

1064nm RCE 探测器光电响应特性分析*

彭红玲 章 昊 韩 勤 杨晓红 杜 云 倪海桥 佟存柱 牛智川 郑厚植 吴荣汉

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 对 1064nm 谐振腔增强型(RCE)光电探测器(PD)的光电响应特性进行了分析研究. 利用 MBE 生长技术得到有源区分别为量子阱和量子点的 1064nm RCE 探测器的外延片, 并对制作的探测器进行了各种光电特性测试. 结果表明量子阱结构的 RCE 探测器量子效率峰值达到 57%, 谱线半宽 6~7nm, 峰值波长 1059nm; 而量子点结构的 RCE 探测器量子效率峰值达到 30%, 谱线半宽 5nm, 峰值波长 1056nm. 通过分析量子效率和吸收系数之间的关系, 对两种结构器件的吸收进行了比较, 发现虽然量子点探测器的吸收小, 但通过合理设计共振腔等方法也可以达到较高的量子效率. 两种结构的器件都有很好的 FV 特性.

关键词: 谐振腔增强型; 光电探测器; 量子阱; 量子点

EEACC: 2530C; 4100; 4150

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)08-1605-05

1 引言

谐振腔增强型光电探测器(RCE-PD)是一种新型探测器, 探测效率高, 响应速度快, 可在无外偏压情况下工作, 具有波长选择性和空间方向选择性等优点, 特别适用于对波长精度要求极高的光纤通信系统. 而谐振腔增强型光电探测^[1]、调制、滤波^[2]器件和垂直腔面发射器件有着非常相似的结构, 器件可在同一芯片上功能集成, 易于与微电子电路集成制作成光电集成模块, 是未来发展的趋势.

因为 Nd:YAG 激光器广泛应用于工业制造、医学、近红外喇曼光谱学、远程探测和武器导航等方面, 所以对与其相应的 1064nm 波长探测器的需求也非常迫切. 而 1064nm 波长正好处在常规探测器 Si 的响应长波长和 InGaAs/InP 响应的短波长之间, 因此有必要研制新型的高效、低噪声和高响应速度的 1064nm 探测器^[3]. 已经有文献报道, 研制出了量子阱(QW)和量子点(QD)结构的各波长 RCE 探测器, 都可以实现较高量子效率和较低暗电流特性^[3,4]. 在 GaAs 衬底上已经制作出工作波长为

1.3 μ m 的 GaInNAs 量子阱 RCE 探测器^[5]. 本文介绍的是我们研制出的 GaAs 基 1064nm 量子阱和量子点 RCE 探测器, 其峰值量子效率分别达到 57% 和 30%, 其中量子点 RCE 探测器的量子效率是国内同类探测器的最高量子效率, 量子阱的量子效率也达到国内较高水平. 目前国外报道的关于 1064nm 波段的 RCE pin 探测器的峰值量子效率最大为 65% 左右. 本文还将对两种结构(QW 和 QD)的探测器性能进行比较, 研究人员可以根据其各自特点从中选择合适的器件来满足需要.

2 理论分析

分析 RCE 探测器的工作原理, 可以推导出量子效率等参数的数值表达式^[6]. 谐振波长处的量子效率峰值为: $\eta_p = \left\{ \frac{1 + R_2 e^{-\alpha d}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2} e^{-\alpha d})^2} \right\} (1 - R_1) (1 - e^{-\alpha d})$, 这里 R_1 为上 DBR 反射率; R_2 为下 DBR 反射率; 上下反射镜之间的吸收层厚度为 d , 吸收系数为 α , 为驻波增强因子.

由于谐振腔的作用, 波长选择特性是共振增强

*国家自然科学基金(批准号:60376025,60137020), 国家高技术研究发展计划(批准号:2002AA312080)和国家重点基础研究发展规划(批准号:TG2000036603)资助项目

彭红玲 女, 1972 年出生, 博士研究生, 目前从事 GaAs 基材料与器件研究.
2004-11-23 收到, 2005-03-31 定稿

型探测器的固有特性.在不满足谐振条件的波长位置,腔内光场的幅值将由于前向波与后向波的相消干涉而减小,量子效率降低,只在谐振波长附近很窄的范围内具有高量子效率,表现出波长选择性.量子效率谱的峰值半高宽(FWHM)即体现了探测器光电响应的波长选择性, $FWHM = \frac{\lambda_0^2 (1 - \sqrt{R_1 R_2} e^{-\alpha d})}{2 n_g L_{eff} \sqrt{R_1 R_2} e^{-\alpha d/2}}$, 其中 L_{eff} 为探测器的等效腔长; n_g 为模式的群折射率; λ_0 为模式波长.

由此,模拟计算了工作在 1064nm 的 RCE 探测器量子效率和 FWHM 随上 DBR 反射率及吸收的变化曲线,如图 1 所示.可以看到,随着上 DBR 反射率的增加,FWHM 逐步减小(图中单调下降的四条曲线,分别对应四种不同吸收系数),量子效率峰值 ρ_p 则先增加后减小.要同时得到高 ρ_p 和窄的 FWHM,就需合理设计探测器的结构和材料参数.

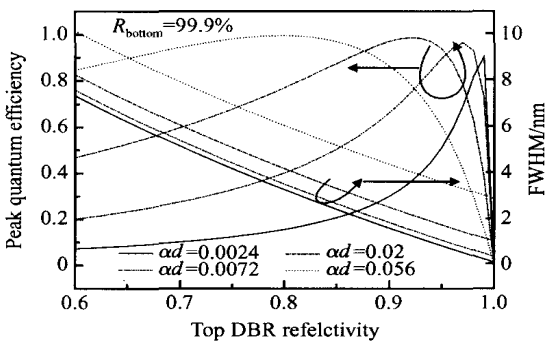


图 1 1064nm RCE-PD 理论计算的量子效率和 FWHM 随反射率及吸收的变化

Fig. 1 1064nm RCE-PD calculated variation of quantum efficiency and FWHM as function of top DBR reflectivity and absorption

从图中还可以看出,吸收系数越大,半高宽也越大,但最佳 ρ_p 所需要的上 DBR 反射率反而减小,所以对于吸收系数比较高的材料,在保证一定的半高宽条件下,可以减少上 DBR 对数,简化材料的生长工艺.从中还可以得到一个启示:利用吸收系数小的材料做有源区,利用共振腔的作用可能得到较高的量子效率和较窄的半高宽,如图中的吸收系数为 0.0024 所对应的效率和半高宽曲线, ρ_p 在上 DBR 反射率很高时也可以得到最优值.量子点探测器正是利用这一特性,将量子点吸收区置于一个高 Q 因子(低损耗)的共振腔,可以达到与量子阱相比拟的量子效率.从文献[7]中也可知道,对于量子点探测

器,由于量子点有源层吸收系数很低,共振腔显得非常重要,高 Q 因子的共振腔还可以得到很窄的峰值量子效率线宽. Campbell 等人已经研制出量子效率为 49%,半高宽为 1.2nm 的量子点 RCE-PD^[7].

根据以上理论计算和需要,分别设计了量子阱和量子点 RCE 探测器的器件结构(后面将分别描述).设计的 QW RCE-PD 量子效率的理论值为 99.8%,QD RCE-PD 的为 44.7%.

3 实验结果和讨论

3.1 1064nm 量子阱 RCE-PD 实验和结果讨论

本文中的材料均采用 MBE(分子束外延)技术生长.量子阱探测器样品 1 的结构采用 In_{0.27}Ga_{0.73}As 为有源层, GaAs 为势垒,上下分别为 7 对和 26 对 GaAs/AlAs DBR(经过优化).在生长有源层和 DBR 层时,通过调整生长参数和条件,尽量使得外延片实际腔模波长和理论设计一致.然后通过测试外延片的反射谱和 PL 谱,找到合适的腔模波长之后做成器件.量子阱探测器样品 1 的外延结构如图 2 所示.

GaAs	76.2nm	p ⁺ 5 × 10 ¹⁹ cm ⁻³	
AlAs	94.2nm	p ⁺ 1 × 10 ¹⁹ cm ⁻³	
GaAs/AlAs		1 × 10 ¹⁸ cm ⁻³	×6
GaAs	792.14nm	i	
In _{0.27} Ga _{0.73} As	7nm	i	
GaAs	20nm	i	×10
GaAs	792.14nm	i	
AlAs/GaAs		n ⁺ 4 × 10 ¹⁸ cm ⁻³	×26
GaAs buffer	300nm	n ⁺ 4 × 10 ¹⁸ cm ⁻³	
n GaAs substrate			

图 2 量子阱 RCE 探测器结构

Fig. 2 QW RCE-PD's epitaxial structure

选择原片某一部分做成 200μm × 200μm 的宽接触探测器,得到如图 3(a)所示结果,图 3(b)为根据我们设计的器件结构(QW 和 QD)计算得到的量子效率峰值与材料吸收之间的关系.从图 3(a)可以看到 FWHM 约为 6~7nm,峰值波长 1059nm,此波长比设计的 1064nm 波长短,是由于实验中生长条件的偏差,出现了 In 原子的表面解吸附和分凝现象,限制了 InGaAs 量子阱中 In 组分的提高.特别是在高温生长时表面解吸附和分凝现象更严重,这

就使得生长出来的外延片 PL 谱峰值波长短于设计的 1064nm, 同样最后做出的器件测试得到的光电流谱和响应的量子效率谱也偏短. 从图中还得到峰值量子效率为 57%; 从图 3(b) 得到其相应的吸收系数与厚度积 $d = 0.056$. 当然这样的理论计算和实际结果有一定偏差, 但基本反映了吸收系数的大小, 和后面的量子点结构可以做一比较. 实际测试的量子效率比理论计算的小, 原因是多方面的, 既有材料生长过程的影响, 也有器件结构及制作工艺的影响, 还有原片不同位置的吸收系数差异等原因.

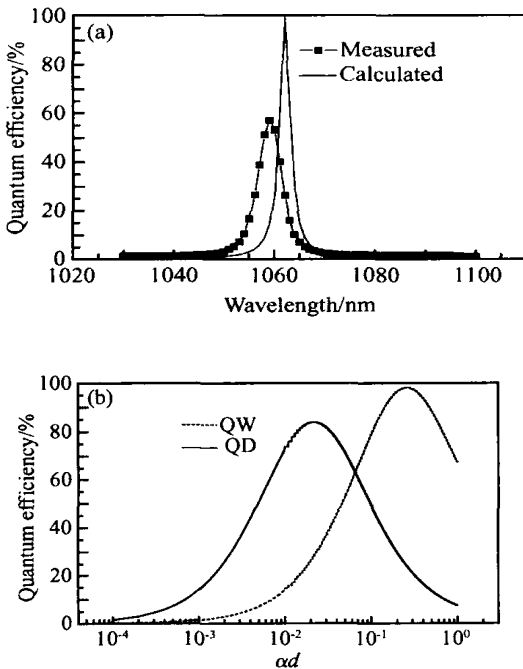


图 3 (a) QW RCE-PD 的量子效率; (b) 理论计算的 RCE-PD 量子效率与吸收系数的关系
Fig. 3 (a) QW RCE-PD's quantum efficiency; (b) Calculated RCE-PD's quantum efficiency versus absorption

器件在无光照时的 $I-V$ 曲线见图 4, 其暗电流在零偏置时的值为 4.01×10^{-10} A, 暗电流密度 1.0×10^{-2} A/m² (即 1.0×10^{-14} A/ μ m²), 耐压值达到 -25V 左右, 表明器件具有良好的暗电流特性. 图中插图为零偏压附近的电流局部放大图, 电流坐标放大了 10^{10} 倍.

3.2 量子点 1064nm RCE 探测器实验及结果讨论

量子点探测器利用其对光子和电子的多维限制, 可以减小器件的温度敏感性, 降低功耗, 提高响应速率. 应用 DBR 共振腔后的光探测器 (对光子进

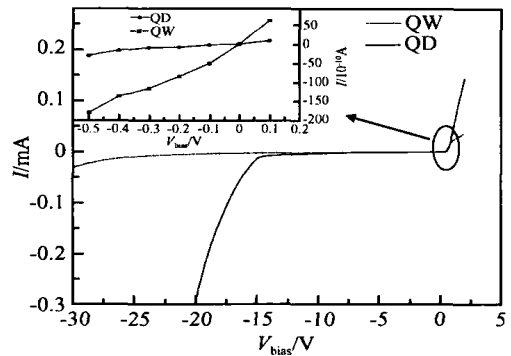


图 4 QW 和 QD RCE 探测器的 $I-V$ 曲线
Fig. 4 $I-V$ curve of QW and QD RCE-PD

行了三维的光限制), 可以获得较高的量子效率和很窄的带宽, 波长选择性很好. 而对于 Γ 族自组织量子点器件, 由于其三维方向限制的电子波函数和分立的态密度等特性, 在光电器件的研制中有着极大的优势. 本文采用的样品 2 是以 InGaAs/GaAs 量子点为有源层, 外面为不同对数的上下 DBR 包围的结构. 采用这样的结构也是经过了优化设计, 考虑了有源层的光场分布等. 样品 2 结构如图 5 所示.

	GaAs	76.15nm	$p^+ 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
14 ×	AlAs	90.14nm	$p^+ 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
	GaAs	5nm	$p^+ 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
	GaAs	123.3nm	i
	InGaAs QD	6MLs	i
4 ×	GaAs	12nm	i
	InGaAs QD	6MLs	i
	GaAs	104.3nm	i
	InGaAs QD	6MLs	i
4 ×	GaAs	12nm	i
	InGaAs QD	6MLs	i
	GaAs	123.3nm	i
	GaAs	5nm	$n^+ 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
	AlAs		$n^+ 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
19 ×	GaAs		$n^+ 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
	GaAs buffer		$n^+ 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
	n	GaAs substrate	

图 5 量子点 RCE 探测器的结构

Fig. 5 QD RCE-PD's epitaxial structure

选择生长好的材料原片中的一部分做成器件, 测试其光电特性, 得到图 6(a) 所示的反射谱、透射谱和 PL 谱 (图中为了观察方便, PL 谱和透射谱的数据都扩大了 10 倍) 以及图 6(b) 虚线所示的量子效率. 图 6(a) 测试的是原片的性能, 由于生长过程

中各种因素的影响,高反带不是很平整,但反射谱、透射谱和 PL 谱基本是一一对应的.同量子阱结构相似的原因是,由于 In 的组分受生长条件限制达不到预期值,所以最后得到的量子效率峰值波长也较设计值短,为 1056nm;从图 6(b)看出,峰值波长为 1056nm 处的峰值量子效率为 30%.由图 3 理论计算得到的量子效率和吸收系数之间的关系,可以看出器件的 d 在 0.0025 左右.与量子阱结构相比,量子点的吸收明显较低,但合理设计共振腔,也能达到较高的量子效率.

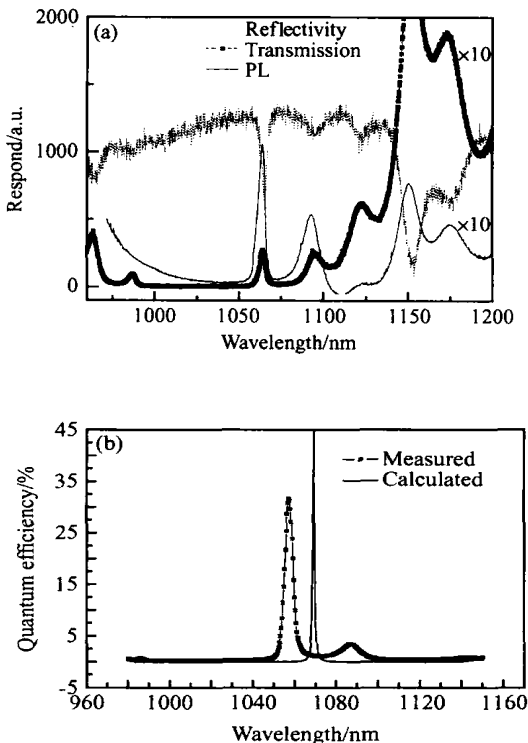


图 6 (a) 实验测试的器件反射谱、透射谱和 PL 谱;(b)量子点 RCE-PD 的量子效率

Fig. 6 (a) Reflectivity, transmission and PL of QD RCE-PD; (b) QD RCE-PD's quantum efficiency

从图 6(b)还可以看到 FWHM 小于 5nm,由于受到测试仪器分辨率的限制,所以实际半高宽应该更小.采用 DBR 谐振腔,不但使器件具有波长选择性,而且借助于光波在谐振腔的往复能使光波多次通过吸收层形成光增强效应,使器件在较薄吸收层的情况下也能获得较高的量子效率.因为吸收层可以做得较薄,从而降低了光生载流子在吸收层的渡越时间及层外的扩散分量,提高了器件的响应速度,能使量子效率和响应带宽都达到最优.

从图 4 的 $I-V$ 特性曲线可以得到:量子点探测

器的耐压值为 -15V 左右;零偏置时的暗电流密度为 $2.4 \times 10^{-3} \text{ A/m}^2$,此 QD-PD 的暗电流比 QW-PD 的小这可能是因为 QD-PD 面积比 QW-PD 小,在工艺制作过程中对表面清洁处理比较好,或者是因为生长的材料质量比较好,减少了耗尽层中的缺陷和杂质等.从 $I-V$ 曲线还可以看到,与量子阱探测器相比,量子点 RCE 探测器的反向击穿电压相对较低,这可能是因为量子点结构的有源区厚度比量子阱的薄,也可能是工艺过程中对器件的侧壁钝化等处理结果的影响.下一步的工作将是改进器件结构,减小电阻和电容,进一步提高量子效率,减小暗电流和提高响应速率.

4 结论

利用 InGaAs/GaAs 量子阱和 InGaAs/GaAs 量子点分别实现了 1064nm 的 RCE-PD,峰值量子效率分别达到了 57%和 30%左右,经过结构优化还可能达到更高的量子效率;暗电流很小,反向击穿电压都比较高.实验过程中材料生长质量对器件各项光电性能有很大影响.今后的工作就是通过设计器件结构,同时控制材料生长过程和后期器件制作工艺过程来减小电容、电阻,改善器件的高频特性,提高器件的量子效率等静态特性.

比较而言,量子点材料虽然吸收系数相对于量子阱结构的小,但合理设计后也可以实现较高的量子效率;其量子效率的峰值半高宽比较小,可实现良好的波长选择性,对于研制适用于通信波段的 1300,1500nm 探测器有借鉴作用.并且量子点有很高的热激活能,可以在高温下工作;有声子瓶颈效应,载流子的弛豫时间较长,有较高的光生载流子输运量子效率,较高的探测率和响应率.有鉴于此,量子点探测器的研究将成为探测器应用发展的一个方向和理论研究的热点.

参考文献

- [1] Huang Hui, Wang Xingyan, Wang Qi, et al. Long wavelength resonant cavity photodetectors with InP/air-cap Bragg mirrors. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(2): 170 (in Chinese) [黄辉, 王兴妍, 王琦, 等. 基于 InP/空气隙布拉格反射镜的长波长谐振腔光电探测器. 半导体学报, 2004, 25(2): 170]
- [2] Zhang Ruikang, Yang Xiaohong, Zhou Zhen, et al. Microme-

- chanical tunable optical filter. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(4): 347
- [3] Baklenov O, Nie H, Anselm K A, et al. Multi-stacked quantum dot resonant-cavity photodetector operating at 1.06 μ m. Electron Lett, 1998, 34(7): 694
- [4] Liang Kun, Yang Xiaohong, Du Yun, et al. RCE photodiodes at wavelength band of 1.06 μ m. Chinese Optics Letters, 2003, 1(6): 323
- [5] Zhang Ruikang, Zhong Yuan, Xu Yingqiang, et al. 1.3 μ m GaInNAs/ GaAs quantum well resonant cavity enhanced photodetector. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(3): 303
- [6] Liang Kun, Chen Hongda, Deng Hui, et al. Optimization for top DBR's reflectivity in RCE photodetector. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(4): 409
- [7] Campbell J C, Huffaker D L, Deng H, et al. Quantum dot resonant cavity photodiode with operation near 1.3 μ m wavelength. Electron Lett, 1997, 33(15): 1337

Performance of 1064nm RCE Photodetectors *

Peng Hongling, Zhang Hao, Han Qin, Yang Xiaohong, Du Yun, Ni Haiqiao, Tong Cunzhu, Niu Zhichuan, Zheng Houzhi, and Wu Ronghan

(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Performances of a 1064nm resonant-cavity-enhanced photodetector (RCE-PD) are investigated. The structures of devices with the absorption layers of quantum well (QW) and quantum dot (QD), respectively, were grown by molecular beam epitaxy (MBE). Testing the optical-electric properties of the RCE-PD fabricated by the structure wafer, the following results are obtained: for the QW RCE-PD, the peak quantum efficiency reaches 57%, FWHM is less than 7nm, and peak wavelength is 1059nm. For the QD RCE-PD, the peak quantum efficiency reaches 30%, FWHM is less than 5nm, and peak wavelength is 1056nm. The absorptions of the two structures' RCE-PD were compared. It is found that the QD can reach high quantum efficiency although its absorption is small. The two structures' devices both have good $I-V$ character.

Key words: resonant-cavity-enhanced; photodetector; quantum well; quantum dot

EEACC: 2530C; 4100; 4150

Article ID: 0253-4177(2005)08-1605-05

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60376025, 60137020), the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2002AA312080), and the State Key Development Program for Basic Research of China (No. TG2000036603)

Peng Hongling female, was born in 1972, PhD candidate. Her research interests focus on GaAs materials and related devices.

Received 23 November 2004, revised manuscript received 31 March 2005

©2005 Chinese Institute of Electronics