

双色量子阱红外探测器顶部光子 晶体耦合层的设计优化^{*}

王 科 郑婉华[†] 任 刚 杜晓宇 邢名欣 陈良惠

(中国科学院半导体研究所纳米光电子实验室, 北京 100083)

(2007 年 3 月 8 日收到, 2007 年 6 月 28 日收到修改稿)

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(QWIP)的顶部光子晶体光输入耦合层结构的电磁场分布进行了仿真分析,得到了多种不同周期、占空比、深度的二维光子晶体结构耦合效率及电磁场分布.探索了一种双色探测器的光子晶体光输入耦合层结构的设计思路,使之可对中波/长波或长波双色 8/12 μm 同时提供较高的耦合效率.

关键词: 红外探测器, 量子阱, 光子晶体

PACC: 4270Q, 0762

1. 引 言

自 1987 年 Yablonovitch^[1]和 John^[2]提出光子晶体的概念之后,光子晶体就成为人们研究的热点,大量的光子晶体基光电子器件以及光子芯片的模型和实验结果被报道^[3-7].光子晶体是一种人工制作的结构,将不同介电常数的材料进行周期性地排列,分析其色散曲线,可以形成类似半导体电子禁带的“光子禁带”,落入“光子禁带”的光子将被禁止在光子晶体结构中传播.适当改变光子晶体的结构,调整光子能带的分布,可以出现超棱镜、超自准直、反常折射、低群速度、高 Q 值微腔、色散和偏振调制、非线性效应增强等一系列有趣的光学现象^[8].总之,光子晶体本质的特点就是实现了对光子的量子调控,预期在传统的光电子器件中引入光子晶体结构,可以改善器件的性能.2006 年,Alight Technologies 公司通过引入光子晶体光子禁带(PBG)结构改善垂直腔面发射激光器(VCSEL)的横模特性,制作出单横模输出 VCSEL 激光器产品^[9].而本文关注的是如何利用光子晶体对光子态密度的强烈调制作用,应用到量子阱红外探测器中以提高其性能的物理机理.

在红外技术中, GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器

(QWIP)是其中的关键器件,特别是双色/多色、集成大面积、低成本的红外焦平面凝视系统,可广泛应用于国防、医疗、气象等领域.2005 年, Gunapala 小组已经报道了 1024×1024 像素的双色量子阱红外焦平面器件^[10],中国科学院半导体研究所纳米光电子实验室与中电十一所也联合制作出国内最大 128×160 像素的长波红外焦平面阵列^[11],上海技术物理所也有这方面的研究报道^[12].

双色/多色大面积量子阱红外焦平面的面阵制作存在着很多挑战:一方面是双色红外探测器在不同波段的量子阱材料生长上存在温度差别等一系列问题;另一方面,根据量子阱子带跃迁的选择定则^[13],只有电场方向平行于量子阱生长方向的光波才能激发子带跃迁,而探测器主要工作在正入射条件,其电矢量方向垂直于量子阱生长方向,很难被量子阱吸收层吸收、激发子带跃迁形成光电流.为解决这一矛盾,需要利用光耦合来改变电矢量方向以满足量子选择定则的条件,因此光耦合的作用就显得十分重要.至今,针对单色单管像素的耦合,人们已提出 45° 角斜入射、二维光栅、漫反射光栅、波纹耦合结构等多种耦合方式^[14-16].为实现集成大面阵,人们普遍采用二维光栅结构.在双色/多色大面阵红外焦平面的实际制作中,不同响应波长像素的耦合光

^{*} 国家自然科学基金重点项目(批准号:10634080),国家自然科学基金(批准号:60677046)资助的课题.

[†] E-mail: whzheng@semi.ac.cn

栅参数不同,当在晶片上统一制作大面阵的光栅耦合层时,存在刻蚀精度、刻蚀深度的控制以及多次制版、套刻精度的控制等一系列问题^[11],使高均匀性、高分辨率的双色/多色大面阵红外焦平面不易实现。总之,要实现大面积双色红外量子阱探测器阵列,除了优化材料生长条件之外,还需优化器件面阵耦合光栅的设计和制作。

本文将光子晶体结构设计在光耦合层上,利用光子晶体对光子态密度的强烈调制效应,对电矢量垂直于量子阱生长方向的入射光波进行偏振态的调制,使其电矢量沿量子阱生长方向偏振,以满足量子阱吸收条件。更重要的是,利用光子晶体的尺寸效应^[8]可以设计出对多波段敏感的统一周期、深度等参数的耦合层结构,使某一个固定结构对多波段波长耦合均敏感,这对多色探测器的设计十分重要。通过光子晶体结构设计,完全可以采用单色工艺替代复杂的多色光栅工艺,大大简化多色量子阱探测器面阵的制作过程,提高整体器件的性能。

2. 模拟与分析

Andersson 等人^[17-18]曾用传输矩阵法对几种含二维光栅的探测器的量子效率进行了计算比较,但缺乏对光吸收区的细致分析。三维时域有限差分法(3D-FDTD)是严格求解麦克斯韦方程的数值算法,本文用来仿真光子晶体耦合层的场分布,并进行设计优化。

模型建立如图 1 所示,GaAs/AlGaAs 探测器自顶至底分别为金属电极和接触层、光耦合层、多色量子阱吸收层、衬底。金属层设计为理想金属 Au,采用 Drude 模型^[19]。光子晶体耦合层是通过刻蚀接触层

GaAs 后,再淀积金属构成。为了方便我们约定,外延材料生长的方向为 Y 轴,取光子晶体结构最底面 $Y = 0$ 指向衬底方向为正,沿器件面为 XZ 平面,其中心为零点。多色量子阱吸收层的典型双色 GaAs/AlGaAs 模型^[20]:在 $0.5 \mu\text{m}$ 的 GaAs 缓冲层上依次生长 $1.5 \mu\text{m}$ 的 AlGaAs/GaAs 长波多量子阱, $0.3 \mu\text{m}$ 的 GaAs 隔离层, $1.5 \mu\text{m}$ 的 AlGaAs/GaAs 中波多量子阱和 $0.7 \mu\text{m}$ 的接触层。根据二维光栅耦合理论,理想二维(方孔四方晶格光子晶体)光栅方程为 $\Delta \sin \theta_{p,q} = \lambda' \sqrt{p^2 + q^2}$,其中 (p, q) 为衍射级, Δ 为光栅常数, $\lambda' = \lambda/n_r$ 为光栅介质中波长。当 $\theta_{p,q} = 90^\circ$ 时截止波长 $\lambda_{co} = n_r \Delta$,电矢量偏振方向恰好满足量子阱吸收区激发子带跃迁的条件,即最佳周期 $\Delta_{opt} = \lambda_{co}/n_r$,当其占空比为 1:1、光栅深度 $h = \lambda'/4$ 时,实现零级模相消、次级模增强,能提高耦合效率。距光耦合层底部距离 Y 平面区域内入射波耦合效率可认为

$$\eta = \frac{\iint E_y^2(x, y, z) dx dz}{\iint E_{in}^2(x, y, z) dx dz}, \quad (1)$$

设定光由器件底部背入射,其中 E_y 为监测积分平面内沿 Y 轴的场分量, E_{in} 为设定光源处的入射电场分量 E_x 和 E_z 。当然,作为三维结构器件,我们必须考虑对于响应波长在量子阱区域内不同 Y 平面内的耦合效率均值。由于 3D-FDTD 仿真计算受到运算时间和计算机存储空间的限制,因此采用 FDTD 方法只能选择一个合理的积分区域,并固定积分区域计算得到相对的耦合效率。这仅是由于数值计算上局限性,但并不影响计算结果所表现的物理特性。

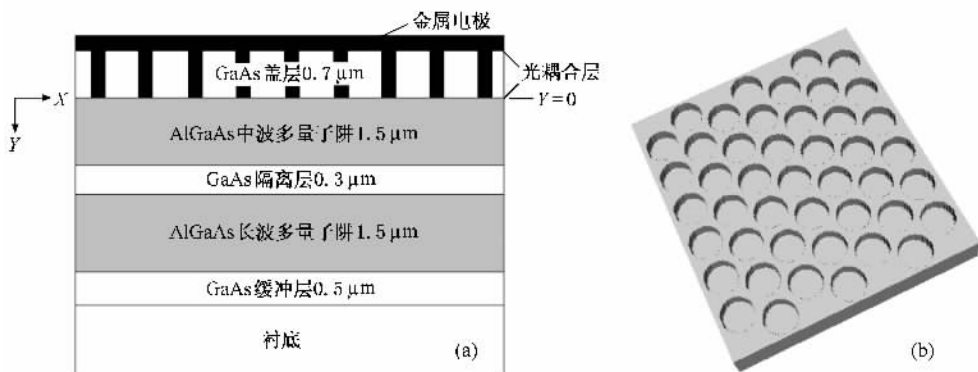


图 1 QWIP 单像素模型示意图 (a) 纵向结构示意图 (b) 光子晶体耦合层的立体示意图

我们先考察单色吸收区以四方、六角晶格结构的二维光子晶体作为光耦合层的特性,即 $Y = 0 - 1.5 \mu\text{m}$ 的区域. 如图 2 所示,入射光波通过圆孔四方晶格光子晶体耦合后在量子阱吸收区内的光场分布,其中孔半径 $a = 0.4\Lambda$,深度 $h = 0.7 \mu\text{m}$,介电常数 $\epsilon(\text{GaAs}) = 3.4$,积分区域 $6 \times 6 \Lambda^2$,入射光波长 8

μm ,电矢量沿 X 方向偏振. 图 2(a) 为不同周期结构中 $Y = 0.3 \mu\text{m}$ 处水平截面内的 E_y 场分布,截面积均为 $12 \times 12 \mu\text{m}^2$. 图 2(b) 为 $\Lambda = 2.5 \mu\text{m}$ 器件内两个垂直侧面内不同深度的 E_y 场分布. 光子晶体明显改变了入射光场的偏振方向,其下表面的电场由于金属界面的近场效应而很强.

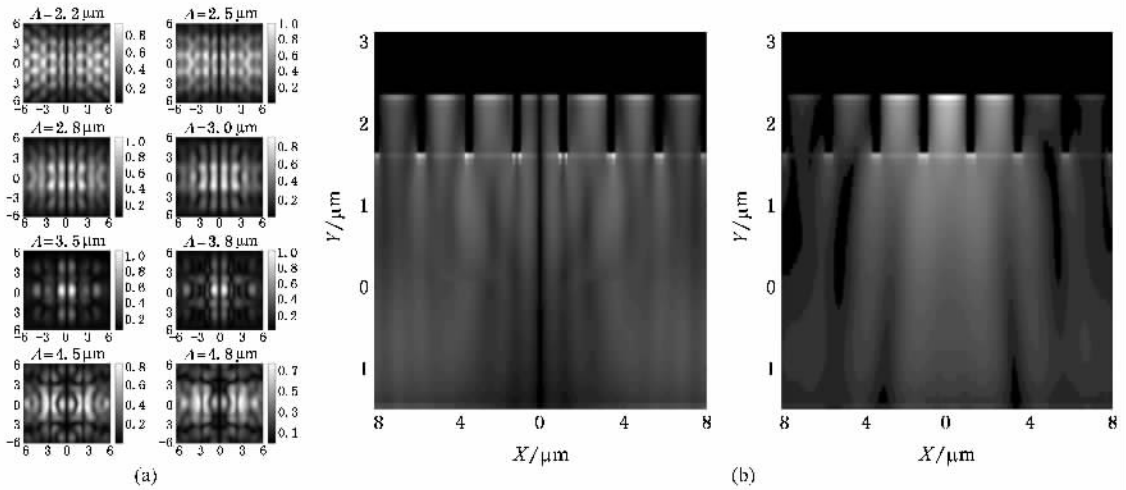


图 2 不同周期圆孔四方晶格光子晶体耦合层的场分布 (a) 不同周期 $Y = 0.3 \mu\text{m}$ 水平截面内 E_y 场分布,周期分别取 $\Lambda = (2.2, 2.5, 2.8, 3.0, 3.5, 3.8, 4.5, 5.0) \mu\text{m}$; (b) 周期 $\Lambda = 2.5 \mu\text{m}$ XY 和 YZ 垂直侧面内 E_y 场分布

通过将量子阱吸收区内的电场垂直偏振分量积分,计算耦合效率可获得更精确的分析. 图 3 给出了入射光波长 $\lambda = 8 \mu\text{m}$,在不同周期光子晶体结构耦合层器件中, $Y = 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 1.2, 1.5 \mu\text{m}$ 吸收区平面的相对耦合效率 η . 其中图 3(a) 即为理想的二维光栅,耦合效率的峰值恰好在满足光栅方程的最优化周期附近,从而验证了我们计算方法的准确性. 同时通过分析图 3(b)–(d) 得到:第一,每种结构都可找到耦合效率最高的优化周期,在设计光子晶体耦合层时,应当采用最优化的周期设计,并在此基础上优化占空比和刻蚀深度. 第二,吸收区深度不同其耦合效率也不同,离耦合层越近耦合效率越高,在设计双色/多色量子阱吸收区时,应仔细考虑不同波段吸收区不同深度而导致的耦合效率匹配^[11],使处在不同深度的量子阱吸收区(对应不同波段)的耦合效率相当. 同时还需考虑光子晶体耦合层的刻蚀工艺可能对量子阱吸收区造成损伤,因此设计各个波段量子阱吸收层时,应在工艺条件允许和满足匹配的条件下尽量靠近耦合层. 第三,圆孔六角晶格结构光子晶体的耦合效率分别在周期轴 $\Lambda = 3.2 \mu\text{m}$ 和 $\Lambda = 4.4 \mu\text{m}$ 处出现两个大小相当的

峰值,这是由于在光子晶体的周期不断改变的情况下,一阶布拉格散射的模式因不满足光栅方程而逐渐消失,导致二阶布拉格散射模式的出现.

实现对双色敏感的光子晶体耦合层,正是利用了这种双峰特性. 当然,这种特性还可以利用在小周期六角晶格结构不易制作时,可选择与二阶模式对应、易制作的大周期结构,也不影响其耦合效率. 从图 3 中可以看出,虽然圆孔光子晶体的耦合效率比四方晶格光栅略低,但通过下文描述的优化设计,加强光子晶体对光子态密度的调整.

根据光子晶体的尺寸效应^[8],通过改变周期,类似的物理特性亦能出现,即其他入射波长应该也存在双峰效应,典型长波双色 $8/12 \mu\text{m}$ 和中/长波 $5/8 \mu\text{m}$. 如图 4(a) 所示,若将入射波长改为 $\lambda = 12 \mu\text{m}$,重复上述的模拟计算,我们得到不同周期六角晶格的耦合效率,亦存在双峰特性,周期 $4.3 \mu\text{m}$ 恰对应其一阶散射耦合强. 结合图 3(d) 的结果,说明 $\Lambda = 4.4 \mu\text{m}$ 的圆孔六角晶格光子晶体耦合层对长波双色 $8/12 \mu\text{m}$ 波长均有高耦合效率. 但这种结构对入射波 $\lambda = 12 \mu\text{m}$ 的耦合效率相对较低,需要在此基础上,进一步优化占空比设计. 图 4(b) 为入射波长 $\lambda = 8 \mu\text{m}$ 、周期 $\Lambda = 3.2 \mu\text{m}$ 圆孔六角晶格不同占空比的

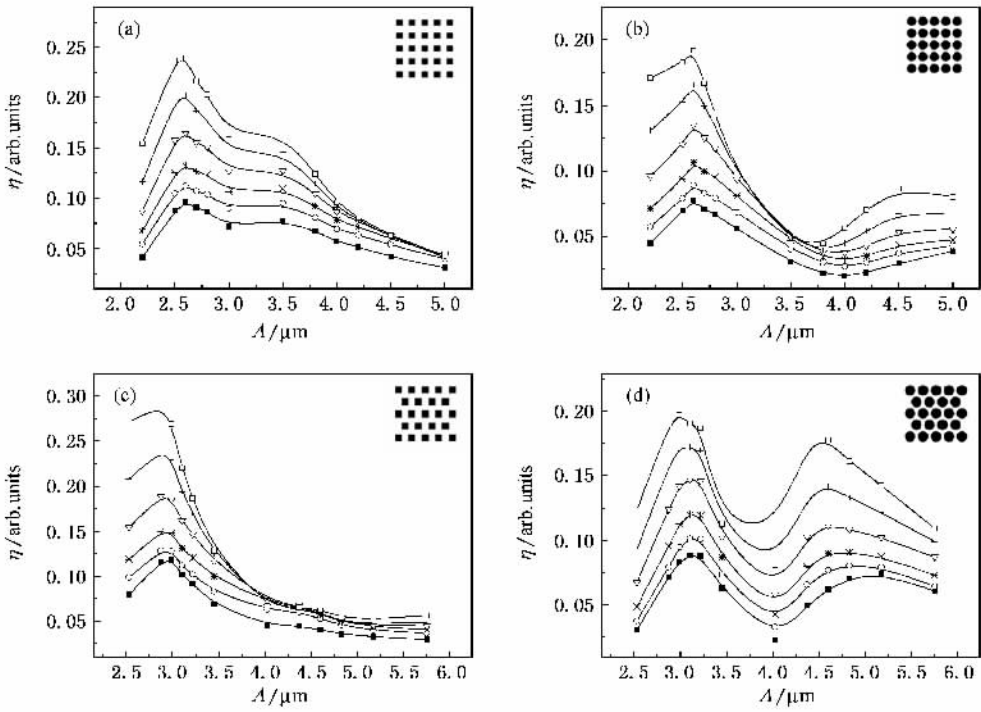


图 3 不同结构的相对耦合效率。(a)(c)分别为方孔四方、六角晶格 (b)(d)为圆孔四方、六角晶格(图中□, +, ∇, * , ○, ■分别代表距耦合层 $Y=(0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 1.2, 1.5)\mu\text{m}$ 处水平截面内的相对耦合效率)

耦合效率, 占比 $a/\Lambda = 0.325$ 附近为最佳, 插图为一阶布拉格散射模式的场分布. 图 4(c) 对应周期 $\Lambda = 4.4 \mu\text{m}$ 时的耦合效率, 占比 $a/\Lambda = 0.38$ 附近为

最佳, 插图为二阶布拉格散射模式的场分布, 对比图 4(b) 可明显看出光场经过光子晶体调制后散射模式的不同. 图 4(d) 为入射波长 $\lambda = 12 \mu\text{m}$ 、周期 $\Lambda = 4.4$

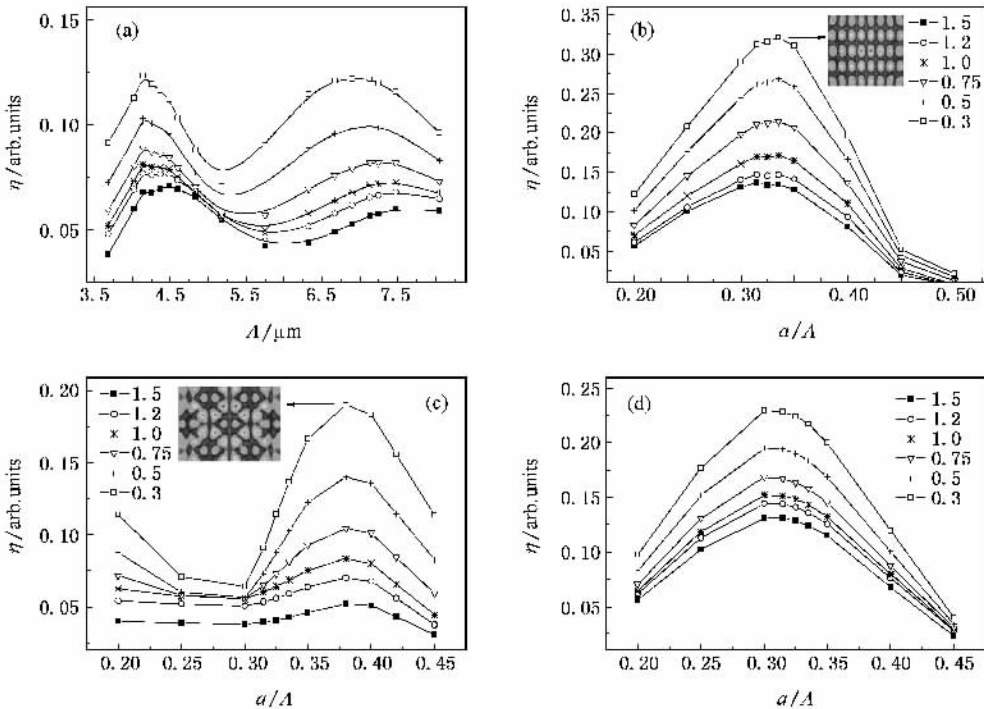


图 4 不同占比圆孔六角晶格的相对耦合效率(图例定义同图 3) (a)入射波长 $\lambda = 12 \mu\text{m}$ 条件下不同周期的耦合效率 (b) $\lambda = 8 \mu\text{m}$ 、周期 $\Lambda = 3.2 \mu\text{m}$ (c) $\lambda = 8 \mu\text{m}$ 、 $\Lambda = 4.4 \mu\text{m}$ (d) $\lambda = 12 \mu\text{m}$ 、 $\Lambda = 4.4 \mu\text{m}$

μm 条件下的耦合效率, 占空比 $a/\Lambda = 0.3$ 附近为最佳, 此时的耦合效率已经能与入射波长 $\lambda = 8 \mu\text{m}$ 时的结果相匹配了. 这说明, 在单色长波吸收区, 周期

$\Lambda = 4.4 \mu\text{m}$ 、占空比 $a/\Lambda = 0.3$ 的耦合层结构, 可以使长波双色 $8/12 \mu\text{m}$ 量子阱吸收区的耦合效率相当, 实现双色敏感.

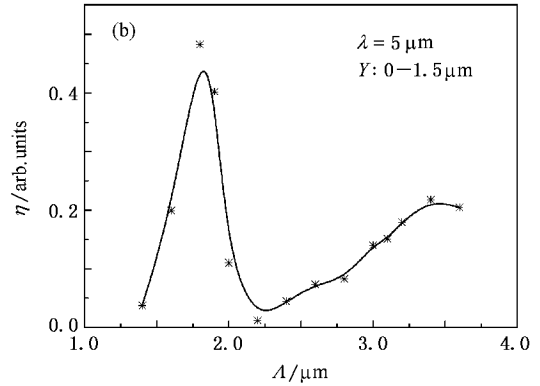
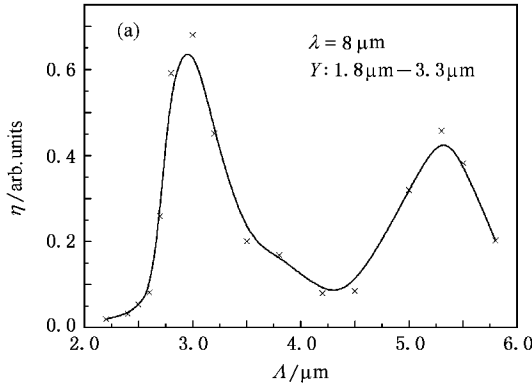


图5 双色吸收区域的不同周期结构的相对耦合效率 (a)入射波长 $\lambda = 8 \mu\text{m}$; (b) $\lambda = 5 \mu\text{m}$

实际中波/长波双色器件的双色波段吸收区通常不在一个深度, 如图 1(a)所示, 双色吸收区分别处于 $Y = 0 - 1.5 \mu\text{m}$ 和 $Y = 1.8 - 3.3 \mu\text{m}$ 附近区域, 所以还需考察更深的吸收区是否存在双色特性.

维光栅(方孔四方晶格), 虽然在长波段耦合效率比较高, 但中波耦合效率很低, 因此, 更适合做单色波长的耦合层.

如图 5(a)所示, 设定不同的光子晶体周期 Λ , 占空比设为 $a/\Lambda = 0.3$, 扩大积分区域为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$, 提高 FDTD 模拟精度和时长, 并在 $Y = 1.8 - 3.3 \mu\text{m}$ 区域等间隔选取不同深度的 6 片积分区域, 积分后叠加得到该区域对响应波长 $8 \mu\text{m}$ 的平均耦合效率, 也存在明显的双峰特性. 同样, 中波吸收区响应波长 $5 \mu\text{m}$ 的耦合效率如图 5(b). 若选择双色波长的周期重叠区 $\Lambda = 3.2 \mu\text{m}$ 附近的圆孔六角晶格光子晶体作为耦合层, 通过类似前述长波双色 $8/12 \mu\text{m}$ 的占空比优化, 可得到如图 6(a)所示, 周期 $\Lambda = 3.2 \mu\text{m}$, 占空比 $a/\Lambda = 0.4$, 深度 $h = 0.7 \mu\text{m}$ 的六角晶格光子晶体耦合层结构, 满足双色中波/长波均有相对较高的耦合效率. 相比较而言, 如图 6(b)所示的理想二

总而言之, 通过改变光子晶体的结构和 3D-FDTD 的仿真计算, 我们验证了理想二维光栅单色波长耦合层的高效率, 发现了 QWIP 的光子晶体耦合层存在高阶布拉格散射模式, 并可以利用来实现单一结构光耦合层对双色敏感, 虽然 3D-FDTD 算法亦存在其空间和时间的局限性, 但其反映的物理特性是值得关注的, 对我们设计器件结构大有裨益.

3. 结论与展望

我们通过采用三维时域有限差分方法, 仿真多种结构二维光子晶体耦合层在不同周期、占空比、有源层深度的条件下的场分布, 计算了其相对耦合效率, 分析出每种结构的最佳周期、有源层深度及占空

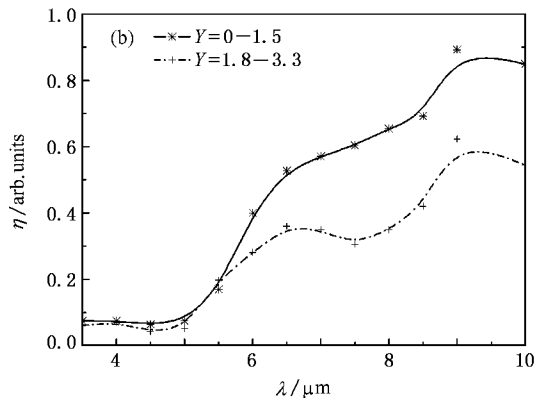
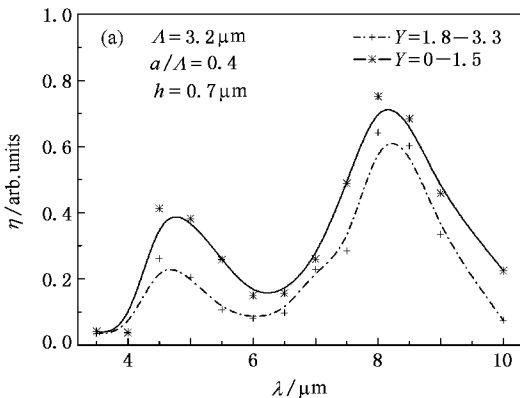


图6 参数 $\Lambda = 3.2 \mu\text{m}$, $a/\Lambda = 0.4$, $h = 0.7 \mu\text{m}$ 的光子晶体耦合层的波长响应 (a)圆孔六角晶格; (b)方孔四方晶格

比, 提供了一种双色探测器的顶部光子晶体耦合层的设计, 对双波段均提供高耦合效率. 这种双色光子晶体耦合层的设计方法和结果, 对制作更大面积、高均匀性、高分辨率的双色/多色量子阱红外探测器面阵有着很重要的意义, 它不仅从物理机理上简化了传统多波长二维光栅的复杂刻蚀工艺, 还为各种波

段的多色探测器结构设计提供了新思路, 特别是能利用在重叠型探测像素中, 以提高双色/多色量子阱红外探测器面阵的分辨率. 另外, 采用 FDTD 仿真分析, 亦有助于更深刻分析光子晶体对光子态和横向光场模式调制的作用原理, 以应用于探测器、发光二极管、面发射激光器等光电器件的优化设计中.

- [1] Yablonovich E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [3] Cai X H, Zheng W H, Ma X T, Ren G, Xia J B 2005 *Chinese Physics* **14** 2507
- [4] Zhou M, Chen X S, Xu J, Zeng Y, Wu Y R, Lu W, Wang L W, Chen Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 411 (in Chinese) [周 梅、陈效双、徐 靖、曾 勇、吴砚瑞、陆 卫、王连卫、陈 瑜 2005 物理学报 **54** 411]
- [5] Xu X S, Xiong Z G, Sun Z H, Du W, Lu L, Chen H D, Jing A Z, Zhang D Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1248 (in Chinese) [许兴胜、熊志刚、孙增辉、杜 伟、鲁 琳、陈弘达、金爱子、张道中 2006 物理学报 **55** 1248]
- [6] Cai X H, Zheng W H, Ma X T, Ren G, Xia J B 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 2290
- [7] Nozaki K, Ide T, Hashimoto J, Zheng W H, Baba T 2005 *Electron. Lett.* **41** 843
- [8] Joannopoulos J D, Meade R D, Winn J N 1995 *Photonic Crystals* (Princeton University Press Princeton)
- [9] Web Site : <http://www.alight.dk/index.htm>
- [10] Gunapala S D, Bandara S V, Liu J K 2005 *Semicond. Sci. Technol.* **20** 473
- [11] Su Y M, Chong M, Zhang Y B, Hu X Y, Sun Y W, Zhao W, Chen L H 2005 *Chinese Journal of Semiconductors* **26** 2044 (in Chinese) [苏艳梅、种 明、张艳冰、胡小燕、孙永伟、赵 伟、陈良惠 2005 半导体学报 **26** 2044]
- [12] Zhou X C, Chen X S, Zhen H L, Lu W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4247 (in Chinese) [周旭昌、陈效双、甄红楼、陆 卫 2006 物理学报 **55** 4247]
- [13] Chuang S L 1995 *Physics of Optoelectronic Devices* (John Wiley & Sons, New York)
- [14] Hasnain G, Levine B F, Bethea C G, Logan R A, Walker J, Malik R J 1989 *Appl. Phys. Lett.* **54** 2515
- [15] Sarusi G, Levine B F, Pearton S J, Banadara K M S, Leibenguth R E 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 960
- [16] Chen C J, Choi K K, Tidroe M Z, Tusi D C 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 1446
- [17] Andersson J Y, Lundqvist L, Paska Z F 1991 *Appl. Phys. Lett.* **58** 2264
- [18] Andersson J Y, Lundqvist L 1991 *Appl. Phys. Lett.* **59** 857
- [19] Palik E D 1985 *Handbook of Optical Constants of Solids* (Academic Press, London)
- [20] Bandara S V, Gunapala S D, Liu J K et al 2003 *Infrared Physics & Technology* **44** 369

Design and optimization of photonic crystal coupling layer for bi-color quantum well infrared photodetectors^{*}

Wang Ke Zheng Wan-Hua[†] Ren Gang Du Xiao-Yu Xing Ming-Xin Chen Liang-Hui
(*Nano-Optoelectronics Laboratory , Institute of Semiconductors , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100083 , China*)
(Received 8 March 2007 ; revised manuscript received 28 June 2007)

Abstract

Finite difference time domain (FDTD) method is used for the simulation and analysis of electromagnetic field in the top coupling layer of GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetector (QWIP). Simulation results demonstrated the coupling efficiencies and distributions of electromagnetic (EM) field in a variety of 2D photonic crystal coupling layer structures . A photonic crystal structure for bi-color-QWIP is demonstrated with high coupling efficiency for two wavelengths .

Keywords : infrared photodetectors , quantum wells , photonic crystal

PACC : 4270Q , 0762

^{*} Project supported by the State Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10634080) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60677046).

[†] E-mail : whzheng@semi.ac.cn