

## 量子阱红外探测器双面金属光栅设计优化

周 州,耿红艳,刘杰涛,许斌宗,胡海峰,宋国峰,徐 云

(中国科学院半导体研究所 纳米光电子实验室,北京 100083)

**摘 要:**提出了一种增强量子阱红外探测器耦合效率的双面金属光栅结构。采用三维时域有限差分算法(3D-FDTD)对 GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器双面结构金属光栅进行了仿真分析。通过对比不同周期、占空比、金属层厚度结构参数下探测器的电场分布及相对耦合效率,确定了 4.8  $\mu\text{m}$  探测器优化的双面金属光栅结构。与顶部和底部单层金属光栅结构比较,双面金属光栅结构探测器相对耦合效率提高到 3 倍以上。探测器相对耦合效率随光栅周期变化的双峰曲线特性体现了双面金属光栅结构在双色量子阱红外探测器光耦合方面的潜力。同时该结构还可以应用于单色、双色及多色量子阱焦平面红外探测器。

**关键词:** 双面结构; 金属光栅; 量子阱红外探测器; 表面等离子极化激元

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)05-1375-05

## Design and optimization of dual-side metal grating for quantum well infrared photodetector

Zhou Zhou, Geng Hongyan, Liu Jietao, Xu Binzong, Hu Haifeng, Song Guofeng, Xu Yun

(Nano-Optoelectronics Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A new structure of dual side metal grating used to improve coupling efficiency was demonstrated. By using the three dimensional finite difference time domain algorithm, the proposed dual side metal grating for GaAs/AlGaAs Quantum Well Infrared Photodetector was studied. The optimization parameters at wavelength 4.8  $\mu\text{m}$  were confirmed by the electric field distribution and relative coupling efficiency at different periods, duty circles and metal thicknesses. The relative coupling efficiency of the proposed dual side metal grating was over three times of the counterparts of single side metal grating at front or back. The bimodal curve of the relative coupling efficiency for the dual side metal grating inspires possibility for potential application for two color Quantum Well Infrared Photodetector. The dual side metal grating can also be used to couple perpendicular incident light into one color, two color and multi color Quantum Well Infrared Photodetectors and offers a high coupling efficiency.

**Key words:** dual-side structure; metal grating; quantum well infrared photodetector; surface plasmon polaritons

收稿日期: 2013-09-02; 修订日期: 2013-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(61036010, 61177070); 国家重点基础研究发展计划(2011CBA00608, 2012CB619203);

国家科技重大专项计划项目(2011ZX01015-001); 北京市自然科学基金(4112058)

作者简介: 周州(1987-), 男, 硕士生, 主要从事量子阱红外探测器方面的研究。Email: zhouz@semi.ac.cn

导师简介: 徐云(1974-), 女, 研究员, 主要从事量子阱红外探测器、InGaAs 探测器以及激光器方面的研究。Email: xuyun@semi.ac.cn

## 0 引言

中波红外 3~5  $\mu\text{m}$  波段是三个大气窗口之一,工作在该波段的红外探测器在民用(通讯、气象、医学等)和国防军事(战略预警、夜视、导弹预警等)领域有重要应用。由于量子阱在红外吸收时的量子选择定则,入射光必须有一个沿量子阱生长方向的电场分量,量子跃迁才能发生。而量子阱红外探测器主要应用在正入射条件,为了满足电子跃迁条件,人们采用各种各样的光耦合方式,主要有:布儒斯特角入射、45°光波导耦合、周期性光栅耦合、无序光栅耦合、波纹耦合等<sup>[1-2]</sup>,考虑到焦平面集成和工艺因素,二维周期性光栅耦合是较好的选择<sup>[3]</sup>。但自 1998 年 Ebbesen 发现表面等离子增强异常透射现象以来,周期性金属光栅耦合已被广泛应用在传感器、太阳能电池、激光器和探测器等领域<sup>[4]</sup>。文中提出了一种双面金属光栅结构来提高量子阱探测器对光的吸收效率,三维时域有限差分算法(3D-FDTD)是严格求解麦克斯韦方程的数值算法,因此这里采用它来求解光栅电磁场,对电场分布及相对耦合效率加以分析,优化特定波段的光栅结构,并指出了双面金属光栅应用在双色量子阱红外探测器光栅的可行性。

## 1 模拟与分析

运用三维时域有限差分算法来模拟电场分布,建立如图 1 所示的模型。量子阱红外探测器从上到

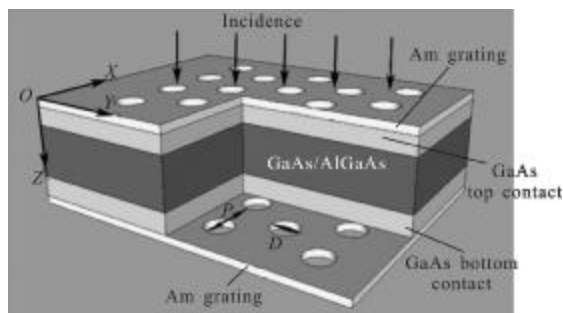


图 1 双面金属光栅量子阱红外探测器结构

Fig.1 Structure of Quantum Well Infrared Photodetector with dual-side metal grating

下依次是顶层金属光栅、重掺杂 GaAs 顶接触层、GaAs/AlGaAs 有源区、重掺杂 GaAs 底接触层、底层金属光栅,顶层和底层金属光栅为六角排布圆孔阵

且上下对称。由于中波红外区域掺杂对 GaAs 折射率色散较小,故计算中整个接触层和有源区均采用固定折射率  $n_{(\text{GaAs})}=3.32$  进行模拟,金属层为 Au,介电常数由杜德模型给出<sup>[5]</sup>:  $\epsilon_m = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega_c\omega}$ ,其中  $\omega$  为入射光角频率,  $\omega_p=1.37 \times 10^{16} \text{ s}^{-1}$  为表面等离子频率,碰撞频率  $\omega_c=9 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ ,这里取 1。

垂直入射时,理想的二维六角排列圆孔阵列的表面等离子共振波长近似取决于<sup>[6]</sup>:

$$\lambda_{\text{sp}} = \frac{\sqrt{3}P}{2\sqrt{i^2+j^2-ij}} \text{Re} \left( \frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中:  $\lambda_{\text{sp}}$  为表面等离子波长;  $P$  为圆孔阵列周期;  $\epsilon_m$  和  $\epsilon_d$  分别为金属和介质的介电常数,  $(i, j)$  为整数。在实际设计的过程中为了获得更高的耦合效率,需要优化双面金属光栅的圆孔周期、占空比、金属层厚度、有源区的位置等参数。根据量子阱子带跃迁的选择定则,只有电场方向平行于量子阱生长方向光波才能激发子带跃迁。采用 3D-FDTD 算法得到选取的周期性计算区域内平行于量子阱生长方向的电场分布,然后计算获得器件在该区域内的相对耦合效率  $\eta$ ,这里定义  $\eta$  为平行于量子阱生长方向电场强度的平方即能激发子带跃迁的光强在计算区域内的积分值与入射光强在计算区域的积分的比值,即:

$$\eta = \frac{\iint |\vec{E}_z|^2 dx dy}{\iint |\vec{E}_{\text{inc}}|^2 dx dy} \quad (2)$$

式中:  $\vec{E}_z$  为沿量子阱生长方向电场(由模拟软件 Rsoft 通过 FDTD 算法给出);  $|\vec{E}_{\text{inc}}|^2$  为光源处入射单位电场。该物理公式对数据进行处理的意义为得到该 XY 平面计算区域内的  $|\vec{E}_z|^2$  的平均值,而量子阱红外探测器的量子跃迁是与  $|\vec{E}_z|^2$  (即能激发子带跃迁的光强)密切正相关的,故采用该方法来评估金属光栅。

对圆孔六角排列双面金属光栅进行仿真分析,取金属层厚  $h=0.05 \mu\text{m}$ ,周期  $P=1.51 \mu\text{m}$  和  $3.02 \mu\text{m}$  (如图 2 标记),占空比  $f=0.5$ ,圆孔的直径  $D=P \cdot f$ ,顶和底接触层均取  $0.1 \mu\text{m}$ ,中间有源区厚度为  $0.8 \mu\text{m}$ ,文中 Z 值为沿图 1 所示的 Z 轴正方向距离 XOY 面金属层的距离,入射光为垂直入射且波长为  $4.8 \mu\text{m}$ 。图 2 所示为圆孔六角排列有源区  $|\vec{E}_z|^2$  场分布,其中(a)、(b)为  $Z=0.5 \mu\text{m}$  处 XY 截面内的  $|\vec{E}_z|^2$  场分布,(c)、(d)为  $Y=P/4$  处 XZ 截面内  $|\vec{E}_z|^2$  场分布。表面等离子波矢<sup>[7]</sup>:

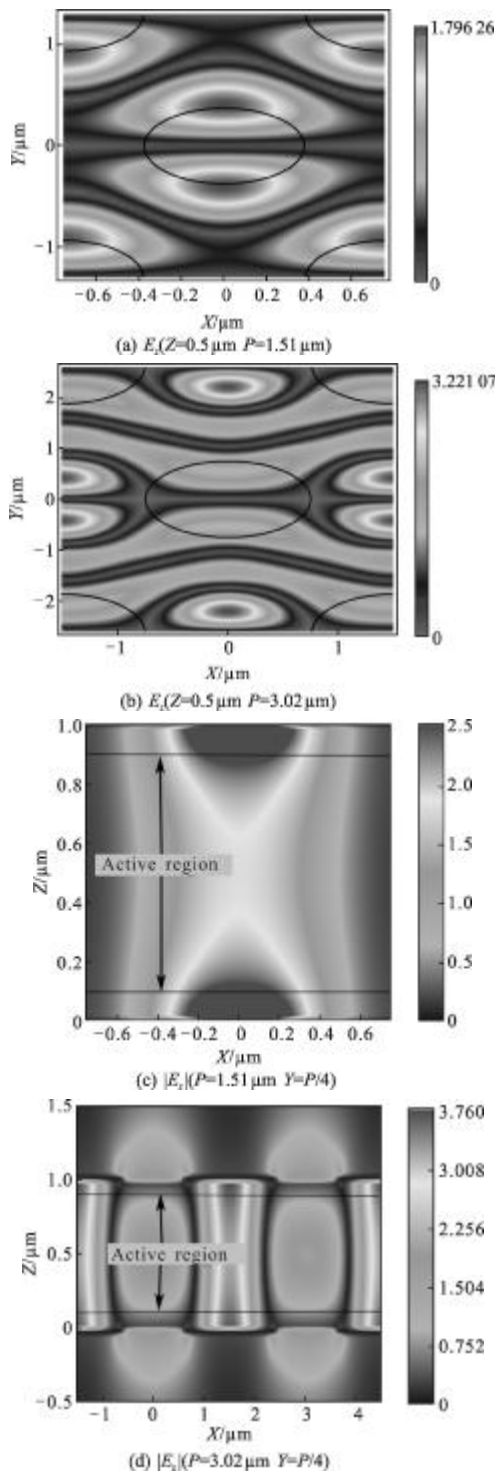


图 2  $|E_z|$  场分布

Fig.2 Field distribution of  $|E_z|$

$$|\vec{k}_{sp}| = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m}} \quad (3)$$

式中： $\omega$  是入射光频率； $c$  为光在真空中的传播速度； $\epsilon_d$ 、 $\epsilon_m$  分别为介质材料和金属的介电常数。由于在 Au/GaAs 界面周期性孔阵的光栅耦合作用，满足波

矢匹配条件，从而激发了沿界面传播的表面等离子极化激元，由于在金属和 GaAs 介质界面电场近场增强效应使得在界面处出现较大的  $E_z$  场<sup>[9]</sup>。

从图 2(c)中可以看出，对于周期  $1.51 \mu\text{m}$ ，选取的 XY 截面越靠近上下金属层， $|E_z|$  场越大，并从两侧界面向有源区里层逐渐减弱，表现出明显的表面等离子场增强特性，这里主要是因为 Au/GaAs 界面激发的表面等离子波沿 Au/GaAs 界面传播的，且在 GaAs 介质中场增强效果是随截面与 Au/GaAs 界面的距离指数衰减；从图 2(d)得出，在周期  $3.02 \mu\text{m}$  处， $|E_z|$  在有源区 XY 平面分布比较稳定，主要原因在于金属光栅周期满足高阶衍射光场出现条件，此时有源区内  $|E_z|$  场由从界面向里逐渐衰减的高阶衍射光场和自由传播一级衍射光电场的叠加组成。

这里通过对  $|E_z|^2$  在计算区域内的积分计算相对耦合效率来对双面金属光栅结构进行更加精确的优化。图 3 给出了入射波长为  $4.8 \mu\text{m}$ ，不同周期、占空比探测器相对耦合效率。其中图(a)为占空比固定为 0.5 时，Z 值为  $0.3 \mu\text{m}$ 、 $0.5 \mu\text{m}$ 、 $0.7 \mu\text{m}$  下不同周期探测器相对耦合效率；图(b)、(c)为 Z 值为  $0.3 \mu\text{m}$ 、 $0.5 \mu\text{m}$ 、 $0.7 \mu\text{m}$ ，周期分别为  $1.51 \mu\text{m}$  和  $3.02 \mu\text{m}$  下不同占空比下探测器相对耦合效率。从图 3 中分析可以得出：(1) 相对耦合效率曲线在周期  $P=1.51 \mu\text{m}$ 、 $3.02 \mu\text{m}$  处分别出现峰值，这与表面等离子波级数有关，周期  $1.51 \mu\text{m}$  时，对应的出现的级数为  $(\pm 1, 0)$ 、 $(0, \pm 1)$ 、 $(1, 1)$ 、 $(-1, -1)$ ，随着周期增加至  $3.02 \mu\text{m}$ ， $(\pm 2, 0)$ 、 $(0, \pm 2)$  级次开始出现(这里可以通过引用参考文献[3-4]处给出的表面等离子共振波长以及给出的 Au 和 GaAs 的介电常数计算确认)，这说明在这两个周期处都能明显提高探测器的耦合效率，利用双峰特性，可以设计出双色探测器的双面金属光栅；(2) 对于两种周期，占空比都在 0.5 时，探测器相对耦合效率达最大。综合以上分析，取周期  $1.51 \mu\text{m}$ 、 $3.02 \mu\text{m}$ ，占空比 0.5，可以使得量子阱红外探测器在入射波长  $4.8 \mu\text{m}$  处获得较高的耦合效率。

金属光栅分为以下三类：入射光一侧金属光栅<sup>[9]</sup> (图中用 front-side 表示)、入射光反侧光栅<sup>[10]</sup> (图中用 back-side 表示)、双层金属光栅 (图中用 dual-side 表示)。通过对三种光栅在  $4.8 \mu\text{m}$  处进行优化，然后对  $Z=0.3 \mu\text{m}$ 、 $0.5 \mu\text{m}$ 、 $0.7 \mu\text{m}$  处探测器的相对耦合效率

进行比较。图 4 是  $P=1.51\mu\text{m}$  和  $3.02\mu\text{m}$  时  $Z=0.3\mu\text{m}$ 、 $0.5\mu\text{m}$ 、 $0.7\mu\text{m}$  处器件在 XY 截面内的相对耦合效率。从图中数据看出在两个周期处双面金属光栅探测器相对于前两者都有着更高的相对耦合效率。而且在  $P=3.02\mu\text{m}$  处，双面金属光栅器件相对耦合效率是单面金属光栅器件的 3 倍以上。

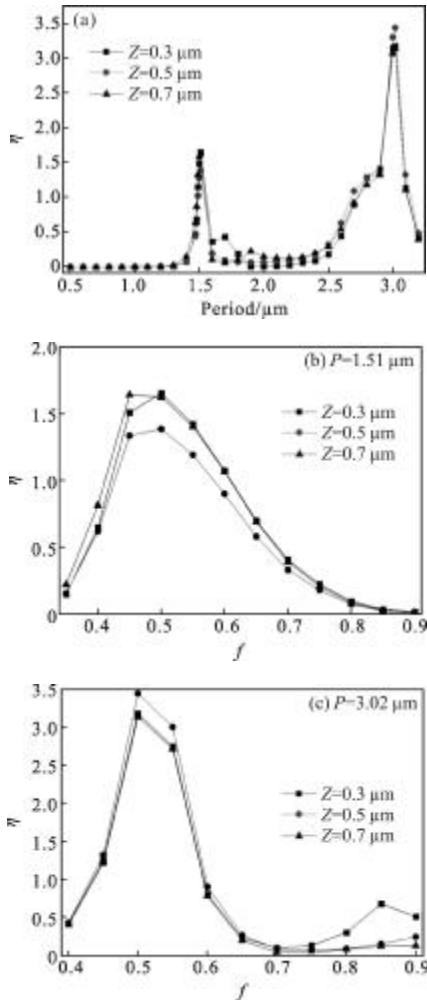


图 3 入射波长为  $4.8\mu\text{m}$ ，不同周期、占空比探测器相对耦合效率  
Fig.3 Relative coupling efficiency of detectors at different period and duty circles with incident wavelength of  $4.8\mu\text{m}$

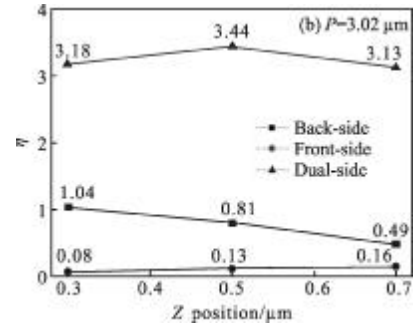
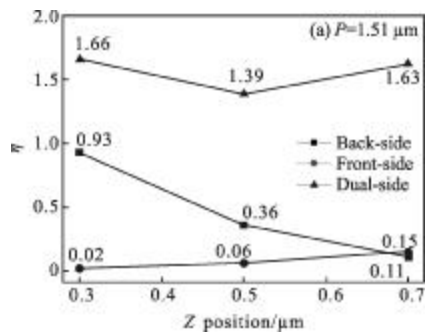


图 4 周期  $1.51\mu\text{m}$  和  $3.02\mu\text{m}$  下三种光栅的相对耦合效率  
Fig.4 Relative coupling efficiency of detectors with three kinds of gratings at period  $1.51\mu\text{m}$  and  $3.02\mu\text{m}$

## 2 结束语

通过三维时域有限差分算法(3D-FDTD)仿真模拟了双面金属光栅在不同周期、占空比、有源层位置下器件有源区内的场分布和相对耦合效率。确定了入射波长  $4.8\mu\text{m}$  对应的优化光栅参数,并与正反两种单面金属光栅进行比较,前者显示出明显优势。还可以对金属光栅孔的形状及排布方式加以改变。另外由于该双面金属光栅探测器相对耦合效率随周期变化曲线呈现出双峰特性,在小周期结构不易制作时,可以选择与高阶表面等离子模式对应的易于制作的大周期结构。同时,利用曲线双峰特性也可以制作出双色探测器的双面金属耦合光栅。

## 参考文献:

- [1] Lian Jie. Optimization of grating light coupling parameters for quantum well infrared detectors [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(2): 197-200. (in Chinese) 连洁. 量子阱红外探测器光栅耦合参数的优化[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 197-200.
- [2] Zhou Xun, Zhou Yong, Luo Muchang, et al. Design of MWIR-LWIR dual-band QWIP [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 1971-1978. (in Chinese) 周勋, 周勇, 罗木昌, 等. 中波-长波红外双色 QWIP 探测器设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 1971-1978.
- [3] Jin Jupeng, Liu Dan, Wang Jianxin, et al.  $320\times 256$  GaAs/AIGaAs long-wavelength quantum well infrared photodetector focal plane array [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 833-837. (in Chinese) 金巨鹏, 刘丹, 王建新, 等.  $320\times 256$  GaAs/AIGaAs 长波红外量子阱焦平面探测器[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4):

- 833-837.
- [4] Wang Zhenlin. A review on research progress in surface plasmons[J]. *Progress in Physics*, 2009, 29(3): 287-324. (in Chinese)  
王振林. 表面等离激元研究新进展[J]. *物理学进展*, 2009, 29(3): 287-324.
- [5] Ordal M A. Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared[J]. *Applied Optics*, 1983, 29(6): 1099-1120.
- [6] Liu Dong. Influence of passivation layers for metal grating-based Quantum Well Infrared Photodetectors [J]. *Chin Phys Lett*, 2012, 29(6): 060701.
- [7] Genet C, Ebbesen T W. Light in tiny holes [J]. *Nature*, 2007, 445: 39-46 .
- [8] William L B, Alain D, Ebbesen T W. Surface Plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, 424: 824-830.
- [9] Wu W. Plasmonic enhanced quantum well infrared photodetector with high detectivity[J]. *Appl Phys Lett*, 2010, 96, 161107.
- [10] Sang J L, Zahyun K, et al. A monolithically integrated plasmonic infrared quantum dot camera [J]. *Nat Commum*, 2011, 2: 286.