光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023022004

小像元量子阱FPA抗光学串音的FDTD仿真

邵恩善[1,2]，王　玲[1]，李向阳[1*]

（1. 中国科学院上海技术物理研究所，上海 200083；2. 上海科技大学 信息科学与技术学院，上海 201210）

摘　要： 采用光栅耦合结构的焦平面阵列(Focal Plane Array,FPA)在工艺上难以制备,反射耦合结构较为容易。为探究反射耦合结构是否可以在小尺寸范围内替代光栅耦合结构,文章使用FDTD电磁场仿真软件MEEP构建了光栅耦合结构和反射结构GaAs/AlGaAs量子阱红外焦平面阵列三像元模。通过对器件内部光学串音进行仿真,验证了在逼近衍射极限时,采用全内反射结构的FPA在5～7 μm和8.5～10 μm之间的抗串音效果强于光栅耦合结构,而在6.5～8.5 μm和10～12 μm之间,光栅耦合结构的抗串音效果更好,在12～15 μm范围内,两种结构的抗串音能力相当。针对15 μm中心距全内反射结构量子阱FPA,探究了反射角度、刻蚀深度和量子阱周期对其串音的影响。

关键词： 量子阱；光学串音；FDTD仿真；焦平面；GaAs/AlGaAs

中图分类号： TN362　**文章编号：** 1001－5868(2023)03－0325－05

FDTD Simulation of the Performance on Anti-optical Crosstalk of Small Pixel Quantum Well Focal Plane Array

SHAO Enshan[1,2], WANG Ling[1], LI Xiangyang[1]

(1. Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN;
2. School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, CHN)

Abstract: Quantum well FPA with reflection coupling structure is relatively easy to fabricate compared with the grating coupling structure. In order to explore whether the RC structure could replace the GC structure in the small size range, the MEEP, a software which is based on the FDTD, was used to construct the 3 pixels model of GC structure and RC structure GaAs/AlGaAs quantum well infrared FPA. According to the simulation of the internal optical crosstalk problem of the device, it is verified that when approaching the diffraction limit, the anti-crosstalk effect of FPA with RC structure is stronger than that of RC structure when the pixel's size is between 5～7 μm and 8.5～10 μm, while GC shows better performance while the pixel's size is between 7～8.5 μm and 10～12 μm, and the anti-crosstalk ability of the two structures shows close performance in the range of 12～15 μm. For the quantum well FPA with 15 μm pixels and RC structure, the influence of reflection angle, etch depth and the period of quantum well on its performance of fighting against the crosstalk was explored.

Key words: quantum well; optical crosstalk; FDTD simulation; focal plane array; GaAs/AlGaAs

收稿日期：2023－02－20.

基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFA0715501).

* **通信作者：**李向阳　**E-mail:** lixy@mail.sitp.ac.cn

0 引言

迄今为止,红外探测技术已经发展到第三代[1],第三代器件类型以焦平面阵列(Focal Plane Array,FPA)为主,其特点是小尺寸、大面阵和多色探测等。随着像元尺寸的减小,串音(Crosstalk)成为限制焦平面器件发展的主要因素。2018 年,陈卫业等[2]使用 Silvaco TCAD 软件研究了小像元 HgTeCd 红外焦平面的串音,在截止波长为 4.5 μm、像元大小为 5 μm 的条件下,串音为 30.5%。

同样对红外辐射有响应的量子阱材料因为良好的均匀性和成熟的制备工艺而成为最受欢迎的红外探测材料之一。量子阱因为选择定则需要额外的耦合结构才能产生光吸收,目前最常用的耦合机制是光栅衍射耦合方法(Grating Coupling,GC),但随着像元尺寸的减小,对制备更小尺寸光栅的工艺要求更高,所以需要使用其他耦合方式来让探测器产生光吸收,1998 年,Choi 等[3]提出了一种加入反射耦合(Reflection Coupling,RC)的方法,即生长金属反射镜改变电磁波传播方向,由于电场偏振和传播方向垂直,从而产生可以被量子阱吸收的电场分量,与光栅耦合相比,该结构制备工艺简单,虽然损失掉了部分有源区,但响应率依然很可观,可作为光栅耦合的替代。

为了抑制串音,近几年提出了改进算法、调整成像系统、完善器件结构等方法。2022 年,朱旭波等[4]使用 Sentaurus TCAD 软件仿真了 InSb 焦平面像元,像元间距为 7.5 μm,光敏元宽度为 5 μm,入射截止波长为 5.5 μm,得到台面结器件和平面结器件可以通过减小器件厚度和增加结深度的方法减少串音,以及外延结构器件可以通过增加吸收层厚度来减少串音的结论。

串音的测试方法有红外小光点法、激光诱导电流法和光点偏移法等。其中红外小光点法是最为直接的方法,其原理是使用成像系统将红外辐射聚焦成半径接近单个像元尺寸的艾里斑,通过观测红外辐射照射的区域并通电观测电信号的幅度进而判断该区域光学串音的大小。但由于红外辐射处于非可见光波段,且光斑半径特别小,为了产生并对准艾里斑需要设计光学系统和高精度的操作平台,成本很高,而使用电磁学仿真软件研究光学串音,可以减少成本,并且可以通过图像处理使所有波段的电磁辐射可视化,使结果更加直观。

电磁场仿真方法主要包括时域有限差分[5](FDTD)、有限积分(FIT)和有限元(FEM)等,FDTD 的优点是计算速度快和占用内存小,MIT 开发的电磁场仿真软件 MEEP 基于 FDTD 算法,可以用于生成器件结构并进行光学分析。

本文使用 MEEP 构建 GC 结构和 RC 结构的量子阱 FPA 三像元结构,并通过仿真探究两种结构在衍射极限下的抗光学串音能力,验证在衍射极限条件下,RC 结构替代 GC 结构的可行性。对 RC 结构,探究了实际工艺过程中影响 RC 结构的参数,如反射角、量子阱周期和刻蚀深度对其串音的影响。

1 器件建模

1.1 量子阱材料的参数计算

1.1.1 折射率

由于 GaAs 和 AlGaAs 具有良好的晶格匹配特性,因此本文选取 GaAs/$Al_xGa_{1-x}As$ 作为研究的焦平面材料,材料参数如表 1 所示。为了方便研究,忽略 GaAs 中的掺杂对其折射率的影响,根据 Adachi 等[6]的工作,$Al_xGa_{1-x}As$ 的折射率可以从以下方程得到:

$$n=\sqrt{A_0\left[f(\chi)+\frac{f(\chi_0)}{2}\left(\frac{E_0}{E_0+\Delta_0}\right)^{3/2}\right]+B_0} \tag{1}$$

$$f(x)=\frac{2-\sqrt{1-\chi}-\sqrt{1+\chi}}{\chi^2} \tag{2}$$

$$\chi=\frac{hc}{\lambda E_0} \tag{3}$$

$$\chi_0=\frac{hc}{\lambda(E_0+\Delta_0)} \tag{4}$$

$$A_0(x)=6.3+19x-fitted\ cons \tag{5}$$

$$B_0(x)=9.4-10.2x-fitted\ cons \tag{6}$$

$$E_0(x)=1.425+1.15x+0.37x^2 \tag{7}$$

$$E_0(x)+\Delta_0(x)=1.765+1.15x+0.37x^2 \tag{8}$$

式中,n 为材料折射率,h 为普朗克常数,c 为真空中的光速,E_0 为材料基本能隙,$E_0+\Delta_0$ 为自旋轨道分裂能级,x 为 $Al_xGa_{1-x}As$ 中 Al 的含量,λ 为入射电磁波的真空波长。

1.1.2 相对介电常数

有源区内的电场能量和相对介电常数相关,根据 Adachi[6],$Al_xGa_{1-x}As$ 的相对介电常数与 Al 的组分 x 的关系为(忽略掺杂对相对介电常数的影响):

$$\varepsilon = 12.9 - 3.12x \tag{9}$$

本文采取的入射波波长为 10.55 μm，将波长和 Al 组分 $x=0.18$ 和 $x=0.55$ 代入上述方程，得到 $Al_{0.18}Ga_{0.82}As$ 的折射率和相对介电常数分别为 3.32 和 12.38，$Al_{0.55}Ga_{0.45}As$ 的折射率和介电常数分别为 3.11 和 11.33。

表 1　长波量子阱材料参数

层数	λ/nm	材料	掺杂浓度/cm^{-3}
7	1 300	n-GaAs	1×10^{18}
6	45	$Al_{0.18}Ga_{0.82}As$	未掺杂
5	6	n-GaAs	7×10^{17}
	…	20 periods	
4	1 200	n-GaAs	1×10^{18}
3	300	$Al_{0.55}Ga_{0.45}As$	未掺杂
2	300	GaAs	未掺杂
1	650 000	GaAs	未掺杂

层 7 和层 4 的 n-GaAs 分别为顶部欧姆接触和底部欧姆接触，使用施主硅掺杂提供电子，层 6 与层 5 的 20 个周期 GaAs/$Al_{0.18}Ga_{0.82}As$ 为量子阱有源区，$Al_{0.18}Ga_{0.82}As$ 作为势垒，层 3 的 $Al_{0.55}Ga_{0.45}As$ 为腐蚀阻挡层，层 2 的 GaAs 为缓冲层，层 1 为 GaAs 衬底。

1.2　红外小光点测试系统仿真

本文使用 MEEP 仿真红外小光点测试系统，红外小光点方法将入射电磁波使用透镜聚焦在可以覆盖单个像元尺寸的艾里斑上进行测试，为了在 MEEP 中实现聚焦近似，可采用高斯光束作为光源，其入射波长为 10.55 μm，偏振方向与量子阱生长方向垂直，高斯光束的束腰方程为：

$$w_0 = \frac{\lambda}{\pi\theta} \tag{10}$$

式中，w_0 为束腰半径，λ 为真空电磁波波长，θ 为发散角，θ 可由下面方程表征：

$$\theta = \arctan\frac{D}{2L} \tag{11}$$

式中，D 为光源尺寸，L 为光源到焦平面的距离，设置 w_0 为像元尺寸的一半，即 7.5 μm，可得到光源到焦平面的距离应为 8.74 μm。得到的光源如图 1 所示，可以看到，高斯光束在衬底处形成的光斑和单个像元尺寸接近，近似于经透镜后形成的艾里斑。

使用上述光源对全内反射型结构和光栅耦合性结构的目标像元照射，并计算目标像元和邻近像元有源区内可以被量子阱吸收的电场能量。在本文中，串音的定义为两个相邻有源区的有效电场能量的比值，即：

$$Crosstalk = \frac{E^2_{\text{eff adj}}}{E^2_{\text{eff target}}} \tag{12}$$

式中，E_{effadj} 和 $E_{\text{efftarget}}$ 分别为邻近像元和目标像元的有效电场强度。

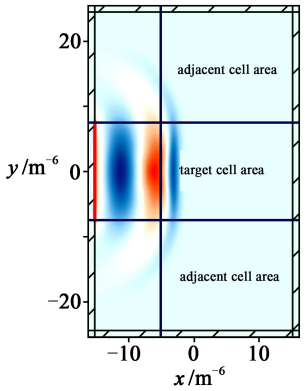


图 1　10.55 μm 波长的高斯光束

2　不同耦合结构的串音

两种结构的剖面图如图 2，3 所示。

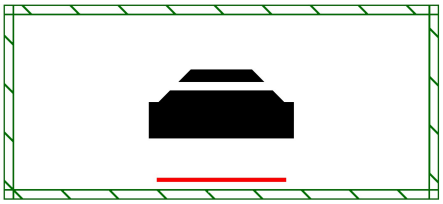


图 2　RC 结构单像元截面图

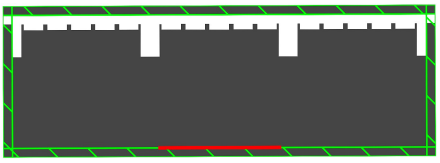


图 3　GC 结构三像元截面图

边界条件选择使用完美匹配层(PML)，图 2 和图 3 中的绿色区域即为 PML，PML 首先由 Berenger[7] 提出，PML 是一种和相邻介质阻抗完全匹配的有损耗介质，在实际中并不存在，外界电磁波进入 PML 之后可以被无反射地吸收，采用 PML 作为边界条件可用于模拟无限大空间的电磁场分布问题。图 2 中红线为入射光源，灰色区域为量子阱有源区，黑色区域为 GaAs，光源和衬底之间的白色区域为空气。GC 结构需要在像元顶部制备 5 个周期的二维光栅，反射耦合结构的反射角为 45°，并需要在斜台面上加入 Au 作为反射镜。图 3 为采用 GC 结构的三像元的截面图，白色区域为 Au。

对照射中心距为 5～15 μm 的像元得到的仿真

结果如图 4 所示。

从图 4 中的仿真结果可以看出，在 5～7 μm 和 8.5～10 μm 之间，RC 型结构表现出的抗串音能力强于 GC 型结构，但在 7～8.5 μm 和 10～12 μm 之间，GC 型结构表现出的抗串音能力优于 RC 型结构，而在 12 μm 之后的范围内，两种结构的抗串音能力相当。图 5 为两种结构内部的场分布图形。

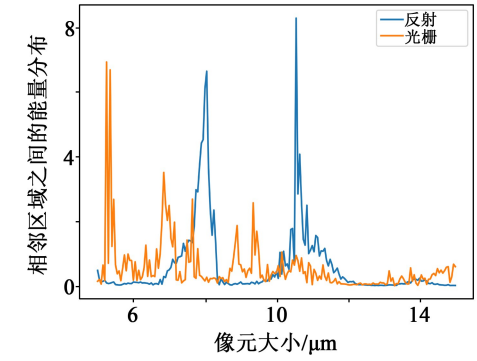
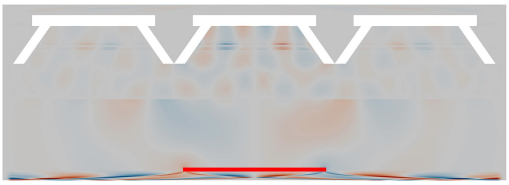
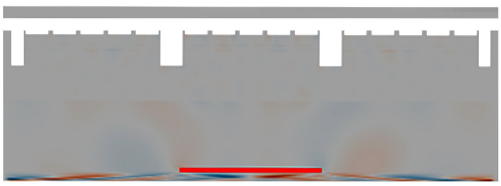


图 4 5～15 μm 两种结构的串音



(a) RC 结构



(b) GC 结构

图 5 15 μm 中心距 RC 结构和 GC 结构内部场分布

3 全内反射结构的串音

经过上述仿真之后，使用热熔光刻胶的工艺制备了全内反射所需的斜台面结构，并针对实际制备过程中产生的误差而导致的不同结构参数对串音的影响进行了仿真，包括刻蚀深度和反射角度的影响，并对量子阱周期对串音的影响进行了仿真。

3.1 刻蚀深度的影响

根据表 1 的参数，为了使有源区的载流子可以被外部有效地吸收，20 周期 GaAs/AlGaAs 的理想刻蚀深度应该在 2.7 μm，但实际工艺制备出来的刻蚀深度在 2.5～2.8 μm。

刻蚀深度对串音的影响来源于两个方面，一是可以改变器件结构来影响电磁场在器件内部的分布，进而影响光学串音，二是合适的刻蚀深度可以阻止载流子在横向电场作用下进入到邻近像元，这是对电学串音的影响。使用波长为 10.55 μm 的高斯光束作为辐射源，入射光的偏振方向和量子阱生长方向垂直，通过控制底部欧姆接触层的宽度来改变刻蚀深度，其变化范围为 0.45～0.95 μm，步长为 0.05 μm，对应的刻蚀深度为 2.45～2.95 μm，结果如图 6 所示。

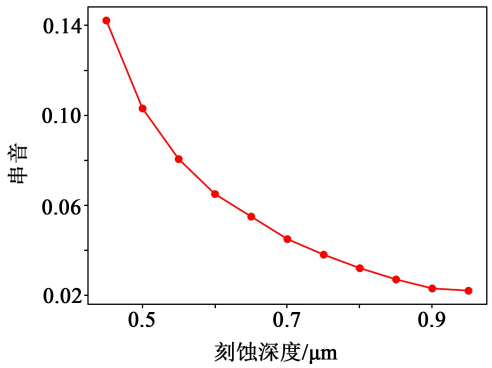


图 6 串音随刻蚀深度的变化

从图 6 中可以看到在角度不变的前提下，20 周期量子阱 FPA 的串音随着刻蚀深度的增加而减小，在刻蚀深度为 2.85 μm 左右时，串音的大小只有略高于 2%的水平，这是由于增加刻蚀深度会显著地提高像元之间的隔离效果，导致电磁波的大多数能量被限制在单个像元中而不会轻易进入到相邻像元，因此可以通过设计合理的刻蚀深度来增加 FPA 的抗串音能力。

3.2 量子阱周期的影响

根据已有研究结果，选取量子阱的仿真周期范围为 5～55 周期，间隔为 2 个周期，量子阱周期对串音的影响也是源于两个方面：一是量子阱周期的不同会改变器件高度，从而影响到像元对电磁场的限制作用，二是量子阱周期增多也会加大有源区的体积，增加像元区域内可以被量子阱吸收的能量，仿真结果如图 7 所示。

根据图 7 可知，小周期时，像元因为高度不够导致其限制电磁波能力不足，进而产生较大的串音。随着量子阱周期的增长，像元高度增加，器件的抗串音能力随之增强，但是邻近像元的有源区体积也随之增大。

由于有源区体积的变化，相邻像元可吸收的电磁波也会增加，器件的串音既和主像元限制电磁波的能力相关，也与邻近像元可吸收的电磁能量相关。

在 20～30 周期范围内串音增加，这是因为相邻

像元可吸收的电磁能量对串音的影响强于器件高度对串音的影响。而到了 30 周期以上的时候，器件高度对串音的影响占据主导地位，强于相邻像元吸收的电磁能量对串音的影响，因此串音呈现下降趋势。

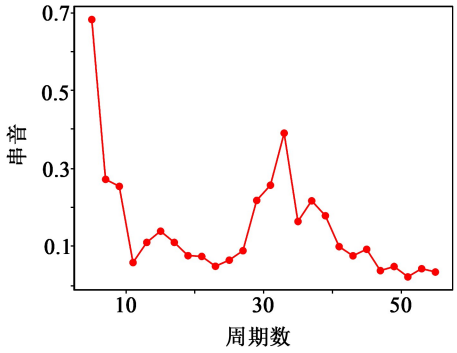


图 7　串音随量子阱周期的变化

可以根据仿真得到的器件内部场分布，合理地设置量子阱材料的参数使红外辐射尽可能多的汇聚在有源区。

3.3　反射角的影响

RC 结构最理想的反射角应为 45°，因为入射电磁波照射到 45°反射镜之后的传输方向和量子阱生长方向垂直，此时电场产生可被吸收的偏振分量，而且经过反射的电磁波在碰到第二个金属反射镜时再次经过 45°反射后会接触到衬底，在衬底处被反射的部分会因为重复之前的轨迹被限制在单个像元中，不易进入到邻近像元。但在实际的器件制备过程中，器件的反射角度不容易控制在理想的 45°角，根据工艺结果，其角度大约在 35°～55°的范围内，因此本文针对上述反射角范围进行了仿真，步长为 2.5°。

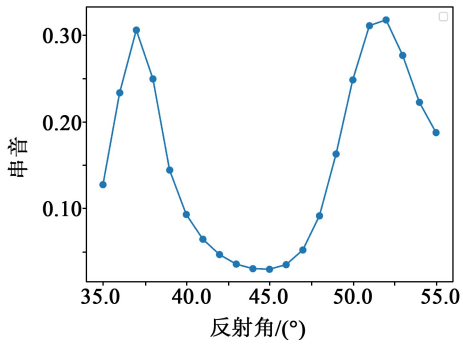


图 8　串音随反射角的变化

由图 8 可知，器件在带有 45°反射角时因为光路轨迹被限制在单个像元内，所以抗串音能力最强，在 5%以下，而器件在 35°～40°和 50°～55°之间的抗串音能力较差，在这两个角度条件下，器件对入射电磁波的限制能力较弱，电磁波很容易被反射到衬底处并发生多次反射进入邻近像元中。因此，使用 RC 结构制备 FPA 时，为了得到良好的抗串音效果，应尽可能地使反射角在 45°附近。

4　结论

本文对全内反射型结构和金属光栅耦合型结构的量子阱红外焦平面阵列器件的光学串音进行了仿真，验证了在 12～15 μm 范围内，两种结构的抗串音能力基本一致，而在尺度更小的 5～12 μm 范围内时，RC 结构和 GC 结构的抗串音能力在特定的尺寸调节下各有优劣。针对 RC 结构，探究了反射角、量子阱周期和刻蚀深度对其串音的影响，后续需开展两种结构的电学串音仿真，并对制备的焦平面进行测试验证。

参考文献：

[1] Wang X, Zhou L Q, Tan Z. Development progress of refrigerated large area array infrared detector[J]. Infrared, 2019, 40(12): 1-9.

[2] Chen W Y, Li D S, Ji Y L, et al. Numerical simulation of small cell HgCdTe infrared focal plane crosstalk[J]. Infrared Technology, 2018, 40(4): 309-315.

[3] Chen C J, Choi K K, Tidrow M Z, et al. Corrugated quantum well infrared photodetectors for normal incident light coupling [J]. Appl. Phys. Lett., 1996, 68: 1446-1448.

[4] Zhu X B, Li M, He Y J, et al. Photoelectric performance simulation of small pixel InSb infrared focal plane device[J]. Aviation Weapons, 2022, 29(3): 61-65.

[5] Yang S C, Chen Z Z. Research progress of finite difference method in time domain and its application in EMC[J]. Safety and Electromagnetic Capacitance, 2022, 178(5): 9-15.

[6] Adachi S. GaAs, AlAs, and $Al_xGa_{1-x}As$: Material parameters for use in research and device applications[J]. J. of Appl. Phys., 1985, 58: R1-R29.

[7] Berenger J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. J. of Computational Phys., 1994, 114(2): 185-200.

作者简介：

邵恩善(1998－)，男，山东省青岛市人，硕士研究生，主要研究方向为小间距量子阱红外焦平面阵列器件；

李向阳(1969－)，男，博士，研究员，博士生导师，主要从事窄禁带半导体红外光电探测器和宽禁带紫外探测器研究。