

## GaAs/AlGaAs 量子阱长波 10.55 $\mu\text{m}$ 红外焦平面探测器

李向阳, 李 宁, 许金通, 储开慧, 徐国庆, 王 玲, 张 燕, 朱龙源, 王继强, 陆 卫

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘 要:** 利用 GaAs/AlGaAs 量子阱结构, 研制了像元规模为  $640 \times 512$ 、中心响应波长在  $10.55 \mu\text{m}$  附近的红外焦平面阵列器件, 与 50 K 集成式制冷机耦合后, 测试了相关性能, 其等效噪声温差达到 22.5 mK。焦平面组件通过了初步的开关机试验以及热真空试验后, 表现良好。考虑封装冷屏导致在面源黑体测试时产生的焦面照度不均匀问题进行了数值计算, 并分析了与近似解析计算的误差, 表明当  $F$  数变小时应当采用数值计算, 并认为探测器测试的非均匀性主要由照度不均匀贡献。针对  $10.55 \mu\text{m}$  量子阱探测器, 利用开源的 MEEP FDTD 软件, 进行了近场耦合的光场分布计算, 计算结果表明目前的结构参数在光衍射方面是比较接近优化的。

**关键词:** 量子阱红外焦平面探测器; 长波红外; 光耦合优化

**中图分类号:** TN21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0103008

## GaAs/AlGaAs QWIP IRFPA for 10.55 $\mu\text{m}$ long wavelength

Li Xiangyang, Li Ning, Xu Jintong, Chu Kaihui, Xu Guoqing, Wang Ling, Zhang Yan,  
Zhu Longyuan, Wang Jiqiang, Lu Wei

(Institute of Shanghai Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:**  $640 \times 512$  Quantum Well Infrared Photo-detector(QWIP) long wavelength infrared(LWIR) focal plane arrays(FPA) were made by using GaAs/AlGaAs quantum well structure. The response spectra were at  $10.55 \mu\text{m}$ . Integrated with rotation sterling cooler which gave a temperature of 50 K, the FPA was measured to find the results that NETD was about 22.5 mK. The FPA assembly kept good performance after the switch-on-off cycling test and thermal vacuum test. The illumination non-uniformity of the focal plane with a cold shield was calculated with a numerical method. The results were compared with the approximate analytic method. It is shown that numerical method should be used for small  $F$ -numbers. Thus, the measured non-uniformity is believed to be dominated by the illumination non-uniformity. By using the MEEP FDTD software, calculation about the near-field photo-coupled electrical-field energy were designed and results show that current QWIP structure parameters are near optimized in term of optical diffraction.

**Key words:** QWIP FPA; long wavelength infrared; optical couple optimization

收稿日期: 2019-10-05; 修订日期: 2019-11-15

作者简介: 李向阳(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事窄禁带半导体红外探测器和宽禁带半导体紫外探测器等方面的研究。Email: lixy@mail.sitp.ac.cn

## 0 引言

长波红外焦平面探测器是红外成像探测中的关键元器件之一。利用 8~14  $\mu\text{m}$  的大气透射窗口的长波红外进行成像,具有对室温目标敏感的特点,因此在夜视、遥感、测温等应用中有重要作用。例如,在地球遥感应用中,人们通常在这个波段里设置两个通道进行差分测温,通常称之为分裂窗,即:10.3~11.3  $\mu\text{m}$  和 11.5~12.5  $\mu\text{m}$ 。无论是气象、陆地,还是海洋遥感观测,几乎都有这种分裂窗配置。

长波红外由于光子能量小,~0.1 eV,背景辐射强,因此高灵敏探测往往采用制冷型的光子探测方式。尽管近年来非制冷长波探测的焦平面器件发展迅速,探测性能也不断提高,但是在快速成像、窄带探测等应用中,仍需要利用半导体光电探测机理的所谓光子型成像探测器件。典型的有碲镉汞长波红外探测器、二类超晶格探测器以及量子阱红外探测器(Quantum Well Infrared Photo-detector, QWIP)。其中量子阱与前面两种不同,由于量子阱具有子能带跃迁(非带间跃迁)的特征,因此量子阱的响应光谱具有窄带的特点,同时也决定了其外量子效率较低。利用半导体异质材料能带工程的方法,制备量子阱结构,通过设计和制备合适的势垒和势阱,能够得到

响应长波红外波段的红外探测器;由于 GaAs 和 AlGaAs 材料体系具有完美的晶格匹配特征,为制备大规模高性能红外焦平面探测器提供的可能。

自从 1987 年 Levine 等人发表的第一篇 QWIP 红外探测器的文章以来<sup>[1]</sup>,量子红外探测器得到了长足的发展。美国陆地卫星 LandSat 8 上的热红外遥感仪器就采用了量子阱红外焦平面探测器进行推扫成像<sup>[2]</sup>。在具有较长的积分时间,特别是大面阵凝视应用中,由于量子阱红外探测器具有较好的均匀性以及工艺成熟性,因此具有一定的应用前景。中国科学院上海技术物理研究所较早地开展了量子阱红外探测器的研究,取得了一定的进展<sup>[3]</sup>。近期又开展了长波 640×512 红外焦平面探测器的研制,获得了 50 K 工作温度下等效噪声温差 22 mK 的集成制冷机和杜瓦的焦平面探测器组件。文中将对器件研制情况和测试结果进行初步讨论。

## 1 制备工艺

### 1.1 材料参数的设计

采用 GaAs/AlGaAs 材料体系,利用分子束外延的方法在 4 in(1 in=2.54 cm)的 GaAs 衬底上生长了 50 个周期的量子阱红外探测器结构。其基本结构如表 1 所示,利用 AlGaAs 层做势垒, GaAs 层做势

表 1 长波红外量子阱材料的基本结构  
Tab.1 Material structure of LW QWIP

Layer	Thickness/nm	Material	Description	Doping conc./ $\text{cm}^{-3}$
6	1 800	n-GaAs	Cap layer	$2.5 \times 10^{17}$
5	50	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	Barrier, $x=0.22$	Undoped
4	~6	n-GaAs	Quantum well	Si doped $(1.0-1.5) \times 10^{17}$
3	50	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	Barrier	Undoped
2	1 200	n-GaAs	Bottom	$2.5 \times 10^{17}$
1	300	$\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$	Etch stop layer	$2.5 \times 10^{17}$
0	500 $\mu\text{m}$	4" s.i. GaAs	Substrate	-

阱,用施主硅掺杂 GaAs 层提供势阱中的电子。此外,还有上下的重掺杂的欧姆接触层和背减薄用的腐蚀阻挡层等。

生长好的材料事先经过光学参数测试和单元器件流片测试,确认响应的峰值基本在 10.55  $\mu\text{m}$  附近。然后,材料投入焦平面芯片工艺流程。

## 1.2 芯片制备工艺

量子阱探测器芯片工艺中,4 in GaAs 材料首先是制备光刻要求最高的衍射光栅。针对目前笔者所在课题组已有的 640×512 直接注入的读出电路,设计像元间距为 25 μm,其中衍射单元刻蚀边长为 2.5 μm,而两个衍射单元之间间隔为 1.0 μm,在每个像元中排布了 5×5 个衍射单元。具体如图 1 所示。

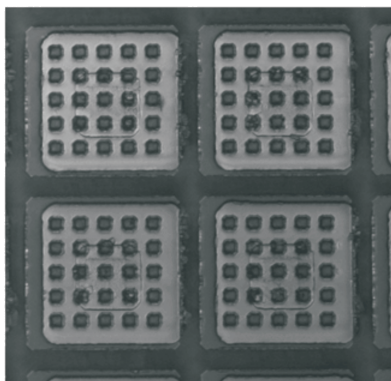


图 1 长波红外量子阱芯片照片(部分区域)

Fig.1 Photo of LW QWIP chip (partial area)

光栅采用等离子体刻蚀的方法,在 SenTech ICP-RIE SI500 型感应耦合等离子体刻蚀系统中完成。采用 Ar, BCl<sub>3</sub> 和 Cl<sub>2</sub> 为工作气体,对帽层 GaAs 材料进行刻蚀;同时利用激光干涉监测装置,实时监控刻蚀深度,确保最终刻蚀深度在 1.1 μm 左右。

完成光栅制备后进行 AuGe/Ni/Au (100/20/100 nm)欧姆电极制备,采用电子束蒸发的方法制备欧姆电极并采用快速热退火工艺进行合金化改善欧姆接触特性。然后,用离子束溅射的方法制备 Cr/Au (20 nm/300 nm)的反光层。最后,利用 ICP 刻蚀方法进行像元间隔离的刻蚀。刻蚀缝宽为 2 μm,刻蚀槽深度为~4.6 μm,使得隔离槽刚好达到背面的 N<sup>+</sup>层。隔离槽采用 SiN<sub>x</sub> 钝化以减少表面侧面漏电。

芯片单元在生长一层 UBM 层之后,利用热蒸发的方式制备约 8 μm 高的 In 柱,然后经过划片后,单个芯片与读出电路进行混成倒焊互连;互连后,进行钢柱的充胶加固;然后进行 GaAs 衬底的减薄。首先用机械磨抛的方式进行减薄,减薄至剩余 10 μm,再采用选择比高的化学溶液进行腐蚀,将 GaAs 腐蚀掉,最终露出腐蚀阻挡层。最后用磁控溅射制备 ZnS

抗反射层。

## 1.3 封装和测试

由于量子阱长波红外探测器要求的工作温度较低,考虑到体积质量等因素,采用了武汉高芯的集成式旋转制冷机 RM079,焦面温度设定在 50 K。经测试,焦面控温精度可以在 0.3°以内。芯片采用 F 数为 2 的防辐射冷屏,冷屏开口处没有设置冷滤光片。图 2 是制冷机组件的实物照片。



图 2 制冷机组件照片

Fig.2 Diagram of cold shield assembly

## 2 结果分析及有关可靠性试验

### 2.1 关于焦面照度的分析计算

由于冷屏的设置是考虑成像系统的,然而课题组在器件测试的时候采用的是面光源充满冷屏开口视场的照明方式,两者有一定的区别,这就造成了明显的焦面照度不均匀问题。由于量子阱焦平面探测器具有很好的均匀性,性能良好的焦平面器件,其主要非均匀性是光照不均匀导致的。由于这种非均匀性并不是器件工艺或者性能的差异导致的,因此在实际测试时应当考虑予以修正。如果采用 cos<sup>4</sup>θ 进行修正是一个很好的解析近似,然而由于几何关系并不能很好地满足小面元无穷远近似,因此要获得精确数据需要进行数值计算。考虑到这个计算具有很好的对称性,因此采用一个二重数值积分即可解决这个问题。采用目前较流行的科学计算 python 语言导入含有二重积分的科学数值计算包 Scipy,可以较为精确地计算探测器芯片像元焦面上照度的不均匀性。参考程序如图 3 所示。

```

1 # 探测器焦面照度不均匀性计算
2 from scipy import integrate
3 from math import cos, pi, sqrt, ceil, floor
4 from statistics import stdev, mean
5 d = 25.7 # 冷屏开口直径, 单位um
6 phi_A = 13.27 # 冷屏开口的直径
7 pitch = 25.0/1000.0 # 像元中心距, 单位um
8 length=640 # 探测器阵列(正整数)之长度
9 width=512 # 探测器阵列之宽度
10 def cal_lum(delta):
11     f=lambda y,x:((d**2)*y)/((d**2*delta**2+y**2-2*delta*y*cos(x))**2)
12     callum,abserr=integrate.dblquad(f,0.0,phi_A/2.0,lambda x:0,lambda x:2.0*pi)
13     return callum
14 lum0=cal_lum(0.0)
15 largest=ceil(0.5*sqrt(length**2+width**2)+1)
16 lum_calc=[]
17 for i in range(largest):
18     lum_calc.append(cal_lum(i*pitch)/lum0)
19 def find_lum(x):
20     i=floor(x)
21     return lum_calc[i]+(x-i)*(lum_calc[i+1]-lum_calc[i])
22 lum_array=[]
23 for x in range(length):
24     for y in range(width):
25         lum_array.append(find_lum(sqrt((x-length/2.0)**2+(y-width/2.0)**2)))
26 print("光照非均匀性(%)", stdev(lum_array)/mean(lum_array)*100)
    
```

图 3 探测器焦面照度不均匀性的计算程序

Fig.3 Numerical calculation program for non-uniformity of illumination in focal plane

比较了用以上程序计算的非均匀性和用解析计算的结果,两者在不同冷屏开口大小明显不同,并且  $F$  数越小,误差越大。结果如图 4 所示。图中所谓的“短边”和“长边”,是指冷屏开口大小,长边大冷屏是指冷屏开口较大在芯片上的垂直投影圆圈直径正好等于方形焦平面光敏阵列长方形区域的长边,即投影圆圈与短边相切。而短边小冷屏是指直径等于短边。显然,长边大冷屏的光照不均匀度要小一些。请注意,这里只是计算的需要,并不代表长边冷屏成像效果更优越。笔者采用的冷屏导致的焦面光照不均匀性数值计算结果为 5.53%。

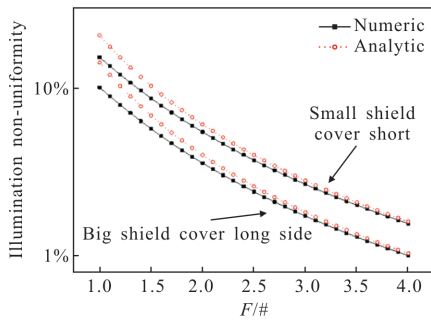


图 4 数值计算与  $\cos^4\theta$  解析计算之间差别的比较图

Fig.4 Comparison between the numerical calculation results and approximately analytic  $\cos^4\theta$

考虑到以后探测器研制的规模越来越大,  $F$  数越来越小,这项修正需要认真对待。精确的修正方法是针对每一个像元的照度进行修正,这种方法的缺点是计算量稍大。另外一个简单的方法就是,假设器件的非均匀性与光场的非均匀性不相关,采用平方相减开

根号的方式得到器件的非均匀性。这里就引入一个有趣的问题,会不会有测试得到的器件非均匀性结果比光场分布的非均匀性还小。实际上笔者发现是有的,而出现这种情况的器件是却性能不好的,往往暗电流大。笔者发现这是由性能较差的量子阱器件的暗电流受温度影响较大而导致测试结果异常。

2.2 测试结果分析

利用步进式傅里叶干涉仪测试方法,测量了器件的响应光谱,如图 5 所示。响应光谱在短波段的下落与长波段的下落表现出非对称特性,显示器件的工作模式可能倾向于 B-to-QB 模式(见表 2)。

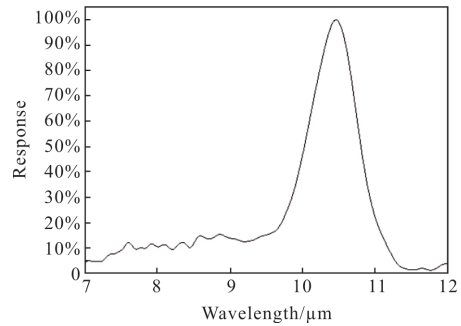


图 5 器件的响应光谱

Fig.5 Response spectra of the device

表 2 编号 OV16 的焦平面器件最终测试结果

Tab.2 Some final-test results of FPA assemble labeled OV16

Parameters	Measured results
Array size	640x512
Pitch/ $\mu\text{m}$	25
Response spectrum range/ $\mu\text{m}$	10–11
$F$ -number	2
$D^*_N/\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$	$2.8 \times 10^{10}$
NETD/mK	22.5
Frame rate/Hz	10
Number of output	1
Blind pixel rate	0.177%
Non-uniformity	6.53% (un-corrected)
FPA operating temperature/K	50
Weight/kg	0.64
Power	10.39 W@steady state; 17.71 W@max
Cooler operating voltage/V	28

### 2.3 有关可靠性试验情况

在增强了外壳导热措施的情况下,进行了模拟太空工作的热真空试验。在真空度优于  $10^{-5}$  Pa 的情况下,在环境温度为  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  的条件下,进行了开关机工作试验。两个温度点下的制冷机焦面温度变化及制冷机工作电流曲线如图 6 所示。试验表明,集成了电控的制冷机在高真空中工作正常。

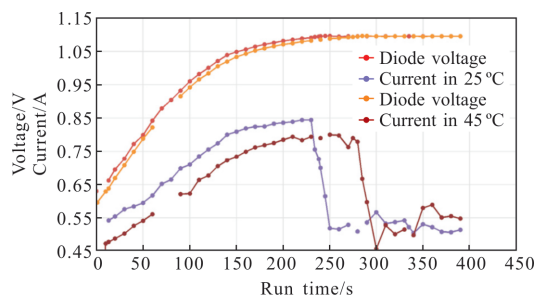


图 6 制冷机在真空中工作的两次降温实时监测曲线

Fig.6 Two cool down curves under different temperature in high vacuum

## 3 关于 $10.55\text{ }\mu\text{m}$ 量子阱芯片结构优化的讨论

### 3.1 量子阱探测器的响应特点

由于量子阱红外探测器的核心机制采用了二维电子气结构的量子跃迁,虽然在量子阱中电子气具有电子密度并不很低,但是仍然无法与本征吸收的体密度相比拟,因此入射到焦面上的光能量的吸收系数并不高。这就决定了光能量在探测器内部存在多次反射衍射的特质。事实上,由于只有垂直于量子阱(电子气)二维平面的光场分量  $E_z$  才能够得到有效吸收,贡献出电子的能级跃迁,并发生电子的迁移,贡献可以探测的信号,所以量子阱面阵探测器都必须包含有光场调控的结构。衍射光栅的存在正是起到将正入射的  $E_x, E_y$  方向振动的光场衍射成具有  $E_z$  光场分量。从远场的角度来看,就是将正入射光线衍射偏折到一个斜的出射方向,因此笔者可以直观地从光栅衍射理论考虑一些问题。但是毕竟光栅衍射理论考虑的都是远场光线的出射效果,并不是笔者真正追求的目标。笔者需要关心在衍射光栅附近,是不是有更多的光场能量可以转换成  $E_z$  分量,可以被量子阱内的二维电子气所利用。这就需要考虑光场与物质近场相互作用,而近年来发展的 FDTD 计算方法为笔者提供了必要的工具。

### 3.2 利用 MEEP 计算 GaAs 为基材的探测器结构内光场分布

光与物质相互作用情况研究,可以通过求解麦克斯韦方程组来进行数值计算。其中,有限时域差分计算经过多年的发展已经比较成熟了。市面上有很多的商业软件可以应用,也有不少开源的、自由软件等可以使用。笔者采用了 MIT 的 MEEP 软件<sup>[4]</sup>进行了这个问题的仿真计算。

MEEP 软件的安装和使用,可以参考其说明书网站“meep.readthedocs.io”。调用其计算引擎可以使用 C++、Scheme 和 Python。因为在 MEEP 的 Python 模块中有事先定义好的多种物质参数,课题组就选其进行代码编写。脚本编写的主要步骤就是设计一个介质的形状(geometry),加上完美匹配层(PML),在选定的某位置上加上一个真空中的波长为  $10.55\text{ }\mu\text{m}$  的激发源(sources),就可以在选定的分辨率下计算了。计算中,采用了二维网格,期间,可以输出需要的计算结果。通过计算可以看出,垂直分量在电磁波入射初期主要存在于侧面和近金属表面,经过一段时间的干涉和衍射,场强分布基本稳定,但是仍然集中于近金属表面。如图 7 所示。

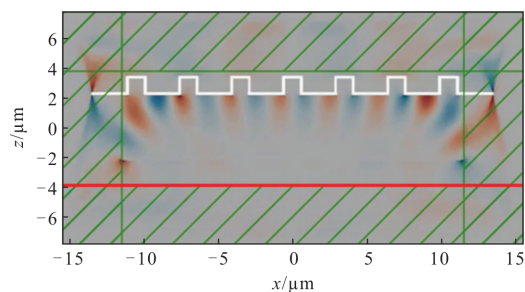


图 7 MEEP 计算的光场分布,其中红线为激发源(离开 GaAs 表面  $\sim 1\text{ }\mu\text{m}$ ),白色(城墙垛口状)线为光栅金属,绿色阴影区域为 PML 层,具有颜色深度分布的红蓝色代表  $E_z$  分量正负幅值

Fig.7 Optical field distribution calculated with MEEP where the red line is the source and white line is metal of grating and green lines shadow area is PML layer and colorful area with red/blue means  $E_z$  amplitude with positive and negative value

笔者固定了单元的尺寸,计算了不同量子阱厚度、刻蚀台面深度、以及台面刻蚀大小的影响。利用以上的二维网格,在整个量子阱周期结构的区域内(即不包含刻蚀区域),将垂直量子阱方向的电场能

量数值进行积分,并除此时的 GaAs 厚度进行了归一。扫描不同的 GaAs 厚度和刻蚀深度的变量,进行了大量的计算。计算程序参考文中附件。在刻蚀光栅占空比保持 1:1 的情况下,其计算结果如图 8 所示。图 8 中,五角星的位置是目前工艺控制的状态,可以认为是比较优化的一个位置。

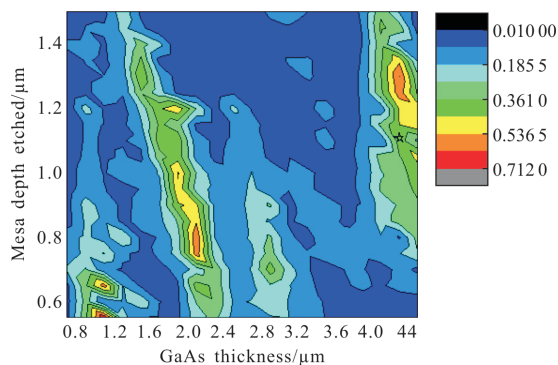


图 8 计算的场强能量平均密度随工艺参数的分布图

Fig.8 Distribution map of  $E_z$  energy density with device parameters

下一步优化计算可以考虑更加精确的三维仿真,以及将量子阱的吸收特性细化到计算模型中来。这样的结果再结合实际工作,可以预期将对量子阱探测器的性能优化提供更好的理论支撑。

## 4 结论

利用 GaAs/AlGaAs 材料研制了工作于 50 K 的

640×512 量子阱长波 10.55  $\mu\text{m}$  红外焦平面探测器,对集成制冷机的探测器性能进行了测试分析, $F/2$  冷屏下,等效噪声温差可以达到 22.5 mK。直接测量得到的非均匀性主要来源是受冷屏形状的决定性控制。采用 MEEP 软件对量子阱探测器内光场进行了计算,分析了 GaAs 厚度和刻蚀台面的对衍射效果的影响,为进一步提高 10.55  $\mu\text{m}$  长波红外量子阱焦平面探测器的量子效率提供依据。

## 参考文献:

- [1] Levine B F, Choi K K, Bethea C G, et al. New 10  $\mu\text{m}$  infrared detector using intersubband absorption in resonant tunneling GaAlAs superlattices[J]. *Appl Phys Lett*, 1987, 50: 1092.
- [2] Jhabvala M, Choi K, Waczynski A, et al. Performance of the QWIP focal plane arrays for NASA's Landsat Data Continuity Mission [C]//SPIE, Infrared Technology and Applications XXXVII, 2011, 8012: 80120Q.
- [3] Zhou Xiaohao, Li Ning, Lu Wei. Progress in quantum well and quantum cascade infrared photodetectors in SITP [J]. *Chinese Phys B*, 2019, 28(2): 027801. (in Chinese)
- [4] Oskooi A, Roundy D, Ibanescu M, et al. MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method[J]. *Computer Physics Communications*, 2010, 181: 687-702.