作为 N

型掺杂的主要元素,被应用到了阻挡杂质带探测器的研制之中。受限于国内外延技术的发展水平,理想的外延高阻阻挡层难以获得^[11]。Beeman 等在 2007 年最先提出了新型横向的阻挡杂质带探测器结构^[10],并完成了离子注入锗掺硼(Ge:B)远红外阻挡杂质带探测器的制作和测试。廖开升等完成了硅基离子注入阻挡杂质带探测器的探索^[12],制作了硅掺磷(Si:P)离子注入阻挡杂质带探测器。集成电路工艺包含光刻、离子注入和刻蚀等工艺,利用集成电路兼容工艺加工阻挡杂质带探测器成为一种简单实用的方法。

1 器件的加工和封装

阻挡杂质带探测器中的补偿受主浓度 N_a 是一个非常更重要的参数,它会影响到探测器的耗尽层厚度等参数,进而影响到探测器的暗电流和黑体响应率等。为了提高探测器性能,应该选择 N_a 小的半导体材料。选择了晶向为(100),电阻率大于 10 000 $\Omega \cdot \text{cm}$ 的区熔法生长的单晶硅。通过查表可知, N_a 小于 $4 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$,非常符合阻挡杂质带探测器对补偿受主浓度的要求,这也是离子注入阻挡杂质带探测器高性能的重要原因。

砷元素的原子半径比较大,离子注入深度较浅。为提高吸收效率,需要增加砷离子浓度。为了获得砷离子在硅片中大剂量的均匀掺杂,采取四次不同能量和剂量的离子注入。通过 Silvaco 和 SRIM 软件模拟仿真,得到了中科院半导体所提供的最高能量为 400 kV 的砷离子注入条件。砷离子注入条件和形成的分布如图 1 所示。图 1 中彩色曲线代表几次不同能量和剂量砷离子注入形成的分布,黑色曲线代表总体的分布,由黑色曲线可知形成了厚度约为 0.3 μm 的均匀掺杂,掺杂浓度约为 $3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 。

离子注入型硅掺砷阻挡杂质带探测器的简要工艺流程如图 2 所示:高阻硅进行清洗后,用黑色区域代表的较厚的光刻胶做掩膜,砷离子注入在硅片上形成了浅绿色区域代表的吸收区;再用磷离子注入重掺在硅片上形成深绿色区域代表的电极接触区;再在硅片上生长如深蓝色区域代表的氮化硅作为钝化层,最后再生长用红色区域代表的金属铝作为电极层和电极接触区形成欧姆接触。

为了激活砷离子同时修复由于高能离子注入引起的晶格损伤,进行了温度为 1150 $^{\circ}\text{C}$ 氮气氛围的高温退火^[6]。生长完铝电极后为保证金属铝与重掺

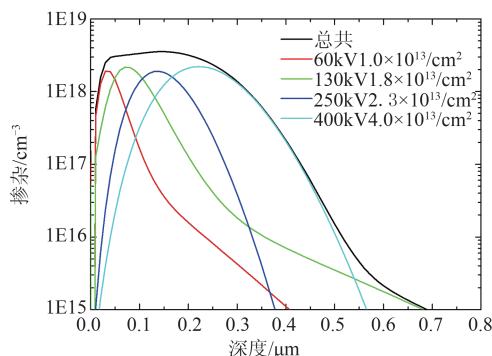


图1 四次砷离子注入方案和分布

Fig. 1 Doping profile of As concentration in the infrared-active layer by four-different-energy ion-implanted scheme

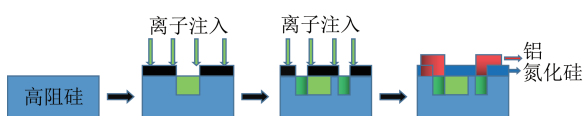


图2 离子注入阻挡杂质带探测器工艺流程简图

Fig. 2 Schematic process flow of the ion-implanted BIB detector

的电极接触区接触良好要在氮气氛围下450℃退火30分钟。探测器工艺完成后经激光切割可得单块探测器样品。

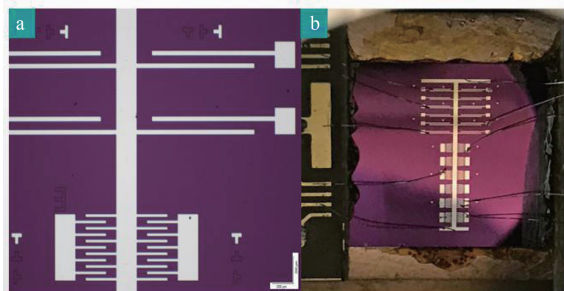


图3 (a)阻挡杂质带探测器局部放大图和(b)封装示意图

Fig. 3 (a) BIB detector's partial enlarged detail and (b) package of BIB detector

图3是器件的封装和探测器局部放大图,由图3(a)局部放大图可以看到,上面部分是直线型的探测器,下面部分是叉指型的探测器。设计了直线型和叉指型两种结构以及相应不同阻挡层厚度的探测器进行了实验。白色部分是铝电极,两个紧挨着的电极之间的部分是探测的吸收层和阻挡层,表面覆盖了一层氮化硅作为钝化层以抑制表面暗电流。

探测器的响应波长可达30 μm,需要在深低温下进行测试。将探测器通过低温胶粘到冷指上,再通过点焊方式将导线引出接到PCB板上进行测试。通过如图3b所示的封装,就可以进行器件的低温光

学和电学方面的测试。

2 器件测试与分析

2.1 黑体响应率

黑体响应率是表征探测器对单位黑体辐射功率产生的输出开路信号电压或短路信号电流。可以通过公式 $R_{bb}=I_{ph}/P_s$ 来表示, I_{ph} 为探测器的光电流, P_s 为辐射到探测器光敏元上的能量, $P_s=A_d \cdot E$, A_d 为探测器光敏元面积, E 为黑体辐照度,黑体辐照度公式

$$E = \alpha \frac{\varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) A}{\pi L^2} \quad (1)$$

其中, α 为调制因子; ε 为黑体辐射源的有效发射率; σ 为斯特潘-波尔兹曼常数; T 为黑体温度, T_0 为环境温度, A 为黑体辐射源的光阑面积,单位 cm^2 ; L 为黑体辐射源的光阑至被测探测器之间的距离,单位 cm 。测试了阻挡层为3 μm的叉指型阻挡杂质带探测器温度为5 K,黑体温度为800 K,斩波器频率为277 Hz的黑体响应,响应率曲线如图4所示。

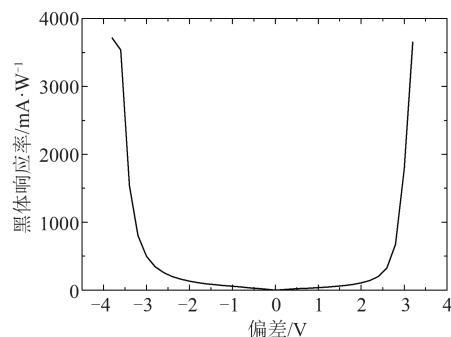


图4 探测器温度5 K黑体响应率

Fig. 4 Blackbody responsivity vs bias voltage at 5 K

由图4可以看到器件加正向偏压和反向偏压时,黑体都有响应,而且工作偏压范围内黑体响应率随着偏压的加大而增大。器件加-3.8 V偏压时,黑体响应率最大值为3.7 A/W,器件加3.2 V偏压时,黑体响应率为3.6 A/W。当探测器偏压不断增大,内部电场逐渐增大,加剧了电子之间的相互作用,使得黑体响应率急剧上升。器件正反偏压都能工作,而且反偏性能甚至更好,这与阻挡杂质带探测器基本模型推导的只能工作在正偏不符合。我们在最近发表的论文^[13]中通过实验数据和理论分析,分析了探测器不同区域能带结构和载流子分布,解释了反偏工作的原因,拓展了阻挡杂质带探测器的理论模型。

2.2 暗电流

暗电流是探测器的一项关键参数,是决定探测器性能重要因素。与前面分析可知,阻挡杂质带探测器在杂质带探测器中加入了阻挡层,由于阻挡层中杂质掺杂比较少不能形成杂质带,隔断了吸收层中的杂质带能级,起到了地抑制了暗电流的作用,从而使器件有着良好的暗电流表现。

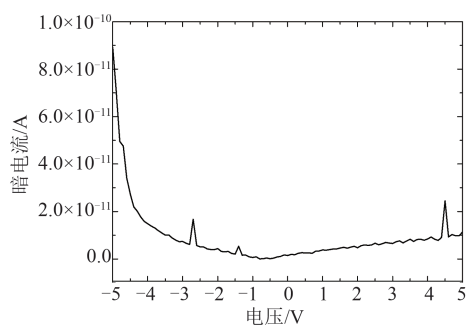


图5 探测器温度 5 K 暗电流

Fig. 5 Dark current vs bias voltage at 5 K

图5是测得的阻挡层厚度为3 μm 的叉指型阻挡杂质带探测器在温度为5 K时的暗电流性能。由于暗电流很小和噪声一个量级,出现了如图-3.6 V、-1.4 V以及4.5 V处由噪声引起的尖峰。由图5可以看到,器件在工作偏压范围内,暗电流小于 10^{-10} A。因为阻挡杂质带探测器对背景辐射十分敏感,所以测试时要加冷屏降低背景辐射对探测器暗电流的影响。探测器暗电流不对称是由于阻挡杂质带探测器结构的不对称所导致的。

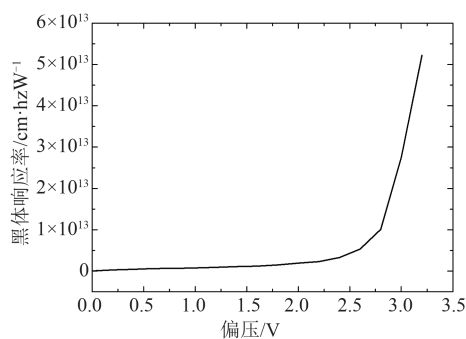


图6 探测器温度 5 K 探测率

Fig. 6 D^* vs bias voltage at 5 K

2.3 探测率

探测率是表征探测器性能的一个重要参数,黑体的探测率可以通过如下公式估算^[5]:

$$D^* = (R_{\text{bh}} / \sqrt{2qI_{\text{dark}}\Delta f}) \sqrt{A_d \Delta f} \quad (2)$$

其中 R_{bh} 是器件的黑体响应率, I_{dark} 是器件的暗电流,

A_d 是器件的光敏元面积, q 是单元电荷的带电量, Δf 是信号带宽。通过计算可以得到,当偏压为3.2 V时,器件的探测率为 $5.2 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。虽然加-3.8 V时黑体响应率更高,但是暗电流也更大,探测率比加3.2 V小。这比之前文献报道的性能要好^[4,10-11,14],离子注入型硅掺砷阻挡杂质带探测器良好的探测率性能归功于硅基阻挡杂质带探测器良好的暗电流和黑体响应性能共同作用的结果。

2.4 光电流谱

为了分析硅掺砷阻挡杂质带探测器的光电流响应特性,测量了中红外和远红外波段的光电流响应谱。

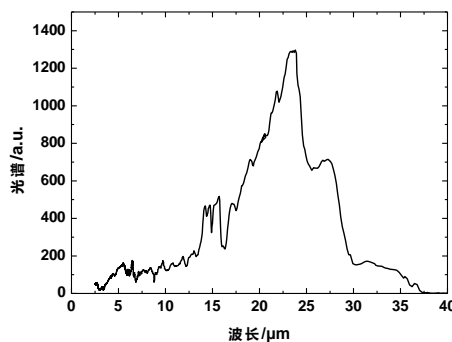


图7 探测器温度 5 K 光电流谱

Fig. 7 PC spectrum at 5 K

由图7可以看出,探测器在波长为2~37 μm 都有响应,探测器的峰值波长为23.8 μm ,半峰宽对应的波长分别为18.7 μm 和28.0 μm 。探测器在15 μm 左右有一个吸收峰,这是由硅的声子吸收引起的。波长大于16 μm 探测器响应急剧上升,到达23.8 μm 响应峰值后下降,下降过程中出现27.3 μm 和31.4 μm 响应峰。通过与杂质带能级对比,峰值波长23.8 μm 对应的跃迁能带为砷原子掺杂到硅中杂质带的1s到导带能级,27.3 μm 的响应峰对应的是1s到 $2p_x$ 能级,31.4 μm 的响应峰对应的是1s到 $2p_0$ 能级。

3 结论

优化离子注入阻挡杂质带探测器工艺,在国内首次制造出离子注入型的硅掺砷阻挡杂质带探测器,并测试了探测器低温下的光电性能。在温度为5 K时,探测器的暗电流在工作偏范围内小于 10^{-10} A,工作偏压-3.8 V时,探测器峰值波长23.8 μm ,探测器的黑体响应率为3.7 A/W,工作偏压为

3.2 V时,探测率为 $5.2 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。并指认了探测器响应峰对应的杂质能级。离子注入阻挡杂质带探测器可通过光刻和离子注入形成吸收层和阻挡层,解决了阻挡层需要高纯度外延层的工艺难题。优化后的工艺与集成电路工艺相兼容,可以通过集成电路工艺大规模标准化生产离子注入型阻挡杂质带探测器降低成本,同时探测器可以和读出电路集成到同一块芯片上提高了探测器的成像性能。

References

- [1] Rogalski A. Infrared detectors[M]. CRC press, 2010.
- [2] Petroff M D, Stapelbroek M G. BLOCKED IMPURITY BAND DETECTORS, US Patent 4568960 Feb.4, 1986.
- [3] Hoffman A W, Love P J, Rosbeck J P. Megapixel detector arrays: visible to $28 \mu\text{m}$ [C]//Focal Plane Arrays for Space Telescopes. International Society for Optics and Photonics, 2004, **5167**: 194–203.
- [4] Liao Kai-Sheng, Liu Xi-Hui, Huang Liang, *et al.* Blocked impurity band infrared detectors for astronomy [J]. *Sci. Sin-Phys. Mech. Astron.*, (廖开升, 刘希辉, 黄亮, 等.天文用阻挡杂质带红外探测器. *中国科学: 物理学 力学 天文学*), 2014, **44**(4): 360–367.
- [5] Szmulowicz F, Madarasz F L. Blocked impurity band detectors—an analytical model: figures of merit [J]. *Journal of applied physics*, 1987, **62**(6): 2533–2540.
- [6] Sclar N. Properties of doped silicon and germanium infrared detectors [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 1984, **9**(3): 149–257.
- [7] Petroff MD, Stapelbroek M G. Responsivity and noise models of blocked impurity band detectors, [J]. *Proceedings of the IRIS Specialty Group on IR Detectors, Seattle, WA*, 1984.
- [8] Stetson S B, Reynolds D B, Stapelbroek M G, *et al.* Design and performance of blocked-impurity-band detector focal plane arrays [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 1985, **686**:48–65.
- [9] Tezcan D S, Putzeys J, Munck K D, *et al.* Development of a Si: As blocked impurity band detector for far IR detection [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2007, **6660**:66600R–66600R–12.
- [10] Beeman J W, Goyal S, Reichertz L A, *et al.* Ion-implanted Ge: B far-infrared blocked-impurity-band detectors [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2007, **51**(1): 60–65.
- [11] Liao Kai-Sheng, Li Zhi-Feng, Wang Chao, *et al.* Si: P blocked impurity band detectors for far infrared detection [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (廖开升, 李志锋, 王超, 等. 用于远红外探测的Si:P阻挡杂质带红外探测器研制. *红外与毫米波学报*), 2016, **35**(1):37–41.
- [12] Liao Kai-Sheng, Li Ning, Liu Xi-Hui, *et al.* Ion-implanted Si: P blocked-impurity-band photodetectors for far-infrared and terahertz radiation detection [C]// ISPDI 2013 – Fifth International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging. International Society for Optics and Photonics, 2013.
- [13] Zhu H, Wang C, Wang P, *et al.* Optimized Si-Based Blocked Impurity Band Detector Under Alternative Operational Mode [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, **66**(9): 3891–3895.
- [14] Liao K S, Li N, Wang C, *et al.* Extended mode in blocked impurity band detectors for terahertz radiation detection [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **105**(14): 143501.