第 26 卷增刊　　半 导 体 学 报　　Vol. 26　Supplement
2005 年 6 月　　CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTORS　　June, 2005

GaAs 基量子阱谐振腔增强型光电探测器特性研究*

唐 君　陈弘达　梁 琨　杜 云　杨晓红　吴荣汉

(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：通过对谐振腔增强型(RCE)光电探测器的理论分析和实验测试结果，证明对应不同光束入射角度，RCE 光电探测器的模式波长按一定规律可调谐. 并给出当入射角度变化 10°～60°，模式调谐范围约为 40nm，而谐振波长处的量子效率峰值及半高宽 FWHM 的变化与材料吸收系数紧密相关.

关键词：RCE 光电探测器；量子效率；GaAs

PACC：7280E

中图分类号：TN215　　文献标识码：A　　文章编号：0253-4177(2005)S0-0243-04

1 引言

随着单频激光器和波分复用解复用技术的发展，在光通信及光信息处理领域，对于窄带高速的光电探测器要求越来越高. 谐振腔增强型(RCE)光电探测器在 DBR 谐振腔中插入较薄的吸收层，具有高量子效率和高响应速度兼容的优点，并且利用谐振腔的选模作用使器件响应具有良好的波长选择性及空间角度选择性，因而越来越受到人们的重视.

RCE 探测器具有高精细度的光学谐振腔，它对光束入射角度非常灵敏，对应不同入射角度，探测器模式波长发生调谐，并且受不同模式波长的吸收变化的影响，量子效率峰值和半宽也呈现不同的角度依赖特性. RCE 探测器的空间角度选择性使它在某些角度灵敏的相关测量中有着特殊的应用前景.

本文结合 RCE 探测器的具体器件结构和波段范围，对探测器的波长选择性的工作原理进行分析，并给出我们在 RCE 探测器空间角度选择性测试方面的主要结果.

2 RCE 光电探测器空间角度选择特性的理论分析

图 1 为 RCE 探测器的结构模型. 顶部与底部的反射镜为一定周期对数的宽带隙半导体材料或介质材料 DBR. 吸收层被安置在两个反射镜之间，厚度为 d，吸收系数为 α. 吸收层与器件顶镜和底镜之间的间隔层厚度分别为 L_1 和 L_2，材料吸收系数由 α_{ex} 表示. 吸收层和间隔层共同构成光学厚度为波长整数倍的谐振腔. 顶镜与底镜的场反射系数分别是 $R_{in}\exp(-j\phi_1)$，$R_{back}\exp(-j\phi_2)$，其中 ϕ_1，ϕ_2 分别表示由于光场经过上下 DBR 反射镜引起的相位偏移.

当光束从空气中以角度 θ 入射时，RCE 探测器的量子效率可以写成[1,2]：

$$\eta = \frac{(1-R_{in})(1+R_{back}e^{-\xi\alpha d})(1-e^{-\xi\alpha d})}{1-2\sqrt{R_{in}R_{back}}e^{-\zeta\alpha d}\cos(2\beta L\cos\theta_i+\phi_1+\phi_2)+R_{in}R_{back}e^{-2\xi\alpha d}} \tag{1}$$

式中 θ_i 与 θ 入射角通过斯涅耳定律相联系：$\bar{n}\sin\theta_i=\sin\theta$，$\bar{n}$ 是 DBR 结构材料的平均折射率. 此时谐振条件表示为：

$$2\beta L\cos\theta_i+\phi_1+\phi_2=2m\pi,\ m=1,2,3,\Lambda \tag{2}$$

* 国家高技术研究发展计划(批准号：2001AA312080，2003AA312040)，国家自然科学基金(批准号：60377011)资助项目

2004-11-10 收到，2004-12-23 定稿

由此我们推导出角度相关的谐振模式：

$$\lambda_{\mathrm{mode}}(\theta)=\lambda_0\cos\left(\sin^{-1}\frac{\sin\theta}{\bar{n}}\right) \tag{3}$$

λ_0 是器件正入射时的谐振波长. 可以看到，RCE 探测器谐振模式随入射角度的关系呈余弦变化，依据这个规律能够对 RCE 探测器实现角度波长调谐.

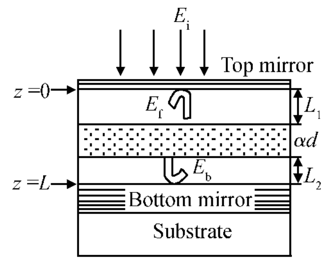

图 1　RCE 探测器模型

Fig. 1　Model of RCE PD

对不同入射角度下的 η_p 和 FWHM 产生影响的因素除了模式波长 λ_{mode}，还包括顶镜反射率 R_{in}，底镜反射率 R_{back}，以及吸收系数 α 的变化. 我们可以根据所得的 $\lambda_{\mathrm{mode}}(\theta)$，$R_{\mathrm{in}}(\theta)$，$R_{\mathrm{back}}(\theta)$，$\alpha(\theta)$ 进行计算，得到 RCE 探测器半高宽和响应峰值随光束入射角度变化的理论关系.

$$\mathrm{FWHM}=\frac{\lambda^2}{2\pi n_g L_{\mathrm{eff}}}\times\frac{1-\sqrt{R_{\mathrm{in}}R_{\mathrm{back}}}\,\mathrm{e}^{-\xi\alpha d}}{(R_{\mathrm{in}}R_{\mathrm{back}})^{1/4}\,\mathrm{e}^{-\xi\alpha d/2}} \tag{4}$$

$$\eta_p=\frac{(1-R_{\mathrm{in}})(1+R_{\mathrm{back}}\mathrm{e}^{-\xi\alpha d})(1-\mathrm{e}^{-\xi\alpha d})}{(1-\sqrt{R_{\mathrm{in}}R_{\mathrm{back}}}\,\mathrm{e}^{-\xi\alpha d})^2} \tag{5}$$

$\alpha(\theta)$ 可以根据有源层吸收谱中不同入射角对应模式波长的吸收系数获得. 反射率的角度相关特性可以利用光学传输矩阵元的方法进行数值计算.

图 2 给出不同入射角度下测量的 GaInAs 量子阱 RCE 探测器光电流谱. 器件顶部和底部的 DBR 各为 15 对和 23 对，吸收层为 3 对 GaInAs/GaAs 量子阱. 光束正入射（$\theta=0°$）时器件谐振模式在 1084nm，随入射角度增大，谐振光电流峰不断蓝移，并且由于模式波长随角度改变时其吸收系数有较大变化，相应地，峰值强度和半高宽都发生明显变化. 图 2(a) 中左上角插图示意了器件模式波长与入射角度的关系，其中点线为实验曲线，虚线为根据上面推导的出角度相关的谐振模式公式计算的理论曲线，二者基本一致.

图 2(b) 分别反映器件量子效率峰值和半高宽随入射角度的变化，点线为实验结果，虚线为理论拟合，它们的变化趋势也相同.

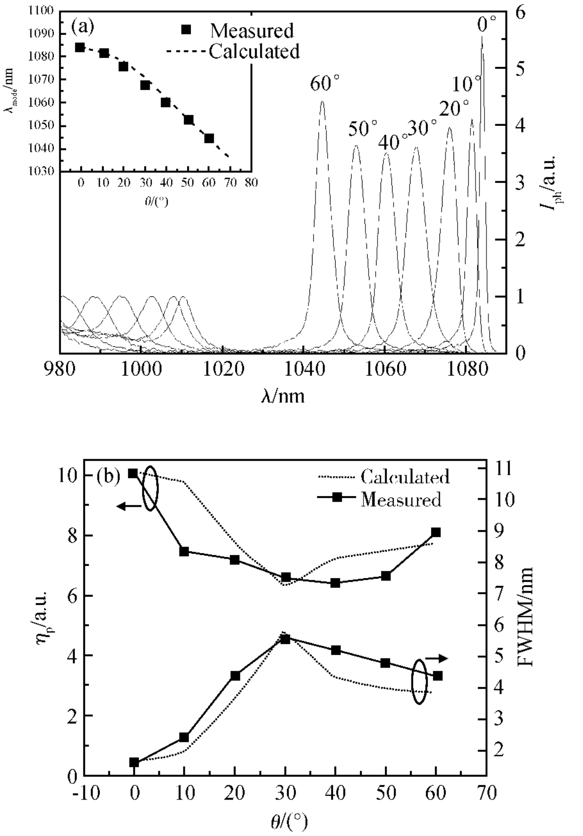

图 2　GaInAs 量子阱 RCE PD 的光电流谱角度相关特性 (a) 实验结果；(b) 理论分析结果

Fig. 2　Different angle incidence for GaInAs QW RCE PD　(a) Measured photocurrent; (b) Analysis

我们可以看到，当光束入射角从 0°变为 10°，模式移动小于 2nm，同时器件对正入射时对准的最佳响应波长的光响应很弱；入射角从 0°变化到 60°过程中，谐振吸收峰往短波方向移动约 40nm. 这表明，虽然 RCE 探测器的响应线宽很窄，但在接收信号的波长短于给定工作波长一定范围的情况下，也可以通过适当偏转角度的方法调节器件模式，从而在信号波长位置同样获得窄带高效的光电响应.

因此，通过分析 RCE 探测器量子效率的角度相关特性，有助于部分解除器件实际应用中对窄带光源严格的波长限制，提高 RCE 器件的波长适用范围.

图 3 给出了不同入射角度下模式吸收随波长变化很小的 GaInNAs/GaAs 量子阱 RCE 探测器的光电流谱[3]. 器件顶部 DBR 为 8 对，吸收区为 3 对 GaInNAs/GaAs 量子阱，底部 DBR 为 23 对. 当光束正入射时器件谐振模式在 1296nm，随入射角度增大，谐振光电流峰也不断蓝移，同时峰值强度和半

高宽变化相对较小.这说明了如果在测试波长范围，吸收系数基本不变，则入射角度变化时，量子效率及半高宽基本保持不变.

图3(a)中左上角插图示意了器件模式波长与角度相关的实验和理论曲线.图3(b)给出量子效率峰值、半高宽随入射角度变化的实验和拟合结果.计算时α取恒定值.

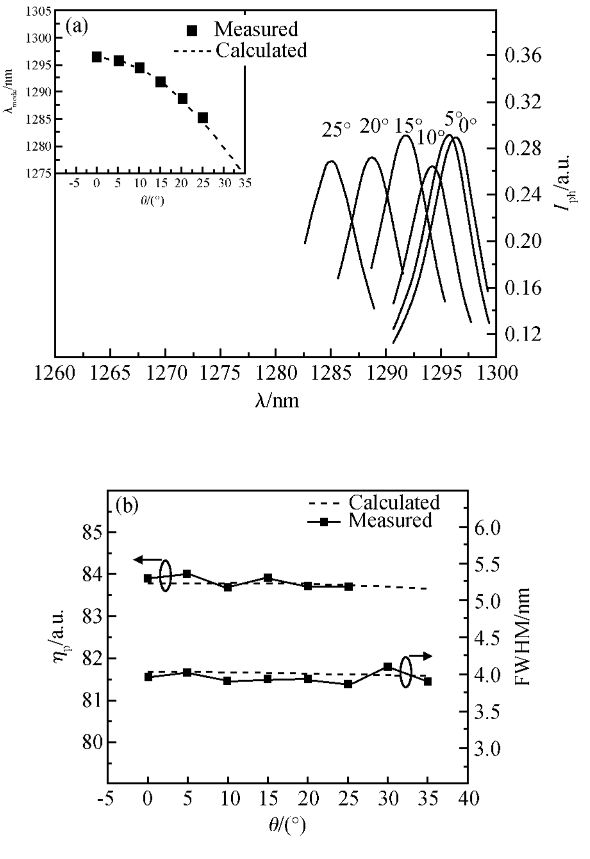

图3　GaInNAs量子阱RCE PD的光电流谱角度相关特性
(a)实验结果；(b)理论分析结果

Fig. 3　Different angle incidence for GaInNAs QW RCE PD　(a) Measured photocurrent;(b) Analysis

我们看到，入射光束在0°～5°范围内变化时，模式移动小于0.8nm，量子效率峰值和半宽基本不变，并且器件对正入射时对准的最佳响应波长的光响应仍然较强.因此，即使在要求严格的波分复用应用中，RCE探测器的空间角度选择性并不会对光纤耦合偏角对准精度提出特别苛刻的要求.

在入射角度从0°变到25°时，谐振峰蓝移约12nm，光电响应的强度和线宽变化并不明显，保持了谐振腔器件的主要优点.由于实际的外延材料反射率一般低于理论值，测量中还存在单色仪分辨率不足和入射光非平行性较差等因素影响，实验测得的RCE探测器模式半宽比理论值大，量子效率偏低.

3　结论

对应不同入射角度，RCE探测器模式波长按一定规律可调谐，而量子效率及响应光谱半宽的变化与吸收系数的变化相关.特别是对吸收系数随波长变化很小的情况，η_p和FWHM基本不随角度变化.对于吸收系数随波长变化较明显的GaInAs量子阱RCEPD，当θ角度改变10°～60°时，模式调谐范围约为40nm.

参考文献

[1]　Ünlü M S, Strite S. Resonant cavity enhanced photonic device. J Appl Phys, 1995, 78(2): 607

[2]　Kishino K, Ünlü M S, Chyi J I. Resonant cavity enhanced (RCE) photodetectors. IEEE J Quantum Electron, 1991, 27(8): 2015

[3]　Zhang W, Pan Z, Li L H. 1.3μm GaInNAs/GaAs multiple quantum wells resonant-cavity-enhanced photodetectors. Proc SPIE, 2001, 4580: 225

Properties of GaAs Based Resonant Cavity Enhanced Photodetectors*

Tang Jun, Chen Hongda, Liang Kun, Du Yun, Yang Xiaohong, and Wu Ronghan

(*State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The theoretical analysis and experimental measurement on the incident angle dependence of quantum efficiency of GaAs based resonant cavity enhanced(RCE) photodetector are presented. By changing the angle of incoming light, about 40nm wavelength variation of peak quantum efficiency is obtained. The peak quantum efficiency and optical bandwidth at different mode corresponding to different angle incidence are characterized with different absorption dependence on wavelength.

Key words: resonant cavity enhanced photodetectors; quantum efficiency; GaAs

PACC: 7280E

Article ID: 0253-4177(2005)S0-0243-04

* Project supported by the National High Technology Researcn and Development Program of China(Nos. 2001AA312080 and 2003AA312040) and the National Natural Science Foundation of China(No. 60377011)

Received 10 November 2004, revised manuscript received 23 December 2004