

## 硅化铂红外焦平面探测器性能改进技术分析

康冰心<sup>1</sup>, 蔡毅<sup>1,2</sup>, 王岭雪<sup>1</sup>, 薛唯<sup>1</sup>, 高岳<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;

2. 中国兵器科学研究院, 北京 100089)

**摘要:** 硅化铂红外焦平面探测器具有响应光谱宽、规模大、均匀性好、时间稳定性高、制造成本低等优点, 在多/宽光谱成像、激光探测、天文观测、医疗检测等领域具有应用潜力, 但 NETD 100 mK 的灵敏度对其广泛应用有一定的限制。文中从该探测器的量子效率和填充因子两方面总结和分析了国内外的改进技术, 重点分析了光腔结构、多孔硅结构、重掺杂 P<sup>+</sup> 和合适硅化铂膜厚提高量子效率的机理, 并定量比较了提升幅度: 多孔硅结构提升幅度最大, 在波长 4 μm 处的量子效率可达 27%; 相比内线转移 CCD, 电荷扫描器件、曲流沟道 CCD 和混合读出结构均能改善填充因子, 其中混合读出结构的填充因子可提高为 80%。微透镜阵列能将填充因子提高到 85% 以上。

**关键词:** 硅化铂红外焦平面阵列; 量子效率; 填充因子; 读出电路; 微透镜阵列

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0742-07

## Technologies of performance improvement for platinum silicide infrared focal plane array

Kang Bingxin<sup>1</sup>, Cai Yi<sup>1,2</sup>, Wang Lingxue<sup>1</sup>, Xue Wei<sup>1</sup>, Gao Yue<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. China Research and Development Academy of Machinery Equipment, Beijing 100089, China)

**Abstract:** Platinum silicide infrared focal plane array is characterized by several advantages such as wide spectral range, large array, good uniformity, high time stability and low cost. It shows application potential in multispectral/wide-spectrum imaging, laser detection, astronomical observation and medical monitor. However, 100 mK's sensitivity (NETD) is the main limitation on wide application. The technologies of improving performance of platinum silicide infrared detector were summarized. Optical cavity structure, PtSi/porous Si schottky barrier, doping-spike P<sup>+</sup> and suitable PtSi film thickness were effective measures to increase quantum efficiency. Porous silicon structure improved quantum efficiency as much as 27% at 4 μm wavelength. Comparing with interline transfer CCD, the fill factor of the FPAs was raised up to 50%–80% using charge sweep device, meander channel CCD or hybrid schottky structure. In addition,

收稿日期: 2013-07-11; 修订日期: 2013-08-15

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20131101110024)

作者简介: 康冰心(1984-), 女, 博士生, 主要从事红外探测器、红外成像等方面的研究。Email: binxin1985@163.com

通讯作者: 王岭雪(1973-), 女, 副教授, 博士, 主要从事红外成像、图像处理、红外光谱方面的研究。Email: neobull@bit.edu.cn

导师简介: 蔡毅(1959-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事红外技术、光电系统总体的研究。Email: caiy69@163.com

microlens array was the most efficient method to augment the fill factor higher than 85%.

**Key words:** platinum silicide infrared focal plane array; quantum efficiency; fill factor; readout circuit; microlens array

## 0 引言

硅化铂(PtSi)红外焦平面探测器是硅化铂红外探测器和硅(Si)读出电路相结合的产物。硅化铂红外探测器与标准 Si 工艺兼容,具有以下优点:(1) 容易制作大规模列阵,如 4 096×4 096;(2) 均匀性好,非均匀性通常小于 1%;(3) 响应光谱范围宽,如 1~5 μm;(4) 制造成本低;(5) 时间稳定性高,如 24 h<sup>[1]</sup>。20 世纪 80~90 年代硅化铂红外焦平面探测器常用于 SWIR(1~3 μm)和 MWIR(3~5 μm)波段的军事红外探测<sup>[1]</sup>,如红外前视、红外制导、空中侦察和红外预警等。硅化铂红外探测器的最大不足在于量子效率低,典型值仅为 0.1%~1%,随着量子效率可达 50%~80%、覆盖各个红外波段的碲镉汞(HgCdTe)红外焦平面探测器的迅速发展,硅化铂红外焦平面探测器的应用空间面临越来越严峻的挑战。但是,响应光谱宽、时间稳定性高和均匀性好等特点仍使得硅化铂红外焦平面探测器在多光谱/宽光谱成像、激光探测、天文观测、医疗检测等领域具有应用潜力。2013 年日本地球科学联盟会议上,Takehiko Satoh 使用 1 024×1 024 硅化铂红外焦平面探测器研制了近红外四波段成像仪(J 波段:1.1~1.4 μm;H 波段:1.5~1.8 μm;K 波段:2.0~2.4 μm;中波红外波段:3.4 μm),用于观察木星的红外极光<sup>[2]</sup>;英国威尔士大学利用硅化铂 CMOS 制冷探测器制成的红外辐射计(工作波段 3.4~5 μm)监测激光皮肤治疗时的热压力;与此同时,基于硅化铂肖特基势垒的新型探测器的理论研究也没有停滞,2008 年,美国的 M.P.lepselter 在硅与铂族金属铑(Rh)或铂的硅化物间嵌入 GeSi 合金制造出了高速和波长可调的肖特基势垒红外探测器,并提出铑可用于开发非制冷 RhSi/n-Si 肖特基势垒探测器;2011 年俄罗斯固体红外设备电子中央研究院 V. G. Ivanov 等人提出远红外和太赫兹肖特基势垒探测器的设想,制冷温度降低至 12 K 时电子与电子之间发生非弹性碰撞,电子转换为声子的弛豫时间变长,使辐射能量小于势垒高度的入射光也有可

能产生信号电流,从而将响应波长扩展至远红外或太赫兹波段<sup>[3]</sup>。

为了挖掘硅化铂红外焦平面探测器理论研究和工程应用的潜力,文中主要从量子效果和填充因子两方面分析总结了国内外提升硅化铂探测器性能的技术。

## 1 硅化铂红外焦平面探测器

硅化铂红外焦平面探测器列阵制造采用标准的 Si 工艺设备和工序,Pt 在 2 000 °C 高温下蒸发淀积到几英寸以外的 Si 集成电路上。当 Pt 接近 Si 时,Pt 蒸汽已冷却到几百摄氏度,形成十几 Å(1 Å=0.1 nm)厚的硅化铂化合物薄膜,然后与 p 型 Si 衬底接触形成肖特基势垒二极管列阵。

硅化铂红外探测器在生产过程中除了 Pt 蒸发处理外,其余均采用标准 Si 工艺,利用成熟的 Si 甚大规模/超大规模集成电路(VLSI/ULSI)技术,所以硅化铂红外焦平面探测器的均匀性好、面阵大,还可与读出电路集成在同一 Si 衬底上,制成单片集成式的焦平面探测器;由于对红外辐射的吸收取决于金属而不是半导体,所以硅化铂探测器具有良好的光谱响应均匀性;由满足形成光电流光子能量的公式(1),硅化铂红外焦平面探测器的探测波长范围为  $1.1 \mu\text{m} < \lambda < \frac{1.24}{\psi}$ ,若势垒高度  $\psi$  从 0.27 eV 改进到 0.21 eV,波长可扩展到 6 μm;但是,硅化铂层对红外光子的吸收很弱,因为只有一小部分载流子被直接发射到块状 Si 的激活收集区,其他的被电极壁垒、晶粒边界、硅化铂晶格和接近费米能级的载流子所散射,所以低吸收比导致硅化铂红外焦平面探测器低的量子效率。

单个硅化铂探测器收集到的电子数  $N_e(T_s)^{[4]}$ :

$$N_e(T_s) = \left( \frac{1}{4F^2 + 1} \right) \alpha_{ff} A_e t_f \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_\lambda(\lambda, T_s) d\lambda \quad (1)$$

式中: $A_e$  为像元面积; $\alpha_{ff}$  为列阵填充因子; $t_f$  为积分时间; $F$  为镜头  $F$  数; $S_\lambda(\lambda, T_s)$  为目标辐射光子转换成的光电子数。

$$S_\lambda(\lambda, T_s) = \frac{2\pi c \eta}{\lambda^4 \left( \exp\left(\frac{hc}{\lambda k T_s}\right) - 1 \right)} \quad (2)$$

式中:  $k$  为波耳兹曼常数;  $c$  为光速;  $\lambda$  为波长;  $T_s$  为目标温度;  $\eta$  为量子效率。

由公式(2)、(3)得到  $N_e(T_s)$  的最终表达式为:

$$N_e(T_s) = \left( \frac{2\pi c}{4F^2 + 1} \right) \alpha_{ff} \eta A_e t_f \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{1}{\lambda^4 \left( \exp\left(\frac{hc}{\lambda k T_s}\right) - 1 \right)} d\lambda \quad (3)$$

增加像元面积  $A_e$  或积分时间  $t_f$ 、减小镜头  $F$  数可以提高像元收集到的电子数,然而,这些因素又会影响系统的空间和时间分辨力。因此,从探测器方面考虑,主要是增大硅化铂红外探测器的量子效率  $\eta$  和填充因子  $\alpha_{ff}$ , 国内外多年来对提高硅化铂红外焦平面探测器量子效率和填充因子做了许多研究。

## 2 量子效率改进技术

量子效率与肖特基势垒探测器内光电发射的整个过程相关,这些过程包括:金属光吸收、热电子散射、大部分载流子发射进入半导体。量子效率  $\eta$  是探测器光吸收效率  $\alpha$  与受激空穴发射效率  $\eta_e$  的乘积:

$$\eta(h\nu) = \alpha(h\nu) \eta_e(h\nu) \quad (4)$$

式中:  $h\nu$  为入射光子能量;  $\alpha$  与电极几何结构和电极膜厚有关,对于给定探测器,  $\alpha$  为常量,记为  $C_1$ ;  $\eta_e$  与势垒高度  $\psi$  有关;  $\eta$  可写为:

$$\eta = \frac{C_1 (h\nu - \psi)^2}{h\nu} \quad (5)$$

$\psi$  与截止波长  $\lambda_c$  的关系为:

$$\psi = \frac{1.24}{\lambda_c} \quad (6)$$

由公式(5)和(6)得出硅化铂红外焦平面探测器的光谱响应:

$$\mathcal{R} = \frac{1.24 C_1 (1 - \lambda / \lambda_c)^2}{\lambda} \quad (7)$$

由于量子效率与探测器光吸收效率  $\alpha$  和受激空穴发射效率  $\eta_e$  有关,通过优化器件结构,可以提高探测器对红外入射的吸收,即提高光吸收效率  $\alpha$ ; 通过扩展截止波长来减小势垒高度,以及合理沉积硅化铂膜厚,可以提高受激空穴发射效率  $\eta_e$ 。

### 2.1 提高探测器对红外入射光的吸收效率 $\alpha$

为提高红外入射光的吸收效率  $\alpha$ , 率先被采用的是带有抗反射层的硅化铂膜光腔结构,如图 1 所示,光腔由抗反射层、P 型 Si 衬底、硅化铂膜、铝反射层以及硅化铂与铝反射层间的介质层构成。介质层的最佳光学厚度为  $\lambda'/4$  ( $\lambda'$  为中心波长),使热空穴在

硅化铂层两界面多次重复反射,导致内光电发射几率增加,从而提高量子效率。西安交通大学电子工程系的李国正等人制作了带有光腔结构的硅化铂红外探测器,液氮温度(77 K)时对波长为  $1.52 \mu\text{m}$  红外辐射的光响应灵敏度测试值为  $2.69 \times 10^{-2} \text{ A/W}$ ,量子效率 2.4%。同样在 77 K 制冷温度下,国外带有光腔结构的硅化铂红外探测器对  $1.52 \mu\text{m}$  的光响应灵敏度为  $(1.22 \sim 7.3) \times 10^{-2} \text{ A/W}$ ,波长在  $1 \sim 6 \mu\text{m}$  时的量子效率为 1%~6%。

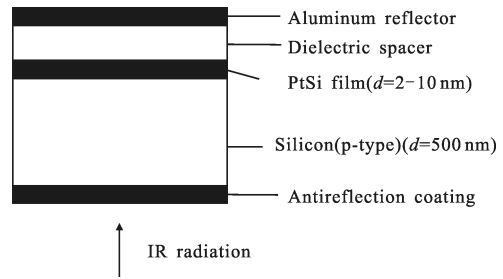


图 1 硅化铂红外探测器光腔结构示意图

Fig.1 Optical cavity of platinum silicide infrared sensor

光腔结构可以捕获散射的光子,此原理同样可在硅化铂膜内实现。用多孔硅作衬底制作硅化铂红外探测器,薄的硅化铂层覆盖在多孔硅小孔的周围,产生任意方向指向衬底的肖特基结。利用这种微型光腔结构,以及自由多方向的结取向使满足进入 Si 衬底能量、动量要求的载流子数量增加,而且由于在孔间的光腔效应以及在路径上多层结构使得逸散的光子能被捕获,从而提高量子效率。图 2 给出了常规

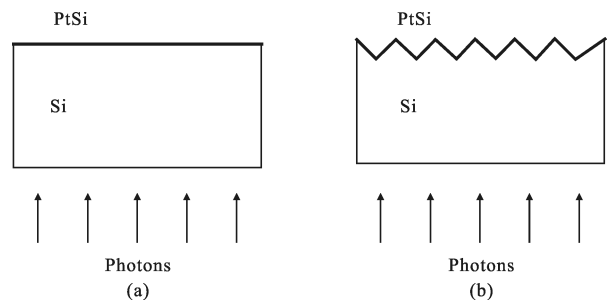


图 2 常规与多孔硅肖特基势垒结构示意图<sup>[5]</sup>

Fig.2 A regular schottky detector and a porous silicon schottky detector<sup>[5]</sup>

与多孔肖特基势垒结构示意图,多孔肖特基势垒呈粗糙的锯齿状结构。KN 图什理工大学的 Farshid Raissi<sup>[5]</sup>采用溅射和电镀的办法首次成功在多孔硅上制作出硅化铂/Si 肖特基微型光腔结构探测器,样品

的量子效率测试如图 3(a)所示, 2 μm 和 4 μm 处的量子效率最大, 分别达到 60% 和 27%, 2 μm 以下和 5 μm 以上量子效率也能达到 10%, 而非多孔硅的常规样品只为 0.1~1%。由量子效率的极大值可以看出, 这种效应与辐射波长有关。图 3(b)给出了量子效率极大值对应的波长与孔深的关系, 随着孔深的增加, 量子效率极大值波长呈线性增大。国内也开展了这方面的工作, 但目前尚未达到预期的效果, 主要问题是并没有很好地解决多孔硅与硅化铂工艺兼容等问题。

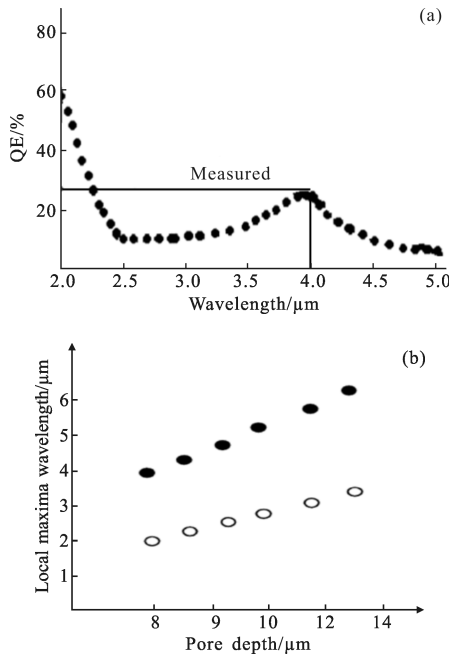


图 3 多孔硅肖特基势垒探测器量子效率测试值与量子效率极大值对应波长与孔深的关系<sup>[5]</sup>

Fig.3 Measured quantum efficiency of the porous silicon Schottky detector and the change in two local maxima as the pore depth is increased<sup>[5]</sup>

### 2.2 提高受激空穴发射效率 $\eta_e$

受激空穴发射效率  $\eta_e$  与进入 Si 衬底的空穴数量即逃逸几率相关, 而逃逸几率与硅化铂/Si 势垒高度和硅化铂膜厚有关。

(1) 降低硅化铂/Si 势垒高度, 可以使进入硅衬底的空穴数量增加。1995 年, 美国喷气推进实验室空间微电子技术中心的 T. L. Lin 等人提出在硅化铂/Si 的界面进行 P<sup>+</sup>重掺杂以减少肖特基势垒高度<sup>[6]</sup>, 掺杂结构如图 4 所示, 在硅化铂与 Si 之间加入薄的 P<sup>+</sup>层, 设定势垒高度为 0.24 eV, 势垒减小值  $\Delta\psi$  与 P<sup>+</sup>掺杂浓度  $N$  和掺杂厚度  $d$  的关系为:

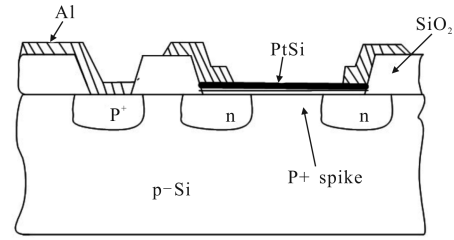


图 4 在硅化铂/p-Si 界面尖峰掺杂肖特基红外探测器<sup>[6]</sup>  
Fig.4 Schematic diagram of doping-spike PtSi/p-Si Schottky detector<sup>[6]</sup>

$$\Delta\psi = \frac{q}{2\epsilon_{si}} Nd^2 \tag{8}$$

式中:  $\epsilon_{si}$  为 Si 的介电常数。当掺杂厚度  $d$  太大时, 在硅化铂/Si 界面形成势垒尖峰, 尖峰引起的隧道效应会降低探测器的量子效率, 因此需要知道掺杂厚度  $d$  的最大值  $d_{max}$ 。通过求解掺杂 P<sup>+</sup>处硅化铂/Si 界面的势垒与电场, 找出掺杂  $d_{max}$  和 P<sup>+</sup>掺杂浓度的关系。图 5(a) 显示了势垒减小值  $\Delta\psi$  为 0.15 eV 和 0.05 eV 时对应的掺杂浓度与掺杂厚度的关系, 图中右上阴影部分

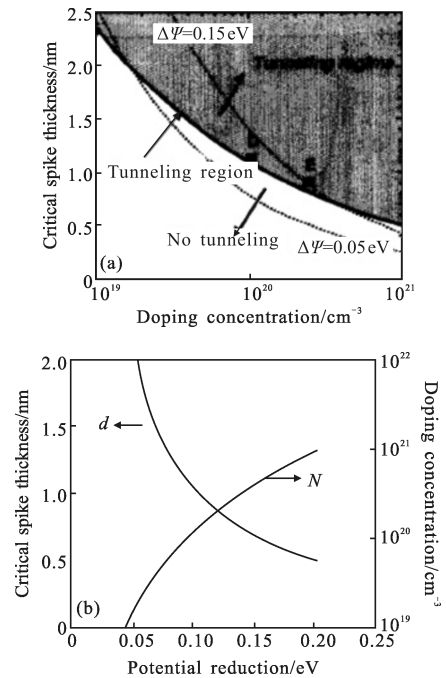


图 5 势垒减小值  $\Delta\psi$  为 0.15 eV 和 0.05 eV 时对应的掺杂 P<sup>+</sup>厚度与掺杂浓度的关系(a)和势垒减小值  $\Delta\psi$  与掺杂 P<sup>+</sup>厚度和掺杂浓度的关系(b)<sup>[6]</sup>

Fig.5 Critical thickness for the doping spike versus spike doping concentration. Also shown are two curves for 0.05 and 0.15 eV potential reduction(a) and critical thickness and doping concentration of the doping spike as a function of the potential reduction(b)<sup>[6]</sup>

是隧道区,可以看出势垒减小值  $\Delta\psi$  为 0.15 eV 相比 0.05 eV 进入隧道区的部分明显多一些,由此说明为了避免隧道效应,势垒高度不能无限降低。以  $\Delta\psi$  为 0.05 eV 为例,由公式(7)知截止波长为 6.5  $\mu\text{m}$ ,对照图 5(a),掺杂 P<sup>+</sup>厚度可以取为 2.1 nm,对应的掺杂浓度为  $1.5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 。若要扩展波长为 14  $\mu\text{m}$ ,则取  $\Delta\psi$  为 0.15 eV,对照图 5(a),掺杂 P<sup>+</sup>厚度取为 0.7 nm 对应的掺杂浓度  $4 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 。同时,图 5(b)显示了势垒减小值  $\Delta\psi$  与掺杂 P<sup>+</sup>厚度和掺杂浓度的关系,可以看出,掺杂 P<sup>+</sup>厚度越小,掺杂浓度越大,势垒减小值越大,截止波长扩展的越长,在实际中可以根据对截止波长的需要,合理选取掺杂 P<sup>+</sup>厚度与浓度。

对于截止波长为 6.5  $\mu\text{m}$  的 P<sup>+</sup>重掺杂硅化铂探测器样品进行测试,量子效率测试如图 6 所示,P<sup>+</sup>厚度与掺杂浓度分别为 0.9 nm 与  $6 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ,实验条件在探测器偏置电压为 -0.5 V,用 1 000 K 的黑体源背入射,可以看出,相比截止波长为 5.5  $\mu\text{m}$  的硅化铂探测器,量子效率在 3~4  $\mu\text{m}$  的波段有所改进,在 3~3.4  $\mu\text{m}$  量子效率大约为 4%。

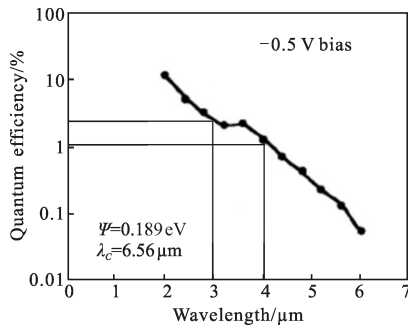


图 6 样品量子效率的测试值  
Fig.6 Measured quantum efficiency of the sample

(1) 淀积合适的硅化铂膜厚度,可以使进入 Si 衬底的空穴数量增加。按一般定义,硅化铂膜厚大于 10 nm 为厚型膜,小于 10 nm 为超薄膜,无论厚型或超薄型硅化铂膜,只要其能量大于势垒高度且小于空穴逃逸临界角  $\theta$  就能越过势垒进入 Si 衬底。 $\theta$  与入射光子能量  $h\nu$  和势垒高度  $\psi$  的关系如下: $\cos\theta = \sqrt{\psi/h\nu}$ ,其关系图如图 7 所示。

如果逃逸角大于临界角  $\theta$ ,空穴会在硅化铂膜中被俘获而不能越过势垒,使总量子效率下降。对于超薄型硅化铂膜,其厚度小于光生载流子的平均自由程,这样可以经过硅化铂/Si 界面的多次反射,最

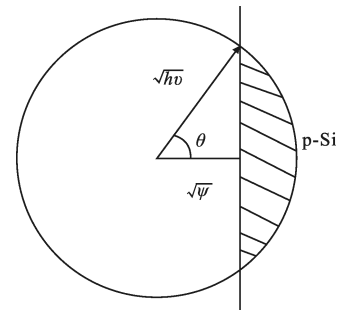


图 7 能量为  $h\nu$  的空穴逃逸角(阴影部分代表空穴转移到硅衬底)  
Fig.7 Escape angle for excited holes with  $h\nu$  energy (the shaded areas represent the holes which are transferred into the Si substrate)

终使得逃逸角小于临界角  $\theta$ ,所以空穴在超薄膜中的逃逸几率比在厚型硅化铂膜的大。尼康半导体器件中心的 Masahiro Shoda 等人对响应率与硅化铂膜厚的关系进行了测试<sup>[7]</sup>,如图 8 所示。铂膜淀积时衬底温度为室温,对于波长为 4  $\mu\text{m}$  的红外辐射,硅化铂膜厚为 15  $\text{\AA}$ ~20  $\text{\AA}$  时有最大响应率 15 mA/W;硅化铂膜厚小于 15  $\text{\AA}$  时,吸收的光子减少,探测器的响应率快速下降;膜厚大于 20  $\text{\AA}$ ,载流子浓度很高,在硅化铂/Si 界面产生的电子空穴对,随后又被复合,响应率也逐渐下降。因此通常需要通过实验找出最优的膜厚值,以达到最大的量子效率。

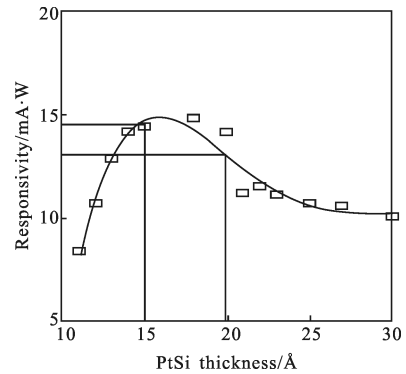


图 8 响应率与硅化铂膜厚的关系<sup>[7]</sup>  
Fig.8 Dependence of responsivity on PtSi thickness<sup>[7]</sup>

### 3 填充因子改进技术

根据公式(2),像元收集信号的能力与填充因子成正比。红外焦平面探测器的设计通常需要折衷考虑空间分辨力和灵敏度,一般来说,减小像元尺寸和增加像元数可以提高空间分辨力,但减小像元尺寸又会降低灵敏度;提高填充因子既能增大有效光敏

面积,提高信噪比,从而提高灵敏度,同时,又不影响空间分辨力。传统的一个硅化铂探测元中包含光敏元、保护环和信号读出电路几部分,填充因子仅为 25%~40%。经过分析,国内外研究者主要从以下两方面提高填充因子:

(1) 优化读出电路结构

为了改善填充因子,不同的读出电路结构不断被提出。典型的硅化铂红外焦平面探测器的规格与性能如表 1 所示。对于单片式结构,硅化铂红外焦平

表 1 典型的硅化铂红外焦平面探测器的规格与性能

Tab.1 Specifications and performance of typical PtSi Schottky-barrier FPAs

Array size	Readout	Pixel size / $\mu\text{m}^2$	Fill factor /%	NETD ( $F/\#$ ) /K	Year	Company/country
64x64	MOS	2903	56	0.48 (-)	1983	Mitsubishi/Japan
512x488	IL-CCD	31.5x25	36	0.07 (1.8)	1989	Fairchild/USA
640x480	MOS	24x24	38	0.06 (1.0)	1990	Sarnoff/USA
640x480	IL-CCD	21x21	40	0.10 (1.0)	1991	NEC/Japan
640x480	Hybrid MOS	20x20	80	0.10 (2.0)	1991	Hughes/USA
1040x1040	Charge sweep device(CSD)	17x17	53	0.10 (1.2)	1991	Mitsubishi/Japan
512x512	Charge sweep device(CSD)	26x20	71	0.03 (1.2)	1992	Mitsubishi/Japan
801x512	Charge sweep device(CSD)	17x20	61	0.04 (1.2)	1997	Mitsubishi/Japan

面器件大多采用内线转移 CCD(IL-CCD)读出结构,这种结构简单、噪声低,但是填充因子仅为 20%~40%,美国的仙童公司、日本的 NEC 均采用这种结构。1983 年,日本三菱电气公司采用 MOS 读出电路结构可将填充因子提高将近内线转移 CCD 读出结构的两倍。美国休斯飞机公司 1991 年,将硅化铂红外焦平面探测器阵列与 MOS 读出电路通过钢丘倒装互联形成混合 (HB)MOS 结构,填充因子提高到 80%,NETD 达到 0.1 K( $F/\#=2$ ),但是钢丘互联的混合 FPA 技术涉及探测器测试、生产、与读出结构的匹配以及钢柱的可靠性等技术问题。随后,日本三菱

电气公司大规模集成电路研发中心的 Kimata 等人提出电荷扫描器件(CSD),随后推出一系列 CSD 硅化铂焦平面阵列,通过 CSD 扫描寄存器每次读出一行,信号电荷在整个 CSD 栅下传输,使得 CSD 沟道可以设计得很窄,从而提高填充因子<sup>[8]</sup>。随着设计尺寸的减小,CSD 结构越能体现出其优势,一个 512x512 元像元面积为  $26\mu\text{m}\times 20\mu\text{m}$  单片式硅化铂探测器阵列,CSD 设计尺寸为  $1.2\mu\text{m}$ ,填充因子达到 71%,其在 300 K, $F/\#$  为 1.2 的测试条件下,NETD 达到 0.033 K;1024x1024 的 CSD 焦平面阵列,用最小的像元面积  $17\mu\text{m}\times 17\mu\text{m}$ ,CSD 设计尺寸为  $1.5\mu\text{m}$ ,填充因子达到 53%,在同样的测试条件下,NETD 达到 0.1 K;其中一个 801x512 元的高性能热像仪,像元面积  $17\mu\text{m}\times 20\mu\text{m}$ ,填充因子达到 61%,NETD 达到 0.037 K,总功耗小于 50 mW。由此说明,填充因子的增大可以减小 NETD 值,从而提高热灵敏度。

除上述几种读出电路结构以外,日本富士通实验室的 Yuichiro Ito 等人提出曲流通道 CCD(MCCD)结构,如图 9 所示,可以看出,MCCD 只用两个电极,每个转移单元有存储区与势垒区,存储区的掺杂浓度高于势垒区,从而使信号电荷进行单向流动,再通过在两电极间施加互补驱动脉冲让电荷沿沟道移动,这种简单的电极结构减少占用面积,若设有窄沟道效应,能将 MCCD 沟宽设计为  $8\mu\text{m}$ ,填充因子可望达到 57%<sup>[9]</sup>。

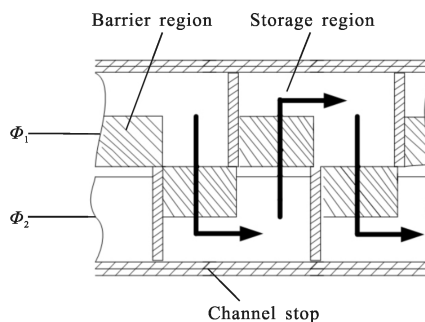


图 9 曲流通道 CCD 结构

Fig.9 Meander channel CCD

(2) 采用微透镜阵列

微透镜阵列对入射的红外辐射具有会聚作用,在维持器件原有暗电流水平不变的基础上,增大器件的填充因子,是提高器件的红外光电响应性能的有效手段之一。1991 年,由 N.T.Gordan 等人第一次

报道了用单片折射式微透镜改进红外探测器列阵的性能,随后在 1994 年, Bor-Yeu Tsaur 等人通过用微透镜改进 GeSi/Si 焦平面填充因子提高了光电灵敏度得以论证。华中科技大学光电子工程系易新建等人实现了片上微透镜硅化铂红外探测器列阵,采用 256×256 元硅化铂红外 CCD 探测器,填充因子 42.2%,衬底厚 300 μm,为了保证光刻质量,先将衬底抛光,在衬底的背面通过光刻、热熔法、磁增强反应离子刻蚀实现了片上折射式微透镜列阵,微透镜焦距为 300 μm,以最大限度地收集入射光,最后使填充因子达到 89%。

#### 4 结 论

文中分析总结了改进硅化铂红外焦平面探测器量子效率和填充因子的关键技术。多孔硅结构提高量子效率最为明显,而且可以调整多孔硅的孔深来获得所要求的峰值波长。将多孔硅结构、光腔结构、P<sup>+</sup>重掺杂和合适硅化铂膜厚等多项技术综合起来可以最大程度地改善量子效率;对填充因子改进最明显的技术是微透镜列阵;将读出结构制作为混合结构、CSD 或 MCCD 也能提高填充因子<sup>[10]</sup>,但应注意探测器与读出结构在电荷收集能力和电荷处理容量等方面良好匹配才能达到良好的器件性能。虽然硅化铂红外焦平面探测器的发展似乎处于发展的平台期,但国外对硅化铂肖特基势垒的理论与应用研究都没有停止。因此,国内也应加强相关的研究,在国内已有的研究平台上开发高灵敏度的硅化铂红外焦平面探测器以及新型的肖特基势垒探测器。

#### 参 考 文 献:

- [1] Cai Yi. The Analysis of the characteristics and application potential for PtSi infrared focal plane detector assemblies[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007(1): 1-4. (in Chinese)
  - [2] Takehiko Satoh, Masaki Fujimoto, Masato Kagitani, et al. NIIHAMA project: continuous monitoring of Jupiter's infrared auroras [C]//Japan Geoscience Union Meeting 2013, 2013: 1.
  - [3] Ivanov V G, Ivanov G V. New type far IR and THz Schottky barrier detectors for scientific and civil application [J]. *Advances in Optoelectronics*, 2011: 2-6.
  - [4] Freeman D Shepherd, James E Murguia. A comparison of infrared detection mechanisms in thermal-emissive vs photo-emissive silicon Schottky barrier arrays [C]//SPIE, 2000, 4028: 90-101.
  - [5] Raissi F. A possible explanation for high quantum efficiency of PtSi/porous Si Schottky detectors [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2003, 50(4): 1134-1137.
  - [6] Lin T L, Park J S, Gunapala S D, et al. Doping-spike PtSi Schottky infrared detectors with extended cutoff wavelengths [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1995, 42(7): 1216-1220.
  - [7] Masahiro Shoda, Keiichi Akagawa, Tsuneyuki Kazama. A 410 K pixel PtSi Schottky-barrier infrared CCD image sensor [C]//SPIE, 1996, 2744: 23-32.
  - [8] Masafumi Kimata, Masahiko Denda, Naoki Yutani, et al. 256 multiplied by 256 element platinum silicide schottky-barrier infrared charge-coupled device image sensor [J]. *Optical Engineering*, 1987, 26(3): 209-215.
  - [9] Yuichiro Ito, Akira Shimohashi, Toshiro Yamamoto, et al. A meander channel CCD infrared imager with a platinum silicide Schottky barrier[C]//SPIE, 1983, 0395: 55-61.
  - [10] Zu Qiuyan, Wang Weibing, Huang Zhuolei, et al. Uncooled diode infrared detector and design of its readout interface circuit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1680-1684. (in Chinese)
- 蔡毅. 硅化铂红外焦平面探测器的特点与应用潜力分析 [J]. 半导体光电, 2007(1): 1-4.
- 祖秋艳, 王玮冰, 黄卓磊, 等. 二极管非制冷红外探测器及其读出电路设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1680-1684.