

甚长波量子阱红外探测器光耦合性能*

郭方敏^{1,2} 李 宁¹ 于绍欣² 熊大元¹ 林剑锋² 侯 颖¹
何瑜环¹ 朱自强² 陆 卫^{1,†} 黄 绮³ 周均铭³

(1 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

(2 华东师范大学信息学院, 上海 200062)

(3 中国科学院物理研究所, 北京 100080)

摘要: 从实验、测试和计算结果出发, 运用有限时域差分法(FDTD)和传统的模式扩展(MEM)理论, 研究甚长波量子阱红外探测器(QWIP)几种衍射光耦合的表面近场效应和光耦合效率, 重点考察 QWIP 45°面边耦合、光栅耦合 QWIP 结构、光栅尺寸、工艺条件的变化对 QWIP 相关性能的影响. 实验与计算结果证明, 合理地设计二维光栅, 进行甚长波 QWIP 光耦合, 可以获得有效的光耦合效果.

关键词: 量子阱红外探测器; 光耦合; 2D 光栅; 响应率; 探测率

PACC: 7240; 7830; 7230

中图分类号: TN215 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2006)06-1109-06

1 引言

量子阱红外光电探测器(QWIP)的快速发展, 已经实现了以 GaAs 为基础的 QWIP 技术, 可以形成高灵敏度、低功耗、低成本、高均匀性和大面积的焦平面阵列(FPA)红外成像系统. 这项技术是建立在子带间光跃迁的量子机制基础上的, 在 n 型 Al-GaAs/GaAs QWIP 中, 工作载流子是位于导带底部的 Γ 电子, 由于 Γ 电子的有效质量各向同性, 器件无法进行正入射光吸收, 子带间的跃迁是在量子阱生长方向偏振的红外辐射引起的, 这种选择定则已经被许多实验所证明^[1~4]. 为了实现 Γ 电子与入射光辐射之间的光耦合, 把垂直入射的红外辐射有效地耦合到 QWIP 上去, 入射光必须要有沿样品生长方向不为零的矢量势分量 A_z , 二维周期光栅是应用较为成熟、广泛的一项技术.

对于二维周期光栅耦合效率的计算, 早在上世纪 90 年代就已经被广泛研究^[5,6], 但大多侧重于理论上. 本文结合实验、测试和计算结果, 运用有限时域差分法(FDTD)对甚长波(响应波长 14~16 μm) QWIP 45°面边耦合、二维周期光栅耦合 QWIP 结构的耦合效率进行了计算, 研究 QWIP 不同衍射光耦合的表面近场效应, 分析甚长波 QWIP 光耦合结构、光敏元的光栅和金属薄膜分布对响应率、探测率

等相关性能的影响. 证明二维光栅进行甚长波 QWIP 线列光耦合, 可以获得预期的耦合效果.

2 实验与结果

甚长波 QWIP 材料是应用 MBE 技术, 在半绝缘 GaAs(100)衬底上交替生长 50 个周期的 GaAs/ $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 层构成的, GaAs 量子阱宽 6.5nm, 掺杂浓度 10^{17}cm^{-3} 左右, $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 势垒厚 60nm, 带间跃迁响应波长设计值是 15 μm , n 型量子阱掺杂浓度为 $2.5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$, 50 个周期的多量子阱被夹在 1.75 μm GaAs 上电极和 1.2 μm 下电极层之间, 两电极层 n 型掺杂, 浓度为 $4 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$. QWIP 线列采用常规 GaAs 器件工艺进行光刻, 电感耦合等离子体-反应离子刻蚀(ICP-RIE), 分别得到光敏元台面和二维光栅, 再通过光刻、蒸发 0.5~1 μm Au-GeNi/Au, 合金化形成上下欧姆接触电极.

图 1 是光敏元面积 $A_D = 200\mu\text{m} \times 280\mu\text{m}$, 通过机械研磨抛光得到 45°面边耦合 QWIP 结构测试示意图. 图 2 是光栅耦合 QWIP 结构测试图, 光敏元面积 $A_D = 250\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$, 其中 250 $\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$ 是二维光栅, 光栅周期 $D = 4.6\mu\text{m}$, 栅孔深度 $h = 1.45\mu\text{m}$, d (栅孔)/ D (周期)的设计值是 0.707. 光栅耦合 QWIP 测试结构的另一半 250 $\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$ 蒸发 AuGeNi/Au, 合金化形成欧姆接触, 再通过超

* 国家自然科学基金(批准号:10374095), 上海应用材料研究与发展基金(批准号:0306), 上海市自然科学基金(批准号:04ZR14038), 中国科学院上海微系统与信息技术研究所信息功能材料国家重点实验室资助项目

† 通信作者. Email: luwei@mail.sitp.ac.cn

2005-10-24 收到, 2005-12-31 定稿

声键压引出电极. 图 3 是通过干法刻蚀工艺得到的二维周期光栅的扫描电镜(SEM)照片, 图(a)是反应离子刻蚀得到的光栅剖面 SEM 照片, 可以看到光栅

的底部不平整, 并且存在毛刺. 图(b)是加上电感耦合等离子体后干法刻蚀光栅的剖面 SEM 照片, 可以看到干法刻蚀条件的变化造成光栅侧壁不平直.

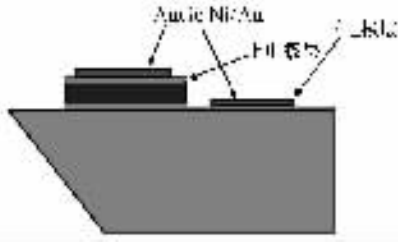


图 1 45°面边耦合 QWIP 结构测试示意图

Fig.1 45° facet polished QWIP schematic diagram

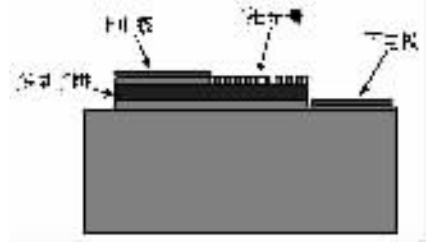


图 2 光栅耦合 QWIP 结构测试示意图

Fig.2 2D grating coupling QWIP schematic diagram

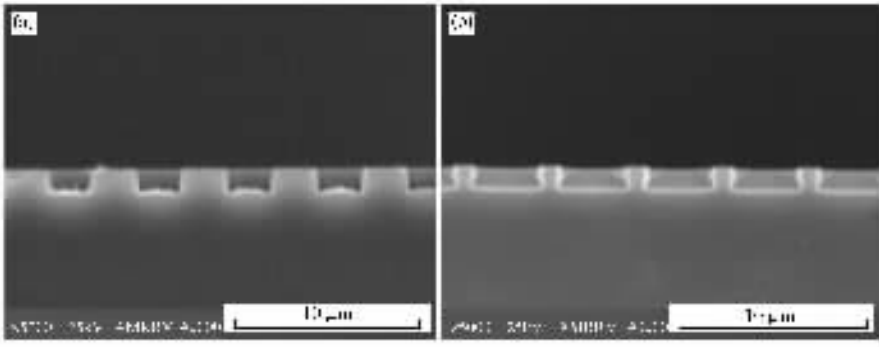


图 3 周期 $D = 4.6\mu\text{m}$ 光栅 SEM 照片

Fig.3 Grating SEM photograph of period $D = 4.6\mu\text{m}$

探测器被封装进致冷杜瓦瓶, 用 500K 黑体测定器件的电流响应率和探测率. 黑体孔径为 5.08mm, 探测器与黑体辐射孔径的距离为 30cm, 斩波器对黑体辐射进行正弦调制, 频率为 181Hz, 经过调制的黑体辐射入射到探测器转变为正弦电信号, 然后用带宽低于 1Hz 的锁相放大器测量电信号的大小, 最后用计算机进行数据采集和计算. 近似考虑器件表面反射损失和窗口透过率, 电流响应率 R 为^[7]

$$R = \frac{I_{PC}}{\phi_s [1 - (\frac{n-1}{n+1})^2] \times 0.7} = \frac{I_{PC}}{\phi_s \times 0.5} \quad (1)$$

其中 n 是 GaAs 在 40K 时的折射率; ϕ_s 为入射辐射功率的基频功率均方根值, 响应电流 I_{PC} 与响应电压 V_s 的换算关系为

$$I_{PC} = 2\sqrt{2} V_s (\frac{dI}{dV} + \frac{1}{R_L}) \quad (2)$$

$$\phi_s = \frac{\sigma(T_b^4 - T_D^4) A_b A_D}{2\sqrt{2}\pi L^2} \quad (3)$$

其中 σ 为斯忒藩常数; T_D 为探测器温度; T_b 为黑体温度; A_D 为探测器光敏元面积; A_b 为黑体辐射出射孔径面积; L 为黑体出射孔与探测器距离. 探测器的均方根电流噪声 i_{dark} 为

$$\begin{aligned} i_{\text{dark}} &= \sqrt{4eg_{\text{noise}} I_{\text{dark}} \Delta f} \\ &= \sqrt{4 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 0.2 \times 1 \times I_{\text{dark}}} \\ &= \sqrt{1.28 \times 10^{-9} I_{\text{dark}}} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 I_{dark} 为包括背景噪声的探测器暗电流, 探测器黑体探测率为

$$D^* = \frac{R}{N} = \frac{R_i \sqrt{A_D}}{i_{\text{dark}}} \quad (5)$$

图 4 是测试得到的一个 QWIP 样品的响应光谱, 峰值波长 $\lambda_p = 14.9\mu\text{m}$, 截止波长为 $16.3\mu\text{m}$, 响应带宽大于 $2.6\mu\text{m}$, 在 $14.97\mu\text{m}$ 处可以看到明显的 CO_2 吸收, 说明在该探测波段确实可以敏感地反映出对 CO_2 的吸收. 表 1 是一组相同材料、不同光耦合模式, 在同一测试条件下获得的实验数据, 可以看到各组计算得到的响应率与探测率差别基本在二倍以内. 图 5 是在不同的光刻和干法刻蚀条件下, 表 1 中 A 和 B 两组光栅耦合 QWIP 样品分别各自取测试单元, 在 77K 与 300K 背景条件下测得的暗电流变化曲线. A 样品是采用反应离子刻蚀(RIE), 见图 3(a), $d(\text{栅孔})/D(\text{周期})$ 近似 0.5; B 样品是采用电感耦合等离子体刻蚀(ICP), 见图 3(b), $d(\text{栅孔})/D(\text{周期})$ 近似 0.9; 两者的刻蚀深度都在 $1.45\mu\text{m}$ 左

右.图 5 表明,随着背景温度从 77K 变化至 300K,入射到样品的背景辐射强度变大了,由背景光导致的 QWIP 响应电流相应变大,在偏压 4.8V,A 样品的电流变化了 1.4×10^{-4} A 和 8.4×10^{-5} A,B 样品的电流变化了 3.08×10^{-5} A 和 3.89×10^{-5} A.A 样品的电流变化率要比 B 样品大一倍以上,与表 1 的测试计算结果对应得很好.说明尽管光栅周期都是 $4.6\mu\text{m}$,刻蚀深度也差不多,光刻和刻蚀条件的改

变,造成光栅的占空比不同,对 QWIP 光响应性能会产生一定影响.

另外,Ribet-Mohamed 等人对光栅耦合光敏单元进行一系列测试^[8],认为入射辐射的角度差别会造成响应电流的差别.图 5 中,A,B 两样品各自所取的两个单元测得的光电流变化都没有完全重合,正是实验条件带来的不同角度背景辐射造成的.

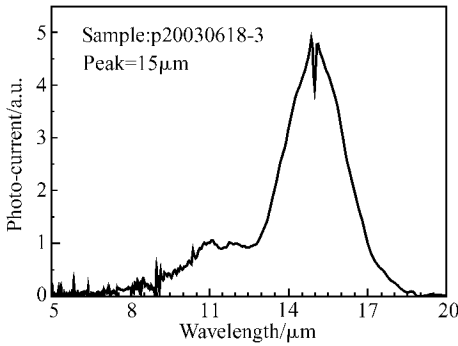


图 4 QWIP 的响应光谱

Fig.4 Spectral response of QWIP

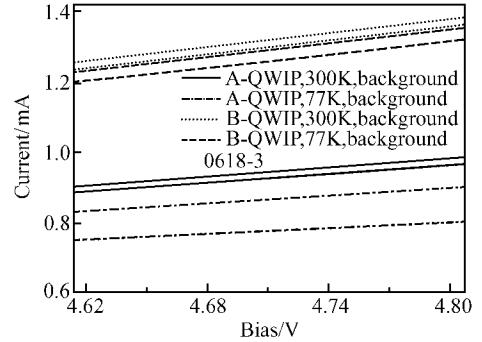


图 5 光栅耦合 QWIP 结构在不同背景温度下的电流值

Fig.5 I - V curves of QWIP at different backgrounds

表 1 不同衍射光耦合模式对比

Table 1 Different coupling modes

样品编号:0618-3	45°磨角边耦合(图 1)	图 2 结构 A(正入射)	50μm×50μm(背入射)	图 2 结构 B(正入射)
40K, V_d (器件偏压)/V	3	3	3	3
V_s (响应电压)/μV	47 (200μm×280μm)	51 (250μm×250μm)	4.8 (50μm×50μm)	48 (250μm×250μm)
R_L (匹配电阻)/MΩ	15	25	95	25
$dI/dV(1/R_d)/(A \cdot V^{-1})$	1.164×10^{-7}	1.545×10^{-7}	5.41×10^{-9}	7.389×10^{-8}
I_{PC} (响应电流)/A	2.43×10^{-11}	2.81×10^{-11}	6.17×10^{-13}	1.55×10^{-11}
R (黑体电流响应率)/(V·W ⁻¹)	1.11×10^{-2}	1.15×10^{-2}	6.3×10^{-3}	6.32×10^{-3}
i_n (均方根电流噪声)/A	2.07×10^{-13}	2.44×10^{-13}	4.54×10^{-14}	1.68×10^{-13}
D^* (黑体探测率)/(cm·Hz ^{-1/2} ·W)	1.27×10^9	1.18×10^9	6.94×10^8	9.41×10^8
D_λ^* (黑体单色探测率)/(cm·Hz ^{-1/2} ·W)	8.68×10^9	8.06×10^9	4.74×10^9	6.43×10^9

3 分析与讨论

采用有限时域差分法(FDTD)分析表 1 中 QWIP 的衍射光耦合表面近场效应^[2].根据麦克斯韦方程组

$$\begin{aligned} \nabla \times E &= -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \\ \nabla \times H &= \sigma E + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \end{aligned} \quad (6)$$

用 FDTD 方法将方程转换为 Yee's 单元^[9,10],求解得到 z 方向电场矢量的叠加

$$E_z^{n+1}(i, j, k + \frac{1}{2}) = E_z^n(i, j, k + 1/2) +$$

$$\frac{\Delta t}{\epsilon_{i,j,k} \Delta x} [H_y^{n+1/2}(i + 1/2, j, k + 1/2) -$$

$$H_y^{n+1/2}(i - 1/2, k + 1/2)] + \frac{\Delta t}{\epsilon_{i,j,k} \Delta y} \times$$

$$[H_x^{n+1/2}(i, j - 1/2) - H_x^{n+1/2}(i, j + 1/2, k + 1/2)] \quad (7)$$

其中 i, j 和 k 是 Yee's 单元的标号; $\Delta x, \Delta y$ 和 Δz 是三维空间的网格划分; ϵ 是介电常数.用标量图表示衍射光场^[1,2],标量函数 $\psi(r)$ 满足波动方程

$$\nabla^2 \psi_{ph} + 4\pi^2 k^2 \psi_{ph} = 0 \quad (8)$$

其中 $2\pi k = \sqrt{\epsilon \mu \omega}$ 是光场的波数.因为是弹性衍射,仅考虑标量函数 $\psi(r)$ 对非偏转的红外辐射,而忽略电磁场的矢量性质.

根据 Huygen 原理,由(7),(8)式得到衍射光场为

$$\psi_{ph}(x, y, R) = \iint q(X, Y) \frac{e^{-i2\pi r}}{r} \times$$

$$\left[\left(\frac{1}{r} + i2\pi k \right) \cos\theta - i2\pi k \right] dX dY \quad (9)$$

其中 $q(X, Y)$ 为衍射平面 XY 的反射系数; $r^2 = (x - X)^2 + (y - Y)^2 + R^2$, R 为观测平面 xy 到衍射平面之间的距离; θ 是 z 轴与矢量 r 之间的夹角. 又因为(7)式中的 Δt 是时间网格单元, 其表达式为

$$\Delta t = \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}} \quad (10)$$

为了计算精确, Δt 要尽可能小. 图 6 是 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \lambda/10 = 1.5\mu\text{m}$, 计算获得的二种光耦合条件衍射光场对应不同波矢分量的振幅效果. 图 6(a) 是光敏元面积 $A_D = 250\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$, 周期 $D = 4.6\mu\text{m}$, 栅孔宽度 $d = 3.25\mu\text{m}$, 栅孔深度 $h = 1.45\mu\text{m}$, 响应

波长为 $14.5\mu\text{m}$, 观测平面到衍射平面距离 $R = 2\mu\text{m}$, 光栅覆盖整个光敏元的计算结果. 可以看到二维光栅的存在使得波矢 k 空间的光场分布表现出明显的周期性, 边缘也有较强的光场分布. 图 6(b) 是 45° 面边耦合, 光敏元面积 $A_D = 200\mu\text{m} \times 280\mu\text{m}$, 响应波长为 $14.5\mu\text{m}$, $R = 2\mu\text{m}$ 的计算结果. 同样看到 45° 面边耦合使得波矢 k 空间的光场分布在中间部位具有很强的光场分布. 对照表 1 的测试计算结果, 进一步说明这二种衍射光耦合的衍射光场对应波矢分量的振幅 t_k 都比较大, 所以都获得较好的器件性能. 另外, 由于光栅耦合依据集合的衍射效应, 光敏元台面大小对器件的量子效率及探测率等参数有比较大的影响, 台面面积越大, 其性能参数越好, 表 1 的几组计算结果也进一步证实了这点.

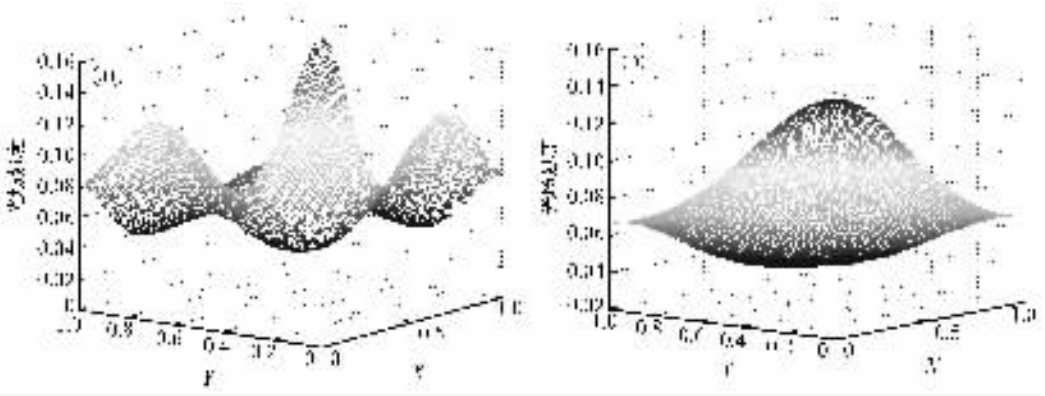


图 6 衍射光场对应不同波矢分量的振幅效果 (a) 二维光栅耦合; (b) 45° 面边耦合

Fig. 6 Swing of diffracted optical fields versus wave vector (a) 2D grating coupling; (b) 45° facet polished coupling

光耦合效率是评价衍射光栅性能的主要参数, 二维矩形周期光栅的结构, 通常由光栅深度 h 、光栅周期 D 、栅孔宽度 d 三个参数定义, 则光栅耦合效率由这三个参数决定. 应用传统的模式扩展(MEM)理论以及其他一些基本的电磁场理论, 并且考虑计算中所有可能的高次衍射波(p, q), 光栅耦合效率只与光栅的结构参数有关, 与量子阱其他参数无关.

(1) 定义 QWIP 的光栅耦合效率表达式为

$$\eta_g = \sum_{p,q} I_{pq} \cos^2 \theta_{pq} \quad (11)$$

(2) 对于垂直入射时的光响应, 量子阱活动区域的光学近场效应(near field effect)会产生一个瞬息波, 将导致沿量子阱生长方向产生电场分量, 从而观察到光响应特性^[9]. 计算中考虑这种瞬息波的影响.

图 7 是根据图 3(a) 光栅尺寸 $D = 4.6\mu\text{m}$, $d = 2.3\mu\text{m}$, $h = 1.45\mu\text{m}$ 时的计算结果, 可以看到随着“毛刺”数目的增长, 耦合效率先出现一个峰值, 略有

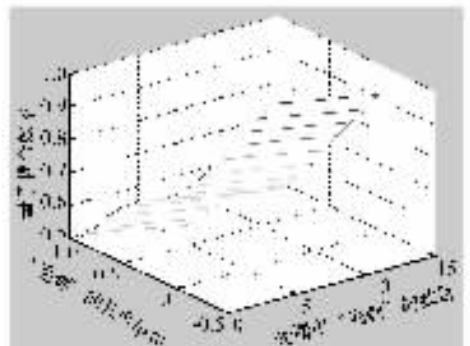


图 7 光栅中有“毛刺”的耦合效率

Fig. 7 Coupling ratio of burr grating

下降后再次升高. 分析认为第一个峰值是无序光栅效应^[11,12], 而耦合效率的再次升高是“毛刺”稀疏, 有效光栅深度增加的结果. 图 8 是根据图 3(b) 光栅尺寸 $D = 4.6\mu\text{m}$, 上底 $3.8\mu\text{m}$, 下底 $4.1\mu\text{m}$, $h = 1.4\mu\text{m}$, 倾斜部分的深度 $h_x = 0.7\mu\text{m}$ 的计算结果.

可以看到光栅内部空间形状越不规则,其耦合效率越低.上述的模拟计算与表1中实验、测试计算结果和图5的测量结果吻合得相当好.图3(a)样品的光栅孔穴内尽管有毛刺,但并没有降低光栅的光耦合效率.图3(b)的光栅孔穴内部空间形状不规则,侧壁不平直,因此降低了光栅对光的耦合效率.另外,干法刻蚀中容易出现的过宽刻蚀,使得矩形栅孔的四角变得圆滑,与图3(a)类似,圆柱形光栅存在着一个最佳半径^[6],它对光的耦合效率总是略小于矩形光栅.

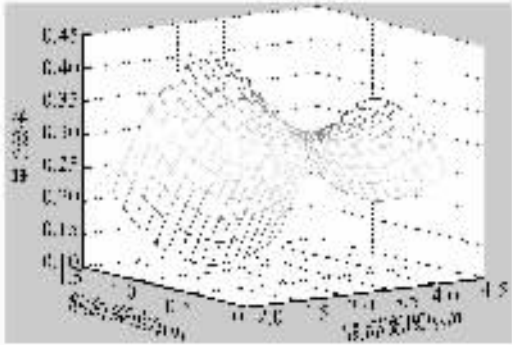


图8 “梯形”光栅的耦合效率

Fig.8 Coupling ratio of trapeziform grating

4 结论

通过运用有限时域差分法(FDTD)和传统的模式扩展(MEM)理论,研究甚长波量子阱红外探测器(QWIP)不同衍射光耦合的表面近场效应和光耦合效率,重点考察 45° 磨角边耦合QWIP、二维周期光栅耦合QWIP的工艺条件、光栅尺寸等变化对QWIP相关性能的影响.经过实验、测试和计算多方面比较,证明二维光栅的设计尺寸是合理的,工艺条件的变化会给QWIP对光的耦合效率带来一定影响.运用FDTD分析QWIP衍射光耦合,可以清晰、形象地看到光场分布和强度,而传统的MEM理论则可以更加精准地反映QWIP衍射光耦合的效果.

参考文献

- [1] Fu Y, Willander M. Optical coupling in quantum well infrared photodetector by diffraction grating. *J Appl Phys*, 1998, 84(10):5750
- [2] Fu Ying, Lu Wei. Physical models of semiconductor quantum devices. Kluwer Academic Publishers, 1999:220
- [3] Liu H C. Quantum well infrared photodetectors: the basic design and new research directions. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22(5):529
- [4] Zhao Hui, Wang Yongsheng, Xu Zheng, et al. Intervalley distribution of electrons in thin film electroluminescent devices. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, 20(8):702 (in Chinese) [赵辉, 王永生, 徐征, 等. 薄膜电致发光器件中电子的谷间分布. *半导体学报*, 1999, 20(8):702]
- [5] Pan Dong, Zeng Yiping, Li Jinmin, et al. Spectral response of stripe gratings for quantum well infrared photodetectors. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1997, 18(6):431 (in Chinese) [潘栋, 曾一平, 李晋闽, 等. 光栅耦合量子阱红外探测器一维光栅的光谱响应. *半导体学报*, 1997, 18(6):431]
- [6] Anderson J Y, Lundqvist L. Grating-coupled quantum-well infrared detectors: theory and performance. *J Appl Phys*, 1992, 71(7):3600
- [7] Tang Dingyuan, Mi Zhengyu. Photoelectricity devices generality. Shanghai: Shanghai Science & Technology Literature Publishers, 1989 (in Chinese) [汤定元, 糜正瑜. 光电器件概论. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989]
- [8] Ribet-Mohamed I, Guérineau N, Suffis-Carretero S, et al. Effect of oblique incidence on the spectral response of quantum well infrared photodetectors. *J Appl Phys*, 2005, 97:023106
- [9] Yee K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Trans Antennas Propagate*, 1966, 14(3):302
- [10] Shu Xiaozhou, Wu Yanrui, Chen Xiaoshuang, et al. Finite difference time domain modeling of grating coupled quantum well infrared photodetector. *J Infrared Millim Waves*, 2004, 23(6):401
- [11] Shen Xuechu. Semiconductors spectral and optical character. Beijing: Science Press, 2002 (in Chinese) [沈学础. 半导体光谱和光学性质. 北京: 科学出版社, 2002]
- [12] Sarusi G, Levine B F, Pearson S J, et al. Improved performance of quantum well infrared photodetectors using random scattering optical coupling. *Appl Phys Lett*, 1994, 64(8):960

Diffraction Coupling of a Very Long Wavelength Quantum Well Infrared Photodetector Linear Array*

Guo Fangmin^{1,2}, Li Ning¹, Yu Shaoxin², Xiong Dayuan¹, Lin Jianfeng², Hou Ying¹,
He Yuhuan¹, Zhu Ziqiang², Lu Wei^{1,†}, Huang Qi³, and Zhou Junming³

(1 *National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*)

(2 *Department of Electrical Engineering, East China Normal University, Shanghai 200062, China*)

(3 *Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract: Through experiment, test, and analysis, we study the surface near-field effect and optical coupling efficiency of very long wavelength quantum well infrared photodetectors (QWIP). We apply finite difference time domain modeling and the modal expansion method, and we review different diffraction couplings and different processes and consider their coupling efficiency. The experiment and analysis prove that effective grating coupling can be achieved through the reasonable design of a 2D grating for very long wavelength QWIPs.

Key words: QWIP; diffraction coupling; 2D grating; responsivity; detectivity

PACC: 7240; 7830; 7230

Article ID: 0253-4177(2006)06-1109-06

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 10374095), the AM Foundation of Shanghai(No. 0306) and the Natural Science Foundation of Shanghai(No. 04ZR14038) and the State Key Laboratory of Function Materials for Information

† Corresponding author. Email: luwei@mail.sitp.ac.cn

Received 24 October 2005, revised manuscript received 31 December 2005

©2006 Chinese Institute of Electronics