

# Design and Simulation of the Surface Plasmon Enhanced Grating for Quantum-Well Infrared Detector

Yixian Zhang, Wenjie Liu

College of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou  
Email: yxzhang2007@sinano.ac.cn

Received: Mar. 28<sup>th</sup>, 2013; revised: Mar. 30<sup>th</sup>, 2013; accepted: May 2<sup>nd</sup>, 2013

Copyright © 2013 Yixian Zhang, Wenjie Liu. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** In this paper, the main restricting factors of quantum well infrared detector application were analyzed. Through studying on the physical mechanism of surface plasmon excitation and transmission, we developed a surface plasmon grating for quantum-well infrared detector. The influence on transmission intensity and wavelength with the constructor parameters of grating was discussed. The result is giving theoretical basis for future quantum well infrared detector application.

**Keywords:** Surface Plasmon; Quantum Well; Infrared Detector

## 表面等离子体增强型量子阱红外探测器光栅设计与模拟

张忆先, 刘文杰

苏州大学机电工程学院, 苏州  
Email: yxzhang2007@sinano.ac.cn

收稿日期: 2013年3月28日; 修回日期: 2013年3月30日; 录用日期: 2013年5月2日

**摘要:** 本研究分析了目前量子阱红外探测器应用中的主要制约因素, 从表面等离子体的激发和传输物理机制出发, 将表面等离子体近场光增强效应引入量子阱红外探测器光栅设计中, 通过模拟计算进一步分析了光栅结构参数对探测器吸收波长和强度的影响, 为未来这项技术的进一步应用打下理论基础。

**关键词:** 表面等离子体; 量子阱; 红外探测器

### 1. 引言

近些年来红外探测技术因在红外成像、预警及跟踪系统、导弹制导、红外测温、安防系统、遥感和石油监测等军事和民用领域的广泛应用受到人们的重视。

随着红外探测技术的不断发展, 红外探测材料也由早期的硅、锗材料到化合物半导体硫化铅 PbS、硫化镉 CdS 等材料, 发展到目前广泛应用的 HgCdTe 材料。HgCdTe 材料是当今最重要的红外探测材料, 但

由于其材料生长均匀性差, 电子的有效质量低, 隧穿电流较大, 信号处理困难等缺点使 HgCdTe 材料的应用受到一定的限制<sup>[1]</sup>。1985年 L. C. West 等人首次发现 GaAs/GaAlAs 量子阱结构子带跃迁对应的红外吸收现象以来<sup>[2]</sup>, 量子阱红外探测器因其响应速度快, 光谱响应带宽窄, 探测波长可随材料结构参数任意剪裁和设计等特点受到各国研究机构的广泛关注。1988年, Bell 实验室的 B. F. Levine 等人报道了第一个高探测率、高响应度的 GaAs/AlGaAs MQW 红外探测器,

峰值响应波长  $8.3 \mu\text{m}$  ( $77 \text{ K}$ )<sup>[3]</sup>。2003 年, 美国喷气推进实验(JPL)已研制成响应波长为  $10\sim 16 \mu\text{m}$  的  $640 \times 512$  元 QWIP 焦平面阵列。与 HgCdTe 材料体系相比量子阱红外探测器探测波长可根据实际需求任意设计; 适合大面积、均匀性良好的材料生长; 响应带宽窄速度快等技术特点。随着半导体外延技术的提高, 量子阱红外探测器在过去十年得到了快速的发展。并已经逐渐成为红外热像仪、红外温度测试仪和红外热分析仪的核心部件。

量子阱红外探测器器件由于受器件物理机理的限制, 在应用时存在两个主要问题, 一是器件量子效率低。常规量子阱探测器由于受正入射警戒原理, 入射光电矢量只有平行于生长方向的部分对光电流信号有贡献, 光能量利用率低; 另外量子阱探测器利用阱内掺杂提供用于光激发的载流子, 其数目远远小于利用带间跃迁的 HgCdTe 载流子数目, 以上两个原因导致了量子阱红外探测器器件量子效率低于 20%, 而 HgCdTe 探测器的量子效率为 70%~80%。二是器件工作温度低。器件对温度的依赖非常大, 温度升高, 暗电流和噪声迅速增加, 贮存电容饱和, 积分时间非常短。信噪比和器件性能受到限制。如何降低暗电流, 提高器件工作温度, 降低对制冷的要求, 同时满足器件低功耗、低重量以及更低成本的应用需求, 这一直是影响量子阱红外探测器实用化的一个主要因素。

## 2. 表面等离子体光栅原理

表面等离子体(Surface Plasmon)自 1998 年 T. W. Ebbesen 发现金属膜上纳米孔阵列的超透射现象以来一直是近些年来微纳光学研究的前沿热点<sup>[4,5]</sup>, 其物理本质是金属表面的自由电子与入射电磁波共振产生的耦合电子疏密波。表面等离子体波沿金属表面传播, 在垂直表面方向上其强度以指数形式迅速衰减, 但在距离金属表面的近场范围内却有很强的局域电磁场存在, 这一特点与量子阱材料对入射光的方向选择特性相符。因此将表面等离子体增强表面电场强度的光栅结构引入量子阱红外探测的光耦合方式将大大提高其光吸收效率, 提高光电流强度, 同时表面等离子体光栅还具有滤波的作用, 可以降低器件噪声, 缩短探测带宽, 改善量子阱红外探测器的器件性能。

对于周期性结构产生的表面等离子体激发, 其衍

射和耦合服从 Bragg 衍射, 对于周期阵列, 其与波矢为  $k_{sp}$  的表面等离子体的耦合可以表示为:

$$k_{sp} = k_x \pm nG_x \pm mG_y \quad (1)$$

$k_{sp}$  表示表面等离子体波的波矢,  $k_x$  为入射光波在平行于光栅表面的入射分量,  $G_x$ 、 $G_y$  表示在  $x$ 、 $y$  方向上晶格矢量所带来的波矢( $G_x = G_y = 2\pi/d$ ),  $m$ 、 $n$  均为正整数。

上式表示在平行于表面的方向, 表面电荷密度和电磁场之间的作用导致 SP 模式的动量, 要大于同频率的自由空间光子,  $\hbar k_0$  ( $k_0 = \omega/c$  是自由空间波矢)。入射波矢和晶格波矢达到了表面等离子体的波矢, SPs 就能被激发, 而表面等离子体激元的波矢大小是材料的色散关系决定的<sup>[6-8]</sup>, 如下:

$$k_{sp} = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m}} \quad (2)$$

式中,  $\epsilon_d$ 、 $\epsilon_m$  分别表示介质和金属的介电常数。

具体的光栅设计中以满足表面等离子体激发元激发条件为必要条件, 充分考虑二维金属光栅的尺寸和周期、金属膜厚度、和光栅类型等诸多影响因素, 结合量子阱子带跃迁光吸收的技术特点开展理论计算和实验验证的相关工作。

## 3. 光栅结构与模拟

表面等离子体光栅设计以金属薄膜上孔阵列光栅的光学特性为主要研究对象, 应用 FDTD solution 软件着重对小孔光栅的透射光谱、相对透射强度和表面等离子体光栅电磁场分布特性等进行系统的研究和分析。

在模拟和实验中通过改变二维金属光栅周期和尺寸、金属膜厚度、金属类型、光栅类型等参数来实现探测波段为  $3\sim 5 \mu\text{m}$  的最佳耦合光栅设计。理论计算采用 FDTD 算法是 K. S. Yee 于 1966 年提出对麦克斯韦方程直接作差分处理、来解决电磁脉冲在电磁介质中传播和反射问题的算法。

具体的计算模型如图 1 所示, 在 GaN/蓝宝石衬底上覆盖上一层金膜, 金膜上制作周期性的三角形排列的孔阵列结构, 周期为  $P$ , 半径为  $r$ , 周期性结构单元夹角为  $60^\circ$ 。选用这种排列结构是因为这种结构相比正方形排列在二维方向上有很好的对称性。

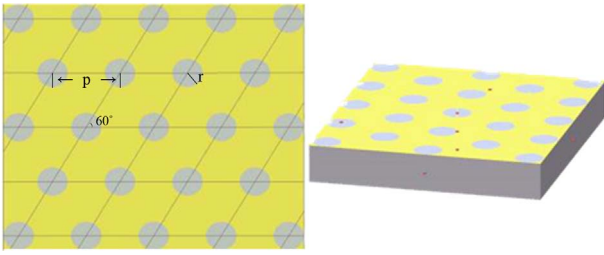


Figure 1. The structure of metal grating (triangle arrangement)  
图 1. 正三角形排列的金属光栅

模拟计算发现光栅在  $z$  方向上(光传输方向)的透过波长和强度与光栅周期具有一定的规律性。图 2 显示了孔阵列周期变化对透射波长和强度的影响, 随孔阵列周期的增加透射波长也随之变长, 同时透射强度也存在一定的变化, 这与表面等离子体的激发条件(式(1)和式(2))密切相关, 只有满足一定条件的周期调制才能有效产生透射增强作用。

进一步分析模拟结果, 图 3 中显示了金属光栅周期与响应波长和透射峰值强度之间的关系。X 轴表示响应峰的位置(即共振增强的波长), Y 轴表示所对应的阵列周期。图中圆的大小和颜色表示该点峰值强度, 其中左上角的小图表示不同周期阵列的传输谱。同样, 当阵列周期变大时, 共振峰的波长也变大, 而其强度会出现一个最大值, 即存在一个最佳的极值范围, 在实际应用中对于不同的探测波段要合理设计光栅周期, 使其最佳调制波长与探测波长相吻合。

同时通过研究金属光栅的周期与峰位的关系, 可以发现二者成明显的线性关系(如图 4 所示), 通过数值拟合, 光栅周期与透射峰值之间的关系线性度较好, 其拟合直线近似为  $y = 1.28x + 0.58$ , 这是因为表面等离子体的激发条件与入射波在光栅调制作用下增加的波矢相关。

模拟计算中还考虑了金膜厚度以及光栅孔径对透过光谱的影响。图 5 中显示了共振峰强度随膜厚变化的规律。金属膜厚度是表面等离子体光栅设计中一个重要的因素, 表面等离子体的激发通过小孔的上下表面共振传输能量, 因此膜厚直接决定了小孔共振腔的腔长, 因此会影响共振峰的强度, 随着金属膜厚度的增加, 共振峰值先是变大, 在厚度为 150 nm 左右时达到一个最大值, 继续增加金属膜厚, 强度则变小。因此模拟设计得到一个最佳的金属膜厚度使得金属膜两端的表面等离子体波传输达到最佳的共振耦合

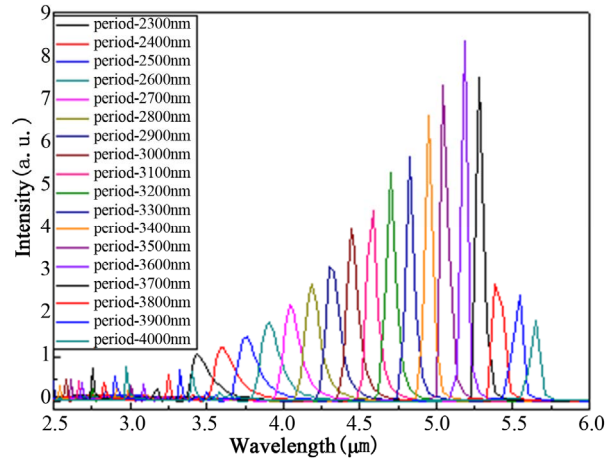


Figure 2. The impact on transmitted wavelength with periodic variation

图 2. 周期变化对透过光波长的影响

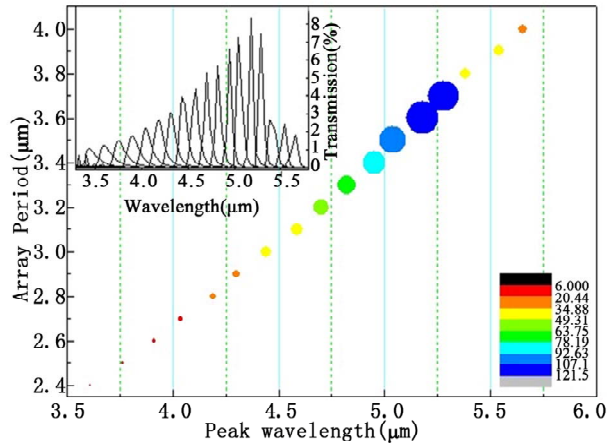


Figure 3. The impact on transmitted intensity with periodic variation

图 3. 阵列周期对透射强度的影响

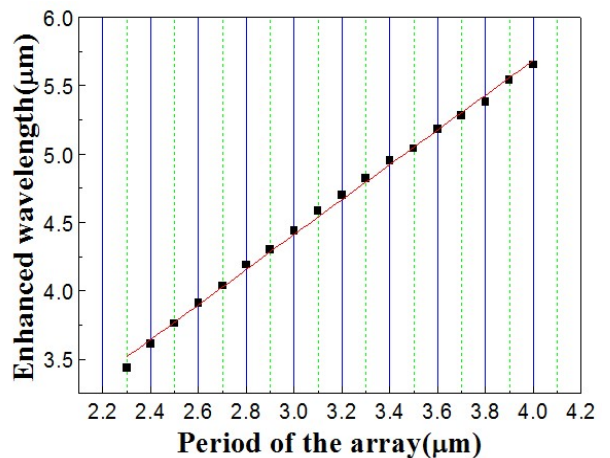


Figure 4. The linear relation between grating period and transmitted peak

图 4. 拟合光栅周期与其对应共振峰的线性关系

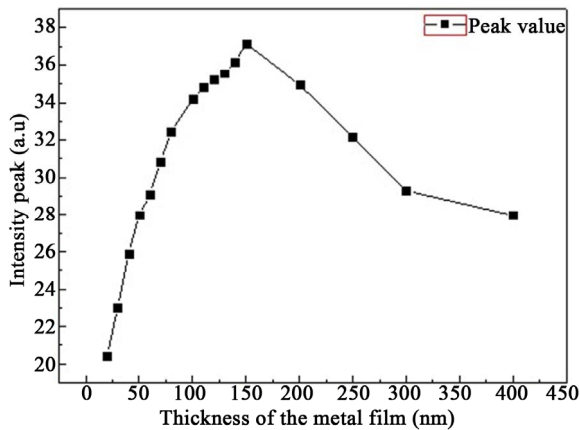


Figure 5. The impact on transmitted intensity with metal thickness variation

图 5. 透射强度随金属膜厚变化的规律

状态。同时，具体模拟过程中还考虑了光栅孔径对透射情况的影响，设计孔阵列周期为  $2.9 \mu\text{m}$ ，阵列为圆孔组成，孔的半径从  $0.5 \sim 1.5 \mu\text{m}$  变化，当阵列的周期一定时，共振峰的位置基本不变，共振峰的强度和带宽会有所变化。当孔半径变大时，透射谱中峰值减小，带宽增加。实际的设计值和滤波作用的综合考虑进行选择。

#### 4. 结论

本文在理论数值模拟的基础上，讨论了量子阱红外探测器中表面等离子体光栅的设计方案，具体研究

了金属膜厚，光栅周期，孔径大小等结构参数对透射峰值位置和光强的影响。应用表面等离子体光栅可以提高量子阱红外光探测器件的光耦合效率，获得更强的光吸收系数，同时还可以降低器件暗电流大小，减小温度对器件性能的影响，具有重要的研究价值和广阔的未来应用前景。

#### 参考文献 (References)

- [1] A Rogalski. Infrared detectors: An overview. *Infrared Physics & Technology*, 2002, 43(3-5): 187-210.
- [2] L. C. West, S. J. Eglash. First observation of an extremely large-dipole infrared transition within the conduction band of a GaAs quantum well. *Applied Physics Letters*, 1985, 46(12): 1156-1158.
- [3] B. F. Levine, K. K. Choi and C. G. Bethea. New  $10 \mu\text{m}$  infrared detector using intersubband absorption in resonant tunneling GaAlAs superlattices. *Applied Physics Letters*, 1987, 50(16): 1092-1094.
- [4] T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio and P. A. Wolff. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays. *Nature*, 1998, 391: 667-669.
- [5] W. L. Barnes, A. Dereux and T. W. Ebbesen. Review article: Surface plasmon subwavelength optics. *Nature*, 2003, 424: 824-830.
- [6] J. G. Rivas, C. Schotsch, P. H. Bolivar and H. Kurz. Enhanced transmission of THz radiation through subwavelength hole. *Physical Review B*, 2003, 68(20): 201306.
- [7] L. S. Yu, S. S. Li, Y. H. Wang and Y. C. Kao. A study of the coupling efficiency versus grating periodicity in a normal incident GaAs/AlGaAs multiquantum well infrared detector. *Journal of Applied Physics*, 1992, 72(6): 2105-2108.
- [8] L. Lundqvist, J. Y. Andersson, Z. F. Paska, J. Borglind and D. Haga. Efficiency of grating coupled AlGaAs/GaAs quantum well infrared detectors. *Applied Physics Letters*, 1993, 63(24): 3361-3363.