

硅基 1.55 μm 可调谐共振腔窄带光电探测器的研究*

毛容伟 成步文 李传波 左玉华 滕学公 罗丽萍 余金中 王启明

(中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室,北京 100083)

摘 要 制作了一种低成本硅基 1.55 μm 可调谐共振腔增强型探测器. 首次获得硅基长波长可调谐共振腔探测器的窄带响应,共振峰量子效率达 44%,峰值半高宽为 12.5 nm,调谐范围 14.5 nm,并且获得 1.8 GHz 的高频响应. 本制作工艺不复杂,成本低,有望用于工业生产.

关键词 共振腔增强型探测器;介质键合;InGaAs;可调谐;高频响应

中图分类号 O762;7755;4250

文献标识码 A

0 引言

近年来,解复用器与探测器集成于一身的谐振腔增强型(Resonant Cavity Enhanced, RCE)探测器,作为波分复用系统的一个关键器件之一. 下载话路用的解复用接收器件成为研究的热点. RCE 探测器不但具备了解复用器所具有的波长选择性,而且由于谐振腔的增强作用在一定程度上解决了在传统光电探测器中存在的量子效率和响应速度之间相互制约的矛盾. 可调谐探测器技术的引入更是极大提高了系统的灵活性.

1.3~1.55 μm 是石英光纤低损耗窗口,是长途光通讯的工作波段. 虽然近年来 1.3 μm 波段的 GaInNAs 材料取得了飞跃发展^[1,2],但是生长 1.55 μm 波段的有源区材料尚不成熟. InP 基材料外延技术成熟,被广泛用于制作长波长器件,但是该材料系没有合适的反射镜材料^[3]. 为此,人们借助键合手段进行了一系列的研究^[4~7],直接键合工艺难度大,要求高,而金属键合所使用的介质是金属,光吸收损耗大,光在垂直方向无法集成. 此外,新型 InP 基反射镜材料 AlAsSb/AlGaAsSb^[8~10] 也得到迅速发展,更有 J. Boucart 等人在直接在 InGaAsP 有源区上外延 GaAs/AlGaAs 反射镜材料^[11]. 利用外延技术制作布拉格反射镜,它们的共同特点是外延成本昂贵,技术难度大.

本文提出以溶胶-凝胶法制备的硅乳胶为键合介质,把 InGaAs 探测器键合到硅基片上,无需抛光工艺,工艺要求低,并且利用此方法成功的制作了硅基 1.55 μm InGaAs 窄带可调谐探测器. 硅乳胶是一种以正硅酸乙脂为原料,在适当的条件下经水解

而成^[12],退火之后转变成二氧化硅玻璃态物质,对红外光没有明显的吸收作用,制作的光器件可以在垂直方向集成.

1 Si 基 InGaAs 共振腔探测器的制作工艺

硅基 InGaAs RCE 探测器的器件结构如图 1. 详细的外延层结构请参照表 1.

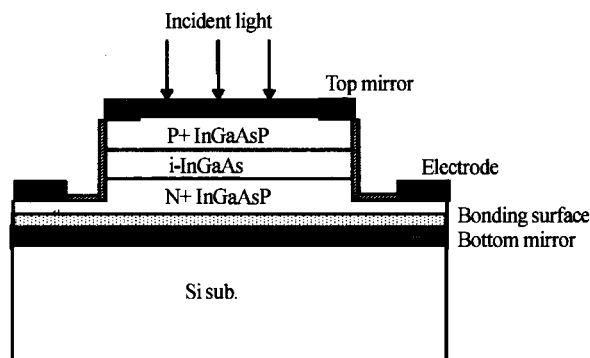


图 1 InGaAs RCE 探测器的结构

Fig. 1 Schematic diagram of the InGaAs RCE photodetector

表 1 外延层的结构

No	Composition	Doping/cm ³	Thickness
6	InP	Undoped	300 nm
5	In _{0.727} Ga _{0.273} As _{0.6} P _{0.4}	N2×10 ¹⁸	500 nm
4	In _{0.727} Ga _{0.273} As _{0.6} P _{0.4}	Undoped	100 nm
3	In _{0.53} Ga _{0.47} As	Undoped	200 nm
2	In _{0.727} Ga _{0.273} As _{0.6} P _{0.4}	Undoped	150
1	In _{0.727} Ga _{0.273} As _{0.6} P _{0.4}	P1×10 ¹⁸	160 nm

Si 基 InGaAs 共振腔探测器的制作工艺主要包括:在 InP 衬底上外延 InGaAs 有源区,以及生长反射镜、键合等工艺. 具体工艺流程为:首先在 InP 衬底上外延晶格匹配的 InGaAs 外延层,接着在外延层上用等离子增强化学气相沉积(PECVD)系统生长 300 nm 厚的 SiO₂,在另一 Si 基片上生长三对半中心波长为 1.55 μm 的 SiO₂/Si 高反射镜. 经有机溶剂清洗后,在外延片和 SiO₂/Si 反射镜上旋涂上硅乳胶,然后把它们贴合在一起. 放入真空系统,进

* 国家重点基础研究发展规划(973 项目, No. G2000036603)、863 项目(No. 2002AA312010)和国家自然科学基金(No. 90104003, 60376025, 60336010, 60223001)资助
Tel: 010-82304505 Email: maorongwei@red.semi.ac.cn
收稿日期: 2004-09-16

行高温退火,最高退火温度 350℃. 退火之后,使用 $HCl : H_3PO_4 = 1 : 1$ 腐蚀液去除 InP 衬底,在腐蚀之后留下的外延层上制作台面 pin 型探测器,最后在通光孔上带胶剥离生长两对半 SiO_2/Si 上反射镜,构成共振腔探测器结构. 外延片的结构如表 1. 除了吸收层 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 外,其他外延层对 1.55 μm 波段的光没有明显的吸收.

2 共振腔探测器的光电响应

RCE 探测器的暗电流使用惠普 4140B 电流表测量. 暗电流为 $1.15 \times 10^{-10} A (-1 V)$,台面尺寸 $50 \times 50 \mu m^2$,暗电流密度为 $4.6 \mu A/cm^2$.

RCE 探测器的光电响应测试使用宽带光源在室温下进行. 碘钨灯发出的光经过透镜,聚焦到单色仪,经过单色仪的波长选择作用,耦合到多模光纤,最后垂直入射到探测器上. 探测器产生的光电流输入到锁相放大器中,零偏压工作. 单色仪的分辨率约为 1 nm,锁相放大器的测量准确度高于 0.1 nA. RCE 探测器的光电响应如图 2. 峰值响应度为 0.28 A/W ($\lambda = 1541 nm$),量子效率 22.6%,峰值半高宽 27 nm. 从图中可以看出,加入共振腔结构,其量子效率有 3 倍的提高. 和理论计算结果相比,峰值半高宽(FWHM)展宽严重,量子效率也比理论值小得多,这可能来源于界面起伏和镜面起伏带来的影响^[13].

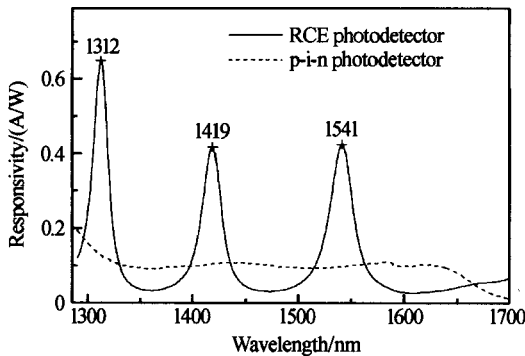


图 2 零偏压下的光电响应
Fig. 2 The measured photocurrent response of the sample under zero reverse bias

器件能够在零偏压下工作,这是 p-i-n 探测器的一个基本特性. 测试表明,施加偏压后探测器的量子效率并没有明显提高,这表明在零偏压下本征区已经耗尽. 图 3 给出了光电流随入射光功率之间的关系. 从图中可以看出,当光功率小于 1 mW 时,器件具有良好的线性特性,最大光电流达 0.4 mA,可以在不外加放大器的情况下直接工作. 随着入射光功率的提高,零偏压探测器逐渐出现饱和现象,这是因载流子在异质结界面的聚集效应引起的^[14,15],施

加 1.5 V 以上的偏压后,器件的光电流和入射光功率保持很好的线性关系. 为改善器件的线性特性,可以把异质结设计成缓变结结构,减缓载流子的聚集效应.

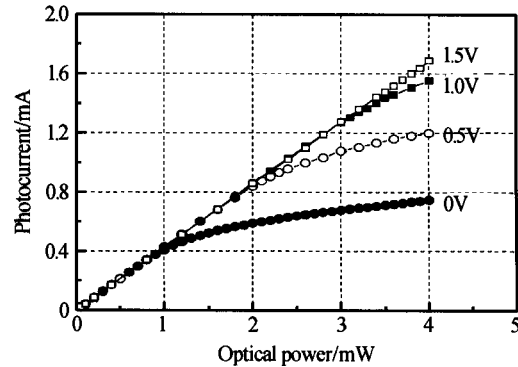


图 3 不同偏压下探测器的光电响应和输入光功率的关系
Fig. 3 The photocurrent of the photodetector versus optical input power under various reverse biases

在本结构中,键合界面是腔体的一部分,据实验证实,键合介质没有明显的吸收作用,但是键合界面的平整度以及厚度都会影响器件的光学特性—量子效率和峰值半高宽. 一方面,键合界面的起伏容易引起光散射,导致量子效率下降. 另一方面,键合层厚度不均,容易导致不同腔模的叠加,引起 FWHM 展宽. 为解决上述问题,改进了器件结构,把键合界面移至腔外.

3 改进后的器件结构及其特性

在本结构中,作了两点改进:1)先在 InP 外延片上生长 SiO_2/Si 下反射镜,而后把反射镜键合到硅衬底上,其他工艺步骤不变,即图 1 的键合界面和下反射镜发生调换,其结构如图 4;2)改进外延片结构,减小吸收区的厚度,增加整个外延层的厚度. 外延层调整为:吸收层厚度减小到 40 nm,p 侧间隔层和 n 侧间隔层的厚度分别为 300 nm 和 1110 nm,p 电极层和 n 电极层的厚度分别为 800 nm 和 300 nm. 总厚度约为 2.7 μm .

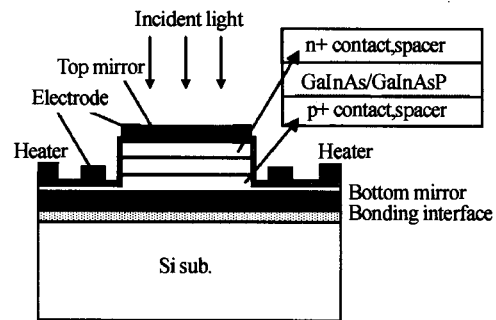


图 4 InGaAs RCE 探测器的结构
Fig. 4 Schematic diagram of the InGaAs RCE photodetector
共振腔增强型探测器的峰值半高宽可以表示

为^[16]

$$FWHM = \frac{\lambda_0^2}{2\pi n_{eff} L_{eff}} \frac{1 - \sqrt{R_1 R_2} e^{-\alpha d}}{4 \sqrt{R_1 R_2} e^{-\alpha d/2}} \quad (1)$$

式中 λ_0 是工作波长, α 为材料的吸收系数, d 为吸收区厚度, L_{eff} 为等效腔长, n_{eff} 为等效折射率. 增加外延层厚度(等效腔长变大), 减小吸收层的厚度都有利于减小探测器的峰值半高宽.

改进的器件特性如图 5, 在共振峰 1476 nm 处器件的量子效率大约为 44%, 峰值半高宽约为 12.5 nm, 和原器件相比, 有一个较大的改善作用. 共振增强因子提高到 20 左右.

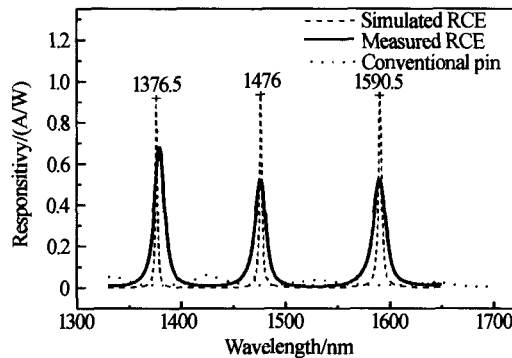


图 5 零偏压下探测器的光电响应
Fig. 5 The measured photocurrent response of the photodetector under zero reverse bias

4 器件的高频特性

器件的高频特性如图 6, 该器件采用改进后的有源区结构. 影响共振腔探测器的高频特性有两个因素, 即载流子的渡越时间和器件的 RC 常数. 本征层的厚度减小后, 载流子的渡越时间减小, 但是器件的电容增加, RC 常数增加, 因此在它们之间存在一个相互制约的关系. 在 40 GHz 以下, 载流子的渡越时间一般不是高频的制约因素. 因此, 设计高频时主要是优化器件的 RC 参数, 减小台面面积, 改善器件的欧姆接触特性. 此外, InGaAsP 的电子漂移速度比空穴的漂移速度高一个数量级, 当电子的

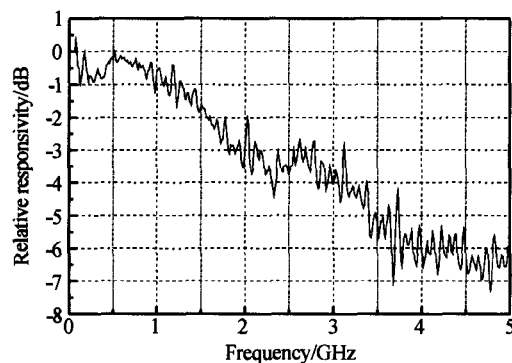


图 6 器件的高频响应
Fig. 6 Measured frequency response of the device

渡越时间和空穴的渡越时间相等时达到最佳, 因此吸收区的位置一般比较靠近 p 电极层.

综上所述, 改进后的结构采用比较厚的本征层, 大约为 1.5 μm, 并且吸收区的位置比较靠近 p 电极层. 电极采用 TiPtAu 材料, 450 °C 快速热退火 30 s, 氢气气氛中进行. 器件的台面尺寸 $\Phi = 70 \mu\text{m}$, 电容约为 0.5 pf, 电阻约为 150 Ω. 测试偏压 -2.5 V, 测试光功率 3 mW, 使用 HP8720D Lightwave Component Analyzer 测试, 获得 1.8 GHz 的 3 dB 带宽, 如图 6. 把器件台面缩小后, 有望进一步改善器件的高频特性.

5 器件的调谐特性

用作解复用接收器件时, 如果具备可调谐特性, 那么系统的灵活性将得到极大增强, 而且有助于降低系统复杂度, 降低成本. 在各种调谐技术中, 热光调谐的工艺最为简单. 本文在上述工艺的基础上在探测器台面的周围制作了宽为 20 μm 的 TiPtAu 环形加热电阻, 其工艺和上述共振腔探测器的工艺步骤相同, 没有增加额外的工艺步骤, 其结构如图 4. 制作后的加热器的阻抗大约 10 Ω, 施加 2.4 V 偏压后, 调谐范围达 14.5 nm, 并且在调谐范围内器件的量子效率的变化幅度在 5% 以内, 如图 7, 器件的峰值半高宽基本不变(见图 8), 调谐功耗大约为 40 mW/nm.

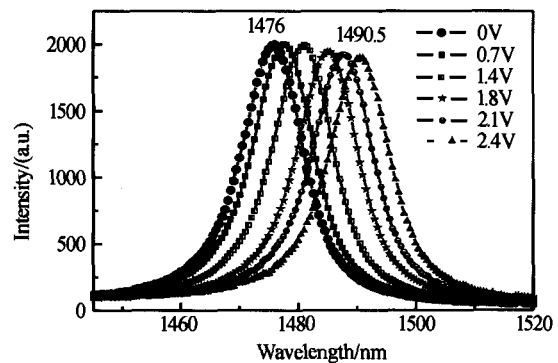


图 7 探测器的调谐特性
Fig. 7 The tuning characteristics of the photodetector

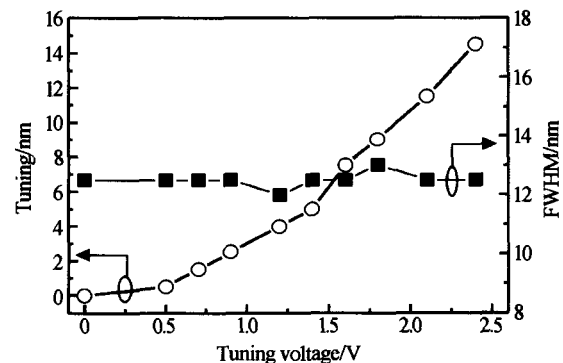


图 8 调谐范围以及 FWHM 和调谐电压之间的关系
Fig. 8 Tuning and FWHM of the photodetector versus applied bias voltage

6 结论

本文报道了一种利用硅乳胶作为键合介质的新型键合技术,高反射率的 SiO₂/Si 反射镜预先用 PECVD 系统生长在 InGaAs 有源区上,然后键合到硅衬底上,键合温度 350℃,无需特殊表面处理,反射镜的反射率可以高达 99.9% 以上,并在国际上首次获得硅基长波长可调谐共振腔增强型探测器,峰值响应波长约 1.5 μm,量子效率达 44% 的窄带响应,峰值半高宽约为 12.5 nm,调谐范围达 14.5 nm. 在整个调谐范围内,器件的量子效率基本保持不变,变化幅度在 5% 以内. 此外,与波长固定的 RCE 探测器相比,可调谐探测器的制作没有增加额外的工艺步骤. 在台面尺寸为 Φ=70 μm 的情况下获得约为 1.8 GHz 的高频响应,减小台面尺寸有望进一步提高响应频率. 本方法制作工艺不复杂,成本低,如果能和可调谐硅基 1.55 μm 面发射激光器^[17]集成在一起,有望用于 OADM 系统上下话路,从而极大提高系统灵活性,提高系统的集成度,降低成本.

参考文献

- Héroux J B, Yang X, Wang W I. GaInNAs resonant-cavity-enhanced photodetector operating at 1.3 μm. *Appl Phys Lett*, 1999, **75**(18): 2716~2718
- Zhang R K, Zhong Y, Xu Y Q, et al. 1.3 μm GaInNAs/GaAs quantum well resonant cavity enhanced photodetector. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(3): 303~306
- Karim A M, Thesis Ph D. Wafer Bonded 1.55 μm Vertical Cavity Laser Arrays for Wavelength Division Multiplexing. US: University of California, Santa Barbara press, 2001. 35~45
- Karim A, Abraham P, Lofgreen D, et al. Wafer bonded 1.55 μm vertical-cavity lasers with continuous-wave operation up to 105℃. *Appl Phys Lett*, 2001, **78**(18): 2632~2633
- Salvador A, Huang F, Sverdlov B, et al. InP-InGaAs resonant cavity enhanced photodetector and light emitting diode with external mirrors on Si. *Electron Lett*, 1994, **30**(18): 1527~1529
- Salvador A, Sverdlov B, Lehner T, et al. Resonant cavity enhanced InP-InGaAs photodiode on Si using epitaxial liftoff. *Appl Phys Lett*, 1994, **65**(15): 1880~1882
- Ünlü M S, Emsley M K, Dosunmu O I, et al. High-speed Si resonant cavity enhanced photodetectors and arrays. *J Vac Sci Technol A*, 2004, **22**(3): 781~787
- Nakagawa S, Hall E, Almuneau G, et al. 1.55 μm InP-lattice-matched VCSELs with Al-GaAsSb-AlAsSb DBRs. *IEEE J Select Topics Quantum Electron*, 2001, **7**(2): 224~230
- Ostinelli O, Almuneau G, Ebnother M, et al. MOVPE growth of long wavelength AlGaAsSb/InP Bragg mirrors. *Electron Lett*, 2004, **40**(15): 940~942
- Dias I F L, Nabet B, Kohl A, et al. Electrical and optical characteristics of n-type-doped distributed Bragg mirrors on InP. *IEEE Photon Technol Lett*, 1998, **10**(6): 763~765
- Boucart J, Starck C, Gaborit F, et al. Metamorphic DBR and tunnel junction injection: A CWRT monolithic long-wavelength VCSEL. *IEEE J Select Topics Quantum Electron*, 1999, **5**(3): 520~529
- Brinker C J, Keefer K D, Schaefer D W, et al. Sol-Gel transition in simple silicates. *J Non-Crystalline Solids*, 1982, **48**: 47~64
- 左玉华, 毛容伟, 黄昌俊, 等. 镜面起伏对 1.55 μm Si 基 MEMS 光滤波器的影响. *光子学报*, 2003, **32**(6): 661~664
- Zuo Y H, Mao R W, Huang C J, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6): 661~664
- Lin L Y, Wu M C, Itoh T, et al. High-power high-speed photodetectors - design, analysis, and experimental demonstration. *IEEE Trans Microwave Theory Technol*, 1997, **45**(8): 1320~1331
- Huang Y L, Sun C K. Nonlinear saturation behaviors of high-speed p-i-n photodetectors. *J Lightwave Technology*, 2000, **18**(2): 203~212
- Ünlü M S, Strite S. Resonant cavity enhanced photonic devices. *J Appl Phys*, 1995, **78**(2): 607~639
- 毛容伟, 左玉华, 成步文, 等. 1.3~1.55 μm 光通讯用 VCSEL 的研究进展. *光子技术*, (待发表)
- Mao R W, Zuo Y H, Cheng B W, et al. *Photon Technology*, (to be published)

The Fabrication of Low Cost Si-based Continuously Tunable 1.55 μm RCE Photodetector

Mao Rongwei, Chen Buwen, Li Chuanbo, Zuo Yuhua, Teng Xuegong, Luo Liping,
Yu Jinzhong, Wang Qiming

*State Key Joint Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*

Received date: 2004-09-16

Abstract A novel method for fabricating low cost Si-based continuously tunable long wavelength resonant cavity enhanced (RCE) photodetectors was reported, in which InGaAs epitaxy layers were bonded to silicon substrates without any special treatment on bonding surfaces, employing the silicate gel as bonding medium. A thermally tunable Si-based InGaAs RCE photodetector operating at 1.3~1.6 μm was obtained, with a quantum efficiency of about 44% at the resonant wavelength of about 1.5 μm and a FWHM of about 12.5 nm. A tuning range of 14.5 nm and a 3 dB bandwidth of 1.8 GHz were obtained. This device was fabricated with traditional processes, thus the cost was decreased. It demonstrates a great potential for industry processes.

Keywords Resonant cavity enhanced photodetector; RCE; Medium bonding; InGaAs; Tunable; High frequency response

Mao Rongwei was born on Oct. 6, 1977, in Zhejiang province. He is majoring in semiconductor physics and semiconductor device physics in institute of semiconductors, Chinese academy of sciences. Under the guidance of Prof. Wang Qiming, he is studying the Si-based photonics.

