

# 新型双吸收层光探测器量子效率的理论分析

谢三先 黄永清 刘庆 段小峰 王伟 黄辉 任晓敏

(北京邮电大学信息光子学与光通信教育部重点实验室, 北京 100876)

**摘要** 随着光纤通信技术的发展,高量子效率、高速响应光电探测器在长距离高速光纤通信系统中的作用尤显突出。利用传输矩阵法(TMM)对新型双吸收层光电探测器(RCE-PINIP)的量子效率进行了理论计算,然后对其进行了相应的理论仿真。结果显示,在50~800 nm厚度范围内,随着双吸收层厚度逐渐变大,RCE-PINIP模型的量子效率会出现多个峰值,量子效率的峰值先增大到最大值,在两个单吸收层厚度同为325 nm时,量子效率达到98.6%,然后峰值逐渐递减。在两个单吸收层厚度分别固定为325 nm时,量子效率随另一个单吸收层厚度的变化关系几乎相同。针对这个RCE-PINIP模型结构,通过对两个单吸收层厚度分别进行优化,得到了一个能实现高量子效率的优化结构模型。

**关键词** 探测器; 双吸收层光探测器; 优化结构模型; 传输矩阵法; 量子效率

**中图分类号** O475 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.052301

## Theoretical Analysis of Quantum Efficiency of Novel Dual-Absorption Photodetector

Xie Sanxian Huang Yongqing Liu Qing Duan Xiaofeng

Wang Wei Huang Hui Ren Xiaomin

(Key Laboratory of Information Photonics & Optical Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** With the development of optical fiber communication technologies, high quantum efficiency and high speed photodetectors are more and more essential for long-hual high-bit-rate optical communication systems. The quantum efficiency (QE) of novel dual-absorption resonant cavity enhanced photodetector (RCE-PINIP) is calculated theoretically using transfer matrix method (TMM) and the results are simulated. It is revealed that with the gradual increase of dual-absorption layer thickness in the 50~800 nm range, there will emerge several QE peaks for this RCE-PINIP structure model. And the QE peak firstly increases to the highest value (98.6%) when the thickness of two single absorption layers is both 325 nm, and then the peak gradually decreases. When the thickness of two single absorption layers is fixed at 325nm respectively, dependences of QE on the thickness of other single absorption layer are almost the same. So for this RCE-PINIP model structure, after the optimizations on the thickness of both single absorption layer thickness, an optimized structure which can achieve high QE is obtained.

**Key words** detector; dual-absorption photodetector; optimized structure mode; transfer matrix method; quantum efficiency

**OCIS codes** 230.0230; 250.0250

**收稿日期**: 2010-08-23; **收到修改稿日期**: 2010-10-28

**基金项目**: 国家 973 计划(2010CB327600)、国家 863 计划(2009AA03Z405, 2009AA03Z417)、111 计划(B07005)、国际科技合作重点计划项目(2006DFB11110)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0736)、长江学者和创新团队发展计划(IRT0609)、中央高校基本科研业务费专项资金(BUPT2009RC0409, BUPT2009RC0410)资助课题。

**作者简介**: 谢三先(1986-),男,硕士研究生,主要从事 RCE-PINIP 光电探测器方面的研究。E-mail: shanxian1364@126.com

**导师简介**: 黄永清(1963-),女,博士,教授,主要从事光电探测器方面的研究。E-mail: yqhuang@bupt.edu.cn

## 1 引言

Rajkumar Sankaralingam 等<sup>[1~3]</sup>研究了漂移增强的双吸收 PIN 光电探测器。这个结构在 1550 nm 处得到了 66% 的量子效率,远高于传统 PIN 光电探测器的量子效率。我们实验室<sup>[4]</sup>提出了一种新颖的双吸收层高量子效率和高速谐振腔增强型(RCE)<sup>[5]</sup>光电探测器(RCE-PINIP)模型,这个模型结合了 RCE 和双吸收层设计的优势,理论上对于一个 200 nm 厚的双吸收层在 1550 nm 处实现了 93% 的高量子效率。本文用传输矩阵法(TMM)计算并仿真了 RCE-PINIP 结构的量子效率,从而提供了一种优化这种结构模型的简单方法,并为其他类型光电探测器的优化提供了参考。

## 2 传输矩阵法

从理论上用 TMM 计算了 RCE-PINIP 的量子效率。TMM 方法的优势是在光波腔内存在包含驻波增强效应和多次反射<sup>[6]</sup>。此外,TMM 还可以分析光电探测器的量子效率随每一个单层材料(主要指间隔层和双吸收层)的厚度变化关系,因此能够很容易根据仿真结果获得光电探测器的结构优化方案。本文分析中用到的 RCE-PINIP 模型如图 1 所示,它由一个法布里-珀罗(F-P)腔和双吸收层组成。为了简化仿真和实际的制作过程,假定如下对称条件: $L_1=L_3$ ,  $l_1=l_4$ ,  $l_2=l_3$ 。顶分布布拉格反射镜(DBR)由一对 GaAs/Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As 四分之一波长的堆栈组成<sup>[7,8]</sup>,而底 DBR 则是 3 对 Si/SiO<sub>2</sub> 四分之一波长堆栈构成。

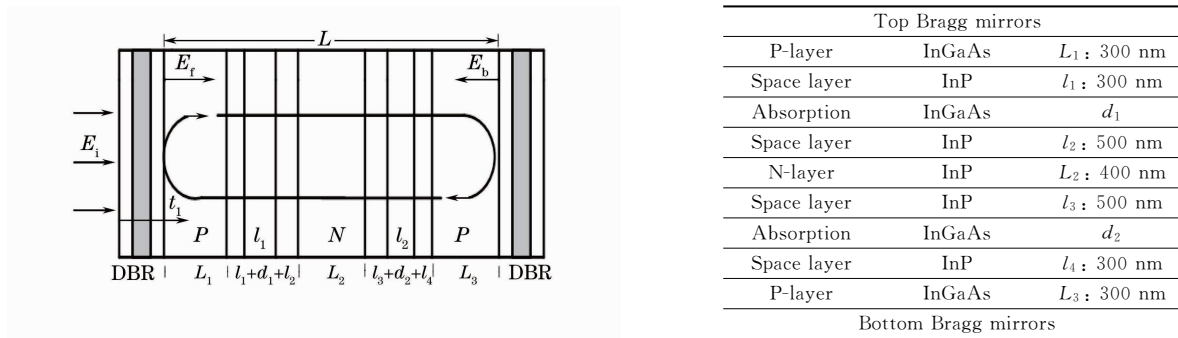


图 1 RCE-PINIP 结构模型与相关参数

Fig. 1 Structure mode and parameters of RCE-PINIP

## 3 仿真结果

分析了在 1550 nm 处完全对称的双吸收层情形,也即, $d_1=d_2$ 。仿真中用到的参数为: $L_1=L_3=l_1=l_4=300$  nm,  $l_2=l_3=500$  nm,  $L_2=400$  nm。量子效率随双吸收层厚度的变化关系如图 2 所示,从图 2 可知在 50~800 nm 的范围内,随着双吸收层厚度逐渐变大,这个 RCE-PINIP 模型的量子效率会出现多个峰值,而且量子效率的峰值先增大到最大值(在双吸收层厚度为 325 nm 时达到 98.6%),然后逐渐递减。

图 3(a)给出了在  $d_2=325$  nm 的情况下量子效率随  $d_1$  的变化关系,而图 3(b)给出了在  $d_1=325$  nm 的情况下量子效率随  $d_2$  的变化关系。从图 3 可得出,量子效率随  $d_1$  的变化关系(当  $d_2=325$  nm 时)和量子效率随  $d_2$  的变化关系(当  $d_1=325$  nm 时)几乎是相同的,因此,当  $d_1=d_2=325$  nm 时,在 1550 nm 处获得了 RCE-PINIP 量子效率的最大值(98.6%)。依据以上分析,最终得到了一个优化了的 RCE-PINIP 结构:当  $L_1=L_3=l_1=l_4=300$  nm,  $l_2=l_3=500$  nm 和  $L_2=400$  nm 且两个单吸收层厚度  $d_1$  和  $d_2$  均为 325 nm 时,可在 1550 nm 处实现 98.6% 的量子效率。图 3(c)是这个优化之后的 RCE-PINIP 结构的量子效率随波长的变化关系,从图中可以清晰地看到量子效率在 1550 nm 处获得了 98.6% 的量子效率。

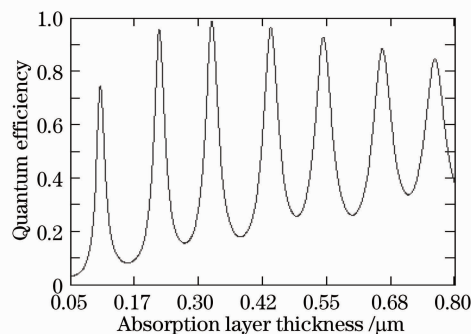


图 2 量子效率随双吸收层厚度的变化关系  
Fig. 2 Dependence of QE on dual-absorption layer thickness

子效率峰值。

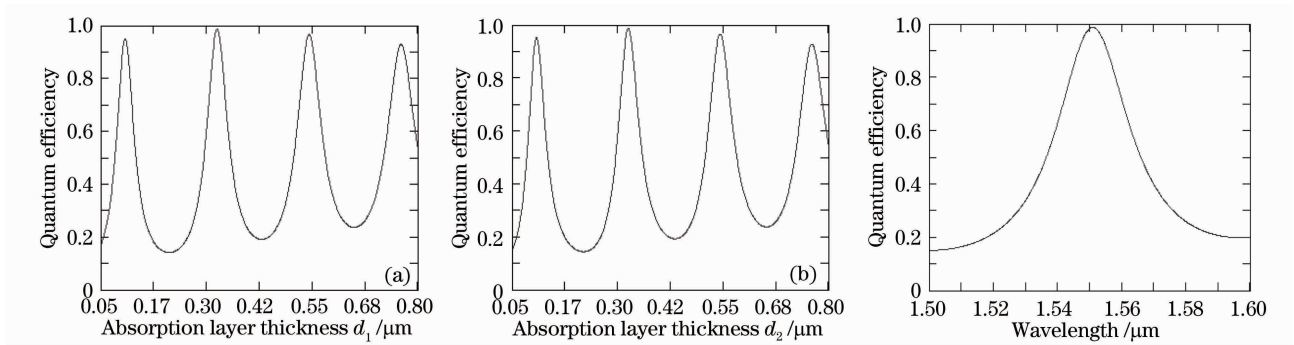


图3 (a)  $d_2=325$  nm,量子效率随  $d_1$  的变化关系,(b)  $d_1=325$  nm,量子效率随  $d_2$  的变化关系,(c) 最终优化之后的 RCE-PINIP 结构的量子效率随波长的变化关系

Fig. 3 (a) Dependence of QE on  $d_1$  with a fixed  $d_2=325$  nm, (b) dependence of QE on  $d_2$  with a fixed  $d_1=325$  nm, (c) dependence of QE on wavelength for the final optimized RCE-PINIP structure

## 4 结 论

用 TMM 对 RCE-PINIP 结构探测器的量子效率进行了理论计算和 Matcad 仿真。结果显示,在 50~800 nm 厚度范围内,随着双吸收层厚度逐渐变大,这个 RCE-PINIP 模型的量子效率会出现多个峰值,而且量子效率的峰值先增大到最大值:在两个单吸收层厚度同为 325 nm 时,量子效率达到 98.6%,然后峰值逐渐递减。在两个单吸收层厚度分别固定为 325 nm 时,量子效率随另一个单吸收层厚度的变化关系几乎相同。由此而获得了一个优化了的理论 RCE-PINIP 模型: $L_1=l_1=l_4=L_3=300$  nm,  $l_2=l_3=500$  nm,  $L_2=400$  nm 且  $d_1=d_2=325$  nm。此优化模型在 1550 nm 处量子效率峰值为 98.6%。

## 参 考 文 献

- 1 R. Sankaralingam, P. Fay. Drift-enhanced dual-absorption PIN photodiodes[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(7): 1513~1515
- 2 R. Sankaralingam, P. Fay. High bandwidth-efficiency long-wavelength PIN photodiodes[C]. International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, 2005. 152~155
- 3 F. J. Effenberger, A. M. Joshi. Ultrafast, dual-depletion region, InGaAs/InP p-i-n detector[J]. *Lightwave Technol.*, 1996, **14**(8): 1859~1864
- 4 Peng Fu, Yongqing Huang, Xiaofeng Duan *et al.*. A novel dual-absorption resonant cavity enhanced photodetectors[C]. Technical Digest, Optical Society of America (2009), paper WL42
- 5 Yang Yisu, Huang Yongqing, Huang Hui *et al.*. Design of photodetector with subwavelength grating structure [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2352~2357  
杨一粟,黄永清,黄辉等.一种具有亚波长光栅结构的光探测器的设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2352~2357
- 6 S. V. Gryshchenko, H. H. Demina, V. V. Lysak. Quantum efficiency and reflection in resonant cavity photodetector with anomalous dispersion mirror[C]. CAOL, 2008. 229~232
- 7 Xie Yuan, Wang Yana, Liu Wei *et al.*. Comparative study on GaAs photoconductive semiconductor switches[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(6):063201  
谢媛,王娅娜,刘维等.砷化镓光导开关的比较研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(6): 063201
- 8 Ni Zhengji, Chen Lin, Wang Shuling *et al.*. Electrons intervalley transfer gain in bulk GaAs[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 658~662  
倪争技,陈麟,王淑玲等.砷化镓内电子谷间散射引起的增益[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 658~662