

光栅耦合量子阱红外探测器 一维光栅的光谱响应

潘 栋 曾一平 李晋闽 孔梅影

(中国科学院半导体研究所材料中心新材料部 北京 100083)

摘要 通过包括所有可能的高阶衍射波,本文计算了量子阱红外探测器一维光栅的光谱响应,发现一维光栅有很宽的光谱范围,可以同时覆盖 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 两个波段,这将有益于红外焦平面列阵和双色探测器的设计.同时,文中就光栅深度和沟道宽度对光栅光谱响应的影响作了研究,发现光栅的深度对其光谱响应和耦合效率有明显的影响,存在一个对应最大耦合效率的光栅深度.

PACC: 2520D, 2530B, 7230C

1 引言

量子阱红外探测器近几年得到了很大的发展^[1],主要是因为:(1)和 HgCdTe 体系相比,在工艺上用 MBE 生长大面积均匀 GaAs/AlGaAs 等材料的技术已趋成熟;(2)从设计角度看,量子阱红外探测器是基于量子阱的子带跃迁机制,可以很方便地通过对组分,阱宽等参数来选择响应波长;(3)这类材料很薄,有很高的响应速度.目前,n-GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器 80K 探测率已和 HgCdTe 器件相近,在集成规模方面也报道了 128×128 , 256×256 的面阵^[2,3].

但是对 n-(001) GaAs/AlGaAs 体系,垂直入射的红外辐射不能吸收,这主要是由子带跃迁的选择定则要求的:光场的电场矢量的分量必须有沿生长方向的分量.为此,45°磨角和光栅耦合是最常用的,而对二维面阵,光栅耦合是必须的.作为一种简单有效的光学耦合手段,并且考虑到 (001) GaAs/AlGaAs 体系的工艺成熟性,光栅耦合的量子阱红外探测器面阵有很大的实用前景^[1,4].实验上发现,光栅参数对探测器最终的性能影响很大,经常导致响应峰位的移动和附加的串音,宽的光谱响应是非常需要的.因此,研究光栅的光谱响应是非常必要的.

目前,对光栅耦合量子阱红外探测器中光栅的研究很不充分.文献[5,6]对量子阱红外探测器的光栅耦合效率作了计算,然而它们并没有包括所有可能的实衍射波模式,因此其计

潘 栋 男,1969 年生,博士研究生,从事红外探测器的研制和 MBE 材料的生长
曾一平 男,1961 年生,高级工程师,从事 MBE 材料的生长
李晋闽 男,1957 年生,研究员,从事红外探测器的研制
1996 年 5 月 14 日收到初稿,1996 年 9 月 26 日收到修改稿

算不能完全反映红外探测器光栅的光谱响应. 本文, 我们考虑了所有可能的实衍射波, 计算了量子阱红外探测器一维光栅的光谱响应和光栅参数对耦合效率的影响, 发现光栅有很宽的光谱响应, 非常适合于焦平面阵列和双色探测器的制作, 此外还计算了光栅参数对光谱响应的影响.

2 理论模型

量子阱红外探测器一维光栅的耦合效率的计算可以分为两部分, 光栅对正入射红外光的散射效率和量子阱对不同角度散射光的吸收.

2.1 光栅的衍射效率的计算

考虑矩形的金属光栅, 其结构用光栅周期 D , 光栅深度 H 和沟道宽度 d 来描述, 如图 1 所示. 假设其电导率为无穷大.

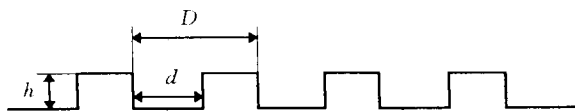


图 1 一维光栅的几何形状

对类似这样规则的形状, 模态扩展理论提供精确的解^[7]. 整个空间分为两部分, 在光栅上的自由空间上的电磁波描述为入射波和各阶衍射波的叠加, 光栅沟道中的电磁场严格按 Maxwell 方程求解. 通过两个区域在 $y=0$ 处的边界条件匹配, 取得各阶的

衍射强度. 在上半空间, 第 p 阶 TM 波沿 x 方向可以写作^[5]

$$R_p(x, y) = \frac{1}{\sqrt{D}} \exp(i(\alpha_p x + \beta_p y)) \vec{x} \quad (1)$$

其中 $\alpha_p = \alpha_0 + 2\pi p/D$, $\alpha_0 = k \sin \theta$, $\beta_p = \sqrt{k^2 - \alpha_p^2}$, 此处 k 是入射波矢; θ 是入射角; p 是光栅阶数.

在沟道中, 第 n 阶 TM 波写作

$$N_n(x, y) = M_n(x) \sin(\mu_n(y + h)) \quad (2)$$

$$M_n(x) = \sqrt{(2 - \delta_{n0})/d} \cos(n\pi x/d)$$

其中,

$$\mu_n = \sqrt{k^2 - (n\pi/d)^2}$$

n 是沟道中第 n 阶 TM 波的阶数. 应用矩量法, 可以从下式中求得第 n 阶沟道模式幅度 C_n ,

$$\sum_N^{\infty} (\sin(\mu_N h) Q_{Nn} + i(k/\mu_N) \cos(\mu_N h) \delta_{Nn}) C_n = 2(k/\beta_r) \bar{I}_n^0$$

$$Q_{Nn} = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \frac{k}{\beta_p} I_N^p \bar{I}_n^p \quad (3)$$

式中 I_n^p 是沟道中 n 阶 TM 波和自由空间中 p 阶 TM 波的正交积分, δ_{Nn} 为 delta 函数. 第 p 阶 TM 散射波的散射元写作

$$S_p = -\delta_{rp} + \sum_{n=0}^{\infty} C_n I_n^p \sin(\mu_n h) \quad (4)$$

最后,第 p 阶 TM 散射波的衍射效率可以表示为

$$I_p = \frac{|S_p|}{\cos\varphi_p} \quad (5)$$

其中 φ_p 为 p 阶衍射波传播方向和生长方向的夹角.

2.2 光栅对量子阱的耦合效率

正入射的光经光栅散射后,以不同的角度散射入材料中,对不同角度的光的吸收是不同的.在处理这样的吸收的时候,目前所有的文献忽略高阶的实模式的散射波,例如在文献[5]中只考虑 $|p| \leq 1$,从(1)式中可以看出,对不同的光栅参数和入射波长,可能存在更多的实衍射波时,因此是不合适的.另外没有给出一个适合探测器设计的光栅耦合效率的定义,下面我们给出一个新的耦合效率的定义 η_g .

对非极化波,探测器对所有可能的衍射波的吸收效率可以描述为

$$\eta = \frac{1}{2} \sum_p I_p (1 - \exp(-\alpha(\theta_p)L)) \approx \frac{1}{2} \sum_p I_p \cos^2(\theta_p) \alpha_p L \quad (6)$$

其中 θ_p 是 p 阶 TM 衍射波传播方向和材料生长方向的夹角; α_p 是量子阱对 p 阶 TM 衍射波的吸收系数; L 是材料厚度; $1/2$ 是 QWIPs 只对 TM 波吸收.定义量子阱探测器光栅的耦合效率为

$$\eta_g = \frac{1}{2} \sum_p I_p \cos^2(\theta_p) \quad (7)$$

可以看到这样的定义只和光栅的衍射和量子阱子带跃迁的机制有关,而与量子阱材料本身无关,可以反映量子阱探测器光栅的本身性质,对不同的材料体系,最终的吸收效率可以通过一个简单的关系从(6)式中求出.值得指出的是,在(7)式中的求和中,包括了所有实模式的衍射波,即满足 $\alpha_p^2 \leq k^2$ 的高阶衍射波.本文作者利用这样的处理,计算了量子阱探测器二维光栅的衍射效率,获得了和实验符合很好的结果^[8].

3 计算结果和讨论

在计算中,金属光栅的电导率设为无穷大,GaAs 的折射率为 3.3.图 2 显示了在不同光栅周期下光栅的光谱响应,光栅深度为 $1\mu\text{m}$,占空比为 0.5.和以往的计算^[5,6]不同的是,这些光栅覆盖了非常宽的光谱范围,耦合效率随波长振荡,向长波方向逐渐增加,在截止波长处的耦合效率最大,其半宽度随光栅周期的增大而增大.在短波处的响应主要是由于高阶衍射波引起. $5\mu\text{m}$ 和 $4\mu\text{m}$ 周期的光栅不仅覆盖了 $8\sim 14\mu\text{m}$ 范围,而且在 $3\sim 5\mu\text{m}$ 也有几乎相同的耦合效率,峰值效率在 0.1 以上,这意味着用长周期的光栅可以耦合短波长^[8],这将大大减小制作响应 $3\sim 5\mu\text{m}$ 光栅的难度,也表明双色探测器可以用同一尺寸的光栅耦合.

在光栅的制作过程中,腐蚀经常会使沟道的宽度有所变化,在图 3 中,我们显示了沟道宽度的变化对光谱形状的影响.正如看到的,占空比小于 0.5,峰值耦合效率和响应宽度下降,占空比大于 0.5,峰值效率有所上升,但响应宽度变窄.当占空比为 0.5,可以获得最大的响应宽度和高的耦合效率,因此光栅的占空比应取 0.5.

光栅深度在器件制作过程中通过腐蚀时间来控制,图 4 和图 5 显示了光栅深度对光谱响应和对 $10\mu\text{m}$ 入射波耦合效率的影响,光栅周期为 $4\mu\text{m}$.可以看到,当光栅深度的减小到 $0.4\mu\text{m}$ 时,光栅的响应宽度明显变宽,因此,在器件制作工艺中通过对腐蚀深度的控制,可

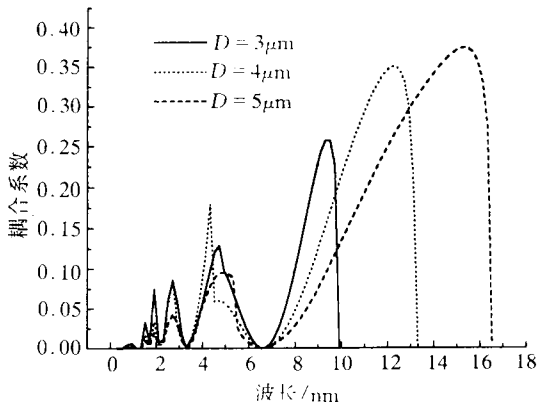


图2 不同光栅周期下光栅的光谱响应
光栅深度为 $1\mu\text{m}$, 占空比(d/D)为 0.5.

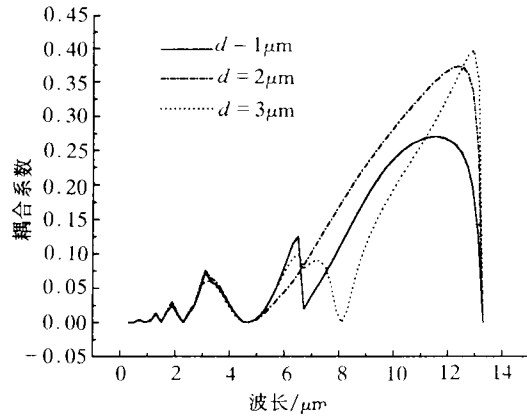


图3 不同沟道宽度下 $4\mu\text{m}$ 周期光栅的光谱响应
光栅深度 $0.7\mu\text{m}$.

以调节光栅的响应宽度,这将有利于宽带光栅耦合量子阱红外探测器的制作.同时,对三种不同的占空比,发现都存在一个对应最大耦合效率的腐蚀深度,在 $0.6\sim 0.8\mu\text{m}$ 处,大于或小于这个范围,光栅耦合效率都将迅速下降.

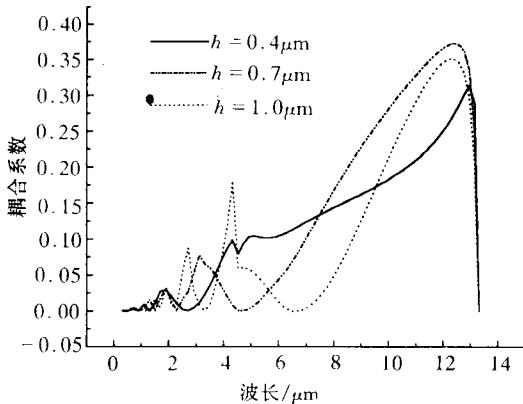


图4 不同深度下 $4\mu\text{m}$ 周期光栅的光谱响应
占空比为 0.5.

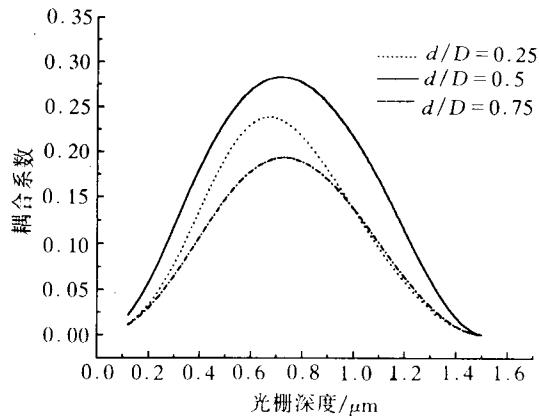


图5 在响应波长 $10\mu\text{m}$ 处,
光栅深度对耦合效率的影响
光栅周期 $4\mu\text{m}$.

4 结束语

在本文中,计算了量子阱红外探测器一维光栅的光谱响应,发现它有宽的光谱响应,合适的参数下可以同时覆盖 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 的光谱响应,这非常有利于宽带量子阱红外探测器和双色量子阱红外探测器的制作,文中讨论了光栅参数对光谱响应和耦合效率的影响,给出了优化的结构参数.

致谢 感谢瑞典 IMC 的 J. Y. Andersson 博士和西安交通大学刘学东博士和半导体所朱育清博士生在计算上的帮助和讨论。

参 考 文 献

- [1] B. F. Levine, J. Appl. Phys. , 1993, **74**: R65~77.
- [2] L. J. Kozlowski, G. M. Williams *et al.* , 1991, IEEE. Trans. ED, 1991, **38**: 1124.
- [3] C. G. Bethea, B. F. Levine *et al.* , IEEE. Trans. ED, 1993, **40**: 1957.
- [4] L. Lundqvist, J. Y. Andersson *et al.* , Appl. Phys. Lett. , 1993, **63**: 3361.
- [5] J. Y. Andersson and L. Lundqvist, J. Appl. Phys. , 1992, **71**: 3600.
- [6] Y. C. Wang and S. S. Li, J. Appl. Phys. , 1994, **75**: 582.
- [7] R. Petit, Electromagnetic Theory of Gratings (Springer, Berlin, 1980), 26.
- [8] Dong Pan, J. M. Li *et al.* , J. Appl. Phys. , 待发表.

Spectral Response of Stripe Gratings for Quantum Well Infrared Photodetectors

Pan Dong, Zeng Yiping, Li Jinmin and Kong Meiyong

*(Center of Material Science-New Material Division,
Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Science, Beijing 100083)*

Received 14 May 1996, revised manuscript received 26 September 1996

Abstract By including all possible high order diffracted waves, we have calculated the spectral response of stripe gratings for quantum well infrared photodetectors (QWIPs) and found that stripe gratings can cover very wide spectral response. In particular, $3\sim 5\mu\text{m}$ and $8\sim 14\mu\text{m}$ spectral ranges can be covered simultaneously, which is very helpful to design two-color and wide band response QWIPs. In addition, the effects of grating depth and channel width on the spectral response have been investigated. It is found that the grating depth has an obvious influence on the spectral response and coupling efficiency of gratings and there exists an optimum grating depth corresponding to the maximum coupling efficiency.

PACC: 2520D, 2530B, 7230C