

文章编号:1001-9014(2011)05-0415-05

# 长波量子阱红外光电探测器金属光栅耦合的研究 ——基于金属表面等离子效应

翁钱春<sup>1</sup>, 李 梁<sup>1</sup>, 陈 俊<sup>1</sup>, 温 洁<sup>1</sup>, 熊大元<sup>1,2\*</sup>

(1. 华东师范大学 信息科学技术学院, 极化材料与器件教育部重点实验室, 上海 200241;  
2. 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

**摘要:**采用时域有限差分法研究了二维金属光栅量子阱红外探测器的电磁场分布, 研究表明充分利用金属表面等离子效应可显著提高量子阱红外探测器光耦合效率. 研究还表明, 对于  $8\ \mu\text{m}$  长波量子阱红外探测器, 金属光栅结构选取圆孔直径与光栅周期比为  $0.8\sim 0.9$  是最有益的, 此时可获得最大的光耦合效率.

**关键词:**量子阱红外探测器; 二维金属光栅; 时域有限差分(FDTD); 金属表面等离子效应  
**中图分类号:** O439 **文献标识码:** A

## The metal grating coupling of long-wavelength quantum well infrared photodetectors: surface plasmon effect

WENG Qian-Chun<sup>1</sup>, LI Liang<sup>1</sup>, CHEN Jun<sup>1</sup>, WEN Jie<sup>1</sup>, XIONG Da-Yuan<sup>1,2\*</sup>

(1. Key Laboratory of Polar Materials and Devices, Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200241, China;  
2. State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai 200050, China)

**Abstract:** The distribution of electromagnetic field of 2D metal grating in the Long-Wavelength Quantum Well Infrared Photodetectors (LW-QWIPs) was studied by Finite Time Domain Method (FDTD). The result shows that making good use of the surface plasmons can remarkably improve the optical coupling efficiency in the LW-QWIPs. It also shows that using a metal grating with the ratio of the hole diameter to the grating period ranged from 0.8 to 0.9, optimal optical coupling can be achieved.

**Key words:** QWIPs, 2D metal grating, FDTD, surface plasmons  
**PACS:** 42.79.Dj

## 引言

红外线波长一般在  $770\ \text{nm}\sim 1\ \text{mm}$ , 介于微波与可见光之间, 因其在通讯、医疗、探测、军事等方面的广泛用途, 而被给予极大重视. 红外技术的发展在很大程度上取决于红外探测器的发展<sup>[1]</sup>. 最近十年来, 随着低维材料的迅速发展, 量子阱红外探测器的实验室研究和商业开发十分活跃<sup>[1]</sup>. 与典型红外探测器 HgCdTe 互为补充, 量子阱红外探测器也成为一类重要的商业化器件<sup>[2]</sup>. 根据量子力学选择定

则, 量子阱与正入射电磁波之间无光耦合, 器件工作时必须有沿着量子阱生长方向的电场分量. 一般采用斜入射方式或者在器件表面刻以光栅以实现光电子耦合. 对于量子阱红外探测器最主要的特性就是他们的光电流和暗电流特性<sup>[3-7]</sup>, 如何通过高效的光电耦合增强光电流一直是人们关注的重点之一. 近年来, 金属表面等离子基元(SPPs)<sup>[8]</sup>对于入射电磁波的强烈调制作用已被用于研究提高光电器件的效率, 如半导体激光器<sup>[9]</sup>、太阳能电池<sup>[10]</sup>、量子点红外探测器<sup>[11]</sup>和量子阱红外探测器<sup>[12-14]</sup>, 文献[12]的

收稿日期: 2010-10-22, 修回日期: 2010-12-06

Received date: 2010-10-22, revised date: 2010-12-06

基金项目: 信息功能材料国家重点实验室开放课题资助项目, 科技部重大项目(2006CB932802 和 2011CB932903) 和上海市科委资助项目(078014194)。

作者简介: 翁钱春(1988-), 男, 浙江宁波人, 本科, 主要研究领域为基于半导体量子结构的新颖红外探测器、单光子探测, E-mail: qcweng@gmail.com.

\* 通讯作者: E-mail: dyxiong@ee.ecnu.edu.cn.

研究表明基于 SPPs 效应对于加强量子阱红外探测器光电耦合效率进而提升器件探测率有明显效应。

为了更好地理解 SPPs 效应对于光电耦合效应增强的具体模式,本文选取与文献[12]所报道的类似的二维金属光栅结构,采用三维时域有限差分法,系统研究了决定光电耦合效率的器件区域电场分布状态. 我们的研究表明,通过优化金属表面等离子效应可显著提高量子阱红外探测器光耦合效率,具体对于  $8\ \mu\text{m}$  长波红外的量子阱红外探测器,将圆孔直径和光栅周期比控制在  $0.8 \sim 0.9$ ,可以得到最好的光耦合效果,从而提高量子阱红外探测器对长波红外的响应率。

## 1 理论模拟与计算

长波量子阱红外探测器通常采用 GaAs/AlGaAs 材料体系<sup>[1]</sup>,本文模拟的基本器件结构自下而上为: $1.5\ \mu\text{m}$  半绝缘 GaAs 衬底、 $0.5\ \mu\text{m}$  重掺杂 ( $2.5 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$ ) 下电极层、10 周期 GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 量子阱区域(势垒厚 60 nm,阱宽 6 nm)、 $0.2\ \mu\text{m}$  重掺杂 ( $2.5 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$ ) 上电极层、40 nm 光栅结构,如图 1(a)所示. 其中,二维光栅具体结构和参数为:圆孔直径  $d$  为  $1.4\ \mu\text{m}$ ,圆孔周期  $a$  为  $2.9\ \mu\text{m}$ ,此时圆孔直径与光栅周期比为  $0.48$ ,如图 1(b)所示。

此二维金属光栅结构能够将正入射电磁波转换成表面等离子波<sup>[12]</sup>,从而激发出对量子阱器件有效的电场分量  $E_z$ ,如图 2 所示. 图 2(a)为金属光栅层与上电极层接触面的  $E_z$  分布,而图 2(b)则为  $|E_z|$  在经过圆孔中心的纵向剖面上的分布. 入射光设定为从金属光栅上方进入器件结构。

施加入射光后,在器件达到稳定状态时,量子阱

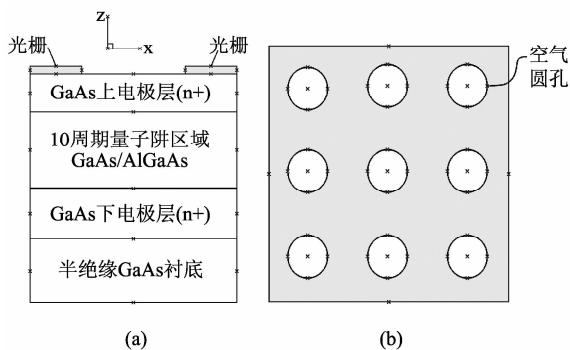


图 1 (a) 器件结构示意图及坐标方向 (b) 二维金属光栅结构

Fig. 1 (a) Device structure and coordinate direction (b) structure of 2D-metal grating

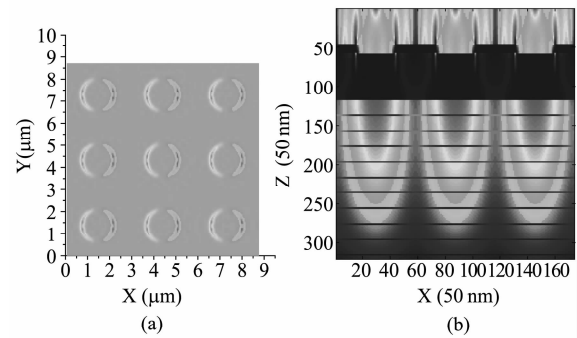


图 2 (a) 金属层与上电极层接触面  $E_z$  的分布 (b)  $|E_z|$  在经过圆孔中心的纵向剖面上的分布

Fig. 2 (a)  $E_z$  distribution in contact surface of metal layer and emitter layer (b)  $|E_z|$  distribution in the longitudinal section through the center of the circle

区域的纵向电场分量  $|E_z|$  的平均值将随着光源周期性变化. 如图 3 所示为  $8\ \mu\text{m}$  波长光入射达到稳定后,量子阱区域的  $|E_z|$  平均值随时间的变化曲线,从图中可以看出量子阱区域的  $|E_z|$  平均值变化周期为  $1.33 \times 10^{-14}\ \text{s}$ ,恰好是光源的变化周期 ( $2.67 \times 10^{-14}\ \text{s}$ ) 的一半,这是因为图 3 显示的是纵向电场分量的绝对值,这也说明此时器件内部光场已经达到稳定。

从图 3 还可以看出, $8\ \mu\text{m}$  红外光入射时,量子阱区域  $|E_z|$  平均值最大可以达到  $0.25$  以上. 我们比较了不同波长光入射对器件的影响,如图 4 所示. 图 4 表明,我们所选取的器件结构,对于  $9.2\ \mu\text{m}$  波长光照射,量子阱区域将有最大的  $|E_z|$  平均值,这与文献<sup>[12]</sup>所报道的  $8\ \mu\text{m}$  的峰位置相差  $1.2\ \mu\text{m}$ ,存在此差异的可能原因有两个:1. 文献[12]采用金作为光栅材料,本文则采用银,两种金属的等离子振荡频率不同;2. 文献[12]的光栅结构采用平面最密集排列,本文则采用四方排列。

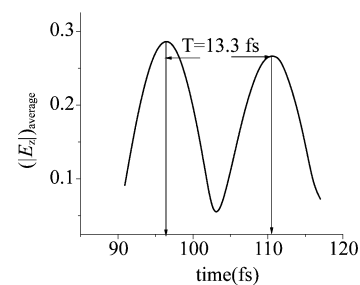


图 3 对于  $8\ \mu\text{m}$  波长光入射时量子阱区域的  $|E_z|$  平均值随时间的变化

Fig. 3  $|E_z|$  average of quantum wells change over time under  $8\ \mu\text{m}$  illumination

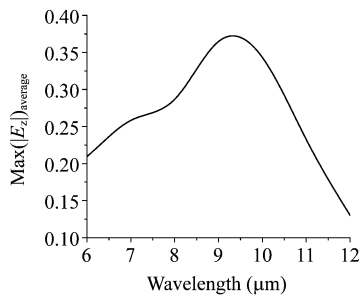


图4 各波长入射光照射下量子阱区域最大 $|E_z|$ 平均值曲线  
Fig. 4 Maximum  $|E_z|$  average of quantum wells under different wavelength of illumination

## 2 长波探测器光耦合的优化

上面的研究结果表明,此二维金属光栅结构对于  $8 \mu\text{m}$  入射光具有较好的光耦合效果,从而能够使器件有效区域(量子阱区)的纵向电场  $E_z$  分布最大,量子阱器件具有较好的响应。

下面我们研究金属光栅中圆孔直径  $d$  与光栅周期  $a$  的比值  $d/a$  对  $8 \mu\text{m}$  波长光入射时光耦合效率的影响,希望能够进一步提高量子阱器件对  $8 \mu\text{m}$  波长光的探测率。

在保持光栅周期不变的情况下,我们调整光栅中圆孔直径的大小,器件有效区域(量子阱区)的电场纵向分量  $|E_z|$  平均的变化情况如图5所示。

从图5可以看出,在光栅周期  $a$  为  $2.9 \mu\text{m}$  时选取圆孔直径在  $2.32 \sim 2.61 \mu\text{m}$  ( $d/a = 0.8 \sim 0.9$ ) 对  $8 \mu\text{m}$  波长的入射光将有最好的响应率。图5还显示了砷化镓光栅与金属光栅的光耦合效率(用  $E_z$  表征)的比较结果,金属光栅所激发出来的表面等离子体使器件的光耦合效率明显提高,这为实现长波  $8 \mu\text{m}$  量子阱红外探测器的优化提供了设计基础。

相对于文献[12]所选取的  $d/a = 0.48$ ,我们的

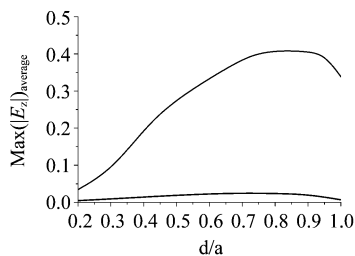


图5 器件量子阱区最大 $|E_z|$ 平均值随圆孔直径  $d$  与光栅周期  $a$  之比的变化情况。其中黑线为砷化镓作为光栅时的结果,与金属 Ag 光栅(对应红线)进行比较  
Fig. 5 Maximum  $|E_z|$  average of quantum wells change over  $d/a$ . dark line is the result of taking GaAs material as grating, compared with Ag grating (in red line)

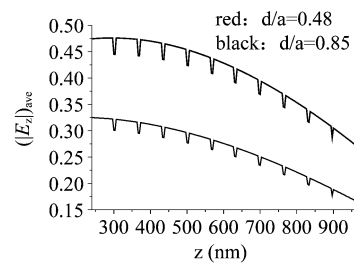


图6 量子阱区域范围纵向电场 $|E_z|$ 在  $xy$  平面的平均值随器件生长方向的变化。红线为文献[12]所选择的  $d/a$  参数,黑线为  $d/a = 0.85$

Fig. 6 In quantum well region,  $|E_z|$  average in  $xy$  plane change against growth direction. Red line is the parameter  $d/a$  chosen in the citation [12], dark line corresponds to the best choice of  $d/a = 0.85$

研究结果表明,针对于  $8 \mu\text{m}$  长波红外的探测,选择  $d/a = 0.8 \sim 0.9$  是最合适的。图6显示的是量子阱范围内纵向电场  $|E_z|$  在  $xy$  平面上的平均值  $|E_z|_{\text{ave}}$  随  $z$  轴的变化情况,更清晰的表明选择圆孔直径与光栅周期比  $d/a = 0.8 \sim 0.9$  (图6选取 0.85 作为比较)对提高  $8 \mu\text{m}$  长波红外的探测率会更好。

## 3 总结

采用三维时域有限差分法,研究了二维金属光栅激发表面等离子体以提高量子阱红外探测器的响应率。研究表明利用好金属表面等离子效应可显著提高量子阱红外探测器光耦合效率。对于 GaAs/ $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  长波量子阱红外探测器,宜选择  $2.9 \mu\text{m}$  周期的金属光栅。研究还表明,相比于文献[12]所选取的圆孔直径与光栅周期之比  $d/a$  为 0.48,选择  $d/a$  在  $0.8 \sim 0.9$  之间将会使量子阱器件有更好的光耦合效果。希望我们的研究能够进一步改善和提高量子阱红外探测器的二维金属光栅的光耦合效率。

**致谢** 感谢信息功能材料国家重点实验室开放课题,科技部重大项目(2006CB932802 和 2011CB932903)和上海市科委项目(078014194)的资助。

## REFERENCES

- [1] FU Ying, LU Wei. *Physics of semiconductor quantum devices* [M]. Beijing: Science Press (傅英,陆卫. 半导体量子器件物理. 北京:科学出版社), 2005: 337.
- [2] SHEN S C. Comparison and competition between MCT and QW structure material for use in IR detectors [J]. *Microelectronics Journal*. 1994, **25**(8): 713 - 739.
- [3] FU Y, WILLANDER M, JIANG J, et al. Photocurrents of  $14 \mu\text{m}$  quantum-well infrared photodetectors [J]. *Journal of Applied Physics*. 2003, **93**(12): 9432 - 9436.

- [4] LI Na, YUAN Xian-Zhang, LI Ning, *et al.* Design and measurement of GaAs/AlGaAs quantum well structure[J]. *Acta Phys. Sin*(李娜,袁先漳,李宁,等. GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 量子阱能级结构与光谱分析. *物理学报*), 2000, **49**(4):797-801.
- [5] YUAN Xian-Zhang, LU Wei, LI Ning, *et al.* Photocurrent spectra of very long wavelength GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetector[J]. *Acta Phys. Sin*(袁先漳,陆卫,李宁,等. 超长波 GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器光电光谱特性研究. *物理学报*), 2003, **52**(2):503-507.
- [6] FU Ying, LI Ning, Karlsteen M. Thermoexcited and photoexcited carrier transports in a GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetector [J]. *Journal of Applied Physics*. 2000, **87**(1):511-516.
- [7] LI N, XIONG D Y, YANG X F. Dark currents of GaAs/AlGaAs quantum-well infrared photodetectors[J]. *Applied Physics. A, Materials Science & Processing*. 2007, **89**(3):701-705.
- [8] HE M D, LIU J Q, CHEN X S. Light transmission through metallic two-dimensional arrays of compound coaxial structures with central and annular apertures: A charge oscillation picture [J]. *Journal of Applied Physics*. 2009, **106**(11352911).
- [9] TREDICUCCI A, GMACHL C, CAPASSO F. Single-mode surface-plasmon laser[J]. *Applied Physics Letters*. 2000, **76**(16):2164-2166.
- [10] PILLAI S, CATCHPOLE K R, TRUPKE T, *et al.* Surface plasmon enhanced silicon solar cells[J]. *Journal of Applied Physics*. 2007, **101**(9 Part 1):93101-93105.
- [11] CHANG Chi-Yang, CHANG Hsu-Yu, CHEN Chia-Yi, *et al.* Wavelength selective quantum dot infrared photodetector with periodic metal hole arrays[J]. *Applied Physics Letters*. 2007, **91**(16):163101-163107.
- [12] WU Wei, Bonakdar A, Mohseni H. Plasmonic enhanced quantum well infrared photodetector with high detectivity [J]. *Applied physics letters*. 2010, **96**(16):161101-161107.
- [13] ZHANG Y M, CHEN H B, LI Z F, *et al.* The optical coupling improvement of THz quantum well infrared photodetectors based on the plasmonic induced near-field effect [J]. *PHYSICA B-CONDENSED MATTER*. 2010, **405**(2):552-554.
- [14] WANG J A, CHEN X S, LI Z F, *et al.* Study of grating performance for quantum well photodetectors[J]. *JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA B-OPTICAL PHYSICS*. 2010, **27**(11):2428-2432.

(上接 414 页)

### 3 结论

通过变面积 Si 基 HgCdTe 器件变温  $I-V$  测试, 对不同偏压下 Si 基 HgCdTe 器件的暗电流成分进行了分析, 发现不同偏压下表面漏电流和体暗电流所占的比重不同,  $-10$  mV 和  $-100$  mV 偏压下表面漏电流在暗电流中所占比重大于零偏压. 对不同温度下空位掺杂的 p 型 Si 基 HgCdTe 材料的少子扩散长度进行了拟合, 发现以 200 K 为转折点, 随着温度的升高, 少子扩散长度呈现先变大、后变小的变化规律. 理论计算得到了不同温度下的少子寿命, 少子寿命变温曲线的转折点对应温度和少子寿命的大小与材料质量有关, 因此所得结果可以对 Si 基 HgCdTe 材料质量进行客观评价, 对材料性能比较和提高具有参考意义.

### REFERENCES

- [1] Johnson S M, Radford W A, Buell A A. Status of HgCdTe/Si technology for large format infrared focal plane arrays [J]. *SPIE*, 2005, **5732**:250-258.
- [2] Dhar N K, Tidrow M Z. Large format IRFPA development on silicon[J]. *SPIE*, 2004, **5564**:34-43.
- [3] SUN Zhi-Jun. Application perspective of IRFPA technologies[J]. *Sensor World*(孙志君. 21 世纪红外焦平面阵列技术. *传感器世界*), 2002, **11**:1-8.
- [4] Bratt P R, Johnson S M, Rhiger D R, *et al.* Historical perspectives on HgCdTe material and device development at Raytheon Vision Systems[J]. *SPIE*, 2009, **7298**:72982u-1-35.
- [5] HU Yu-SHeng, Wang Le. Effect of crystal quality on minority carrier diffusion of MBE-GaAs/Si material[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*(胡雨生,汪乐. MBE-GaAs/Si 材料晶体质量对少子扩散长度的影响. *半导体学报*), 1995, **16**(6):434-438.
- [6] JAMES T, MUSCA Ch, ANTOSZEWSKI J, *et al.* Investigation of surface passivation of HgCdTe MWIR photodiode arrays via a flood illumination Technique[J]. *IEEE*, 2005:185-188.
- [7] Lopes V C, Syllaios A J, Chen M C. Minority carrier lifetime in mercury cadmium telluride [J]. *Semicond. Sci. Technol.* 1993, **8**:824-841.
- [8] Nimitz G, Bauer G, Domhaus S R, *et al.* Transient carrier decay and transport properties in Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te [J]. *Phys. Rev. B*, 1974, **10**:3302.
- [9] Joseph B, Takahiro I, Rengarajan S, *et al.* Performance of very low dark current SWIR PIN arrays[J]. *SPIE*, 2008, **6940**:69400L-1.
- [10] YUE Ting-Ting, YIN Fei, HU Xiao-Ning. Characterization analysis of dark current in HgCdTe/Si photodiodes [J]. *Laser & Infrared*(岳婷婷,殷菲,胡晓宁. 硅基 HgCdTe 光伏器件的暗电流特性分析. *激光与红外*), 2007, **37**supplement:931-934.
- [11] VISHNU G. Characterization of surface and bulk effects by variable area diode test structures in HgCdTe technology: contribution of series and contact resistances [J]. *SPIE*, **3122**:435-440.
- [12] Redfern D A, Thomas J A, Musca C A, *et al.* Diffusion length measurements in p-HgCdTe using laser beam induced current [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2001, **30**(6):696-703.
- [13] Rosbeck J P, Starr R E, Price S L, *et al.* Background and temperature dependent current-voltage characteristics of HgCdTe photodiodes [J]. *Journal of Applied Physics*, **53**(9):6430-6440.