

# P<sup>+</sup>-Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/P-Si 异质结内光发射(HIP) 长波长红外探测器结构的改进 及其在77K下的特性

王瑞忠 陈培毅 钱佩信

罗广礼 张 锡 郑康立 周均铭

(清华大学微电子学研究所 北京 100084)

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

**摘要** 本文对P<sup>+</sup>-Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/P-Si异质结内光发射长波长红外探测器的电极结构进行了改进，并在国内首次报道了这种器件在77K下的电学特性和光学响应特性。

EEACC: 7230C

## 1 引言

随着军事和遥感遥测科学的发展，对红外焦平面阵列(FPA)技术的应用日益迫切，尤其是8~14μm长波长红外探测器，对接近景物温度的目标最为敏感，因此一直是红外焦平面阵列研究的主要方向之一<sup>[1]</sup>。P<sup>+</sup>-Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/P-Si异质结内光发射长波长红外探测器，因其易和CMOS或CCD读出电路实现单片集成，工艺简单，成本较低，可同时工作于3~5μm和8~14μm两个大气窗口，量子效率高于硅化物肖特基势垒探测器，响应波长可调等一系列优点，近年来已引起人们极大的兴趣。1990年，Lin等<sup>[2]</sup>首次制成P<sup>+</sup>-Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/P-Si异质结内光发射长波长红外探测器，响应范围8~12μm，量子效率可达1%。1991年，Tsaur等<sup>[3]</sup>成功研制出400×400象元P<sup>+</sup>-Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/P-Si异质结内光发射长波长红外探测器阵列，并同CCD读出电路实现单片集成，截止波长9.3μm，响应不均匀性低于1%，最小可分辨温度小于0.2K。1993年，复旦大学应用表面物理国家重点实验室也成功地研制出P<sup>+</sup>-Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/P-Si异质结内光发射长波长红外探测器，截止波长达9μm，52K下，探测度D<sub>500K</sub>\*为2.0×10<sup>8</sup>cm·Hz<sup>1/2</sup>/W<sup>[4,5]</sup>。但是这种探测器的最大缺点是工作温度较低，对于器件的关键参数探测度D\*，目前国外尚无报道，国内报道的最高温度为52K下，D<sub>500K</sub>\*为2.0×10<sup>8</sup>cm·Hz<sup>1/2</sup>/W<sup>[5]</sup>，大大低于77K液氮温度，从而限制了它的应用范围。本文在现有器件结构的基础上提出了一种新的电极结构，通过比较表明，该结构既能减小器件的工艺难度和降低探测器的寄生串联电阻，以减小其热噪声；同时又能有效地避免“铝钉”效应，以减小漏电流。制成的P<sup>+</sup>-Ge<sub>0.3</sub>Si<sub>0.7</sub>/P-Si异质结内光发射红外探测器在77K下表现出理想的二极管特性，反向漏

王瑞忠 男，1970年生，博士研究生，从事锗硅合金红外探测器及焦平面阵列的研制  
陈培毅 男，1945年生，副教授，从事半导体光电器件及其集成技术的研究

1996年3月28日收到初稿，1996年8月21日收到修改稿

电流密度仅为  $10^{-2} A/cm^2$ , 与用热电子发射方程计算的理论值接近。在未采用光腔结构和抗反射涂层的情况下, 测得 77K 下器件的响应范围为  $3 \sim 10 \mu m$ , 峰值响应波长  $5.8 \mu m$ , 探测度  $D_{(5.8, 1000, 1)}^*$  为  $2.3 \times 10^8 cm \cdot Hz^{1/2}/W$ , 电压响应度  $R_V$  为  $1.2 \times 10^3 V/W$ , 估计量子效率为 1%。同时测定了器件在 77K 下对 500K 黑体的探测度  $D_{(500, 1000, 1)}^*$  为  $4.7 \times 10^7 cm \cdot Hz^{1/2}/W$ 。以上结果说明了  $P^+-Ge_xSi_{1-x}/P-Si$  异质结内光发射红外探测器在 77K 下工作的可能性, 展示了这种新型器件较好的应用前景。

## 2 器件结构和工艺

图 1(a)是在文献[2]中提出的  $P^+-Ge_xSi_{1-x}/P-Si$  异质结内光发射红外探测器的常用结构。该结构的特点是发射极铝电极与场区  $SiO_2$  上的锗硅合金相接触, 这样做的好处是避免了“铝钉”效应, 漏电流较小, 但它存在两个缺点:

(1)  $Ge_xSi_{1-x}$  合金层厚度通常在 100nm 以下, 作绝缘层的氧化层必须较薄, 以保证  $Ge_xSi_{1-x}$  合金层在台阶处不断, 但考虑到氧化层的介电强度, 它又不能太薄。在生长  $Ge_xSi_{1-x}$  合金层之前的清洗过程中场区氧化层要被 HF 漂掉一部分, 为了控制氧化层的厚度, 就要对清洗和氧化层的生长进行严格的控制, 这就对工艺提出了较高的要求。

(2) 氧化层上的锗硅合金是多晶, 会引入较大的寄生串联电阻, 影响器件的性能。

如采用图 1(b)所示的将铝电极直接与光敏区上的锗硅合金相接触的结构, 则由于  $Ge_xSi_{1-x}$  合金层较薄, 不能避免“铝钉”效应, 漏电流将较大。为了既能减小器件的串联电阻, 又能避免“铝钉”效应, 以便提高器件的性能, 我们采用了图 1(c)所示的改进电极结构。该电极结构的特点是铝电极仅与  $N^+$  保护环上的  $Ge_xSi_{1-x}$  层相接触, 这样即使铝与  $Ge_xSi_{1-x}$  层相接触处发生“铝钉”效应, 由于“钉穿”仅发生在  $N^+$  区上, 引入的漏电流非常小(器件工作时  $N^+P$  结为零偏或反偏, 理论计算与实验均证明, 其在低温下的漏电远小于器件本身的漏电)。这样该电极结构既解决了图 1(a)的结构存在的两个问题, 又避免了“铝钉”效应对器件漏电流的影响。

我们制成的器件结构参数如下: Ge 组分  $x$  为 0.3,  $Ge_{0.3}Si_{0.7}$  层厚度 100nm, B 掺杂浓度  $1 \times 10^{20} cm^{-3}$ 。器件的光敏区面积为  $100 \times 100 \mu m^2$ 。

该器件的关键工艺是用 MBE 法选区生长  $Ge_xSi_{1-x}$  合金层, 所用设备为 VG Semicon V80S。生长前先用传统清洗方法(Shiraki 法<sup>[6]</sup>)对衬底进行清洗, 然后将衬底送入进样室。先将衬底在预处理室中 650°C 下去气半小时, 然后送入生长室。在 950°C 下将衬底脱膜 15 分钟, 将清洗时形成的防止 C、O 沾污的  $SiO_2$  膜去掉以露出清洁的 Si 表面。这时可观察到清晰的 RHEED 图象。生长前生长室的起始真空中度  $1.33 \times 10^{-8} Pa$ , 生长时真空中度为  $1.33 \times 10^{-6}$

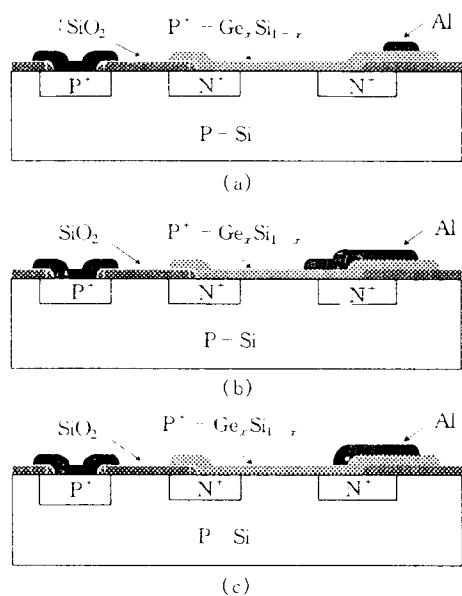


图 1 三种器件结构比较

Pa. 生长时衬底温度 580°C, 采用热硼源进行 P<sup>+</sup>掺杂, 硼源温度为 1700°C. 生长速率控制在每分钟 0.1~0.2nm. 为了使衬底表面的沾污尽量少以生长出高质量的外延材料, 衬底清洗后最好马上进行生长, 而不要停留时间太久, 由于清洗时场区氧化层要被 HF 漂掉一部分, 所以衬底上事先要有足够厚的场区氧化层.

采用 SF<sub>6</sub> 作反应气体, 用反应离子刻蚀法 (RIE) 刻蚀 Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub> 合金层, 刻速可达 300nm/min. 合金工艺对器件形成欧姆接触很重要, 我们采用在 450°C 氮气气氛下合金半个小时.

### 3 器件在 77K 下的电学和光学特性

器件所有 77K 下的特性都是在将样品装入充满液氮的杜瓦瓶中测得的. 所用杜瓦瓶如图 2 的照片所示. 为了验证不同的电极结构的优劣, 在同一衬底上制作了图 1 中的三种电极结构的器件, 以便比较. (为说明方便, 将其图 1 中结构 (a), (b), 和 (c) 的器件分别称作器件 A, 器件 B 和器件 C.)

#### 3.1 电学特性

器件在 77K 下亦表现出理想的二极管特性. 图 3 是 77K 下器件的 I-V 特性照片, 从中可以看出:

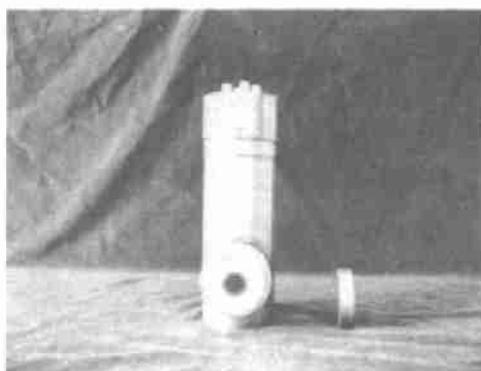


图 2 测试所用的杜瓦瓶照片

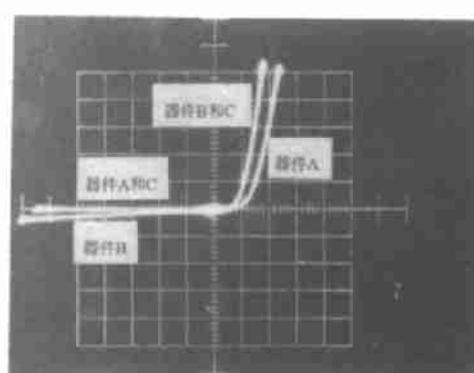


图 3 器件 77K 下 I-V 特性照片

横轴的单位为 0.1V/div, 纵轴的单位为 0.01mA/div.

(1) 器件 B 的反向漏电明显高于器件 A 和 C, 如图 3 中左侧曲线所示. 这是由于器件 B 不能避免“铝钉”效应的缘故.

(2) 器件 A 的正向电阻略高于器件 B 和 C, 如图 3 中右侧曲线所示. 这是由于器件 A 有寄生串联电阻的影响.

器件在 77K 下的反向漏电流, 可用下面的热电子发射方程来估算<sup>[2]</sup>:

$$J = A^{**} T^2 \exp(-\Psi_b/kT) \quad (1)$$

其中 J 为反向饱和电流密度; A<sup>\*\*</sup> 为材料的有效理查逊常数; T 为绝对温度; Ψ<sub>b</sub> 为 P<sup>+</sup>-Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/P-Si 异质结的势垒高度, k 为玻耳兹曼常数.

对于 x=0.3 的情况, Ψ<sub>b</sub> 约为 0.1eV<sup>[3]</sup>. 取 A<sup>\*\*</sup> 为 15.5A/(cm<sup>2</sup> · K<sup>2</sup>)<sup>[4]</sup>, 计算得在 77K 下 J 等于 2.8×10<sup>-3</sup>A/cm<sup>2</sup>. 图 4 是器件 C 在不同偏压下的反向电流密度, 从中可以看出, 它

们与理论结果相比在数量级上是一致的。当偏压进一步增大时,实测反向电流密度并不饱和,这是由偏压引起的镜向力势垒降低造成的<sup>[3]</sup>。

### 3.2 光学特性

用硅碳棒作光源,利用单色仪测光谱响应。信号和噪声用 MODEL SR510 锁相放大器测定。图 5 是测得器件 C 在  $T = 77K$ ,  $-0.1V$  偏压下的归一化响应谱。从中可以看出,在未

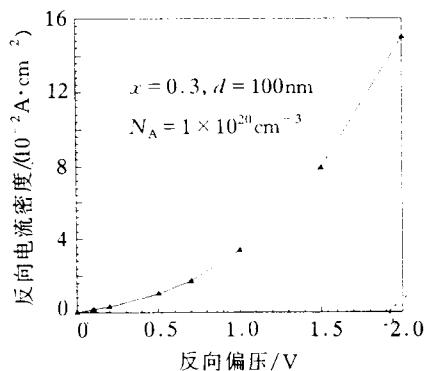


图 4 器件 C 在 77K 下的反向电流密度

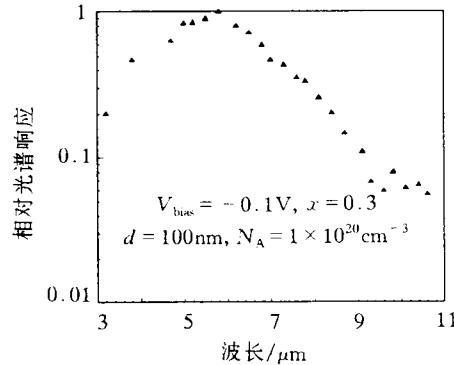


图 5 器件 C 在 77K 下的归一化响应谱

采用光腔结构和抗反射涂层的情况下,器件的响应范围可达  $3 \sim 10\mu m$ ,峰值响应波长为  $5.8\mu m$ 。计算得峰值探测度  $D_{(5.8, 1000, 1)}^*$  为  $2.3 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ ,电压响应度  $R_V$  为  $1.2 \times 10^3 \text{ V/W}$ ,估计量子效率为 1%。同时测定了器件 C 在 77K,无偏置下对 500K 黑体( $\lambda_p = 5.8\mu m$ )的探测度  $D_{(500, 1000, 1)}^*$  为  $4.7 \times 10^7 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ 。

对器件 A,B 和 C 在  $T = 77K, 500K$  黑体入射下的信号电压,噪声电压( $ENBW = 1\text{Hz}$ ),信噪比及探测度  $D^*$  的比较如表 1 所示(器件均不加偏压,距黑体距离为 6.5cm)。

表 1 器件 A,B 和 C 在  $T = 77K, 500K$  黑体入射下性能比较

器件	信号电压 $V_s/\mu V$	噪声电压 $V_n/nV$	信噪比 $V_s/V_n$	$D_{(500, 1000, 1)}^*/(\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1})$
A	0.430	22.0	19.5	$3.5 \times 10^7$
B	0.050	10.0	5.0	$0.89 \times 10^7$
C	0.450	17.0	26.5	$4.7 \times 10^7$

从表 1 中可以看出:

- (1) 器件 C 的  $D_{(500, 1000, 1)}^*$  是最高的;
- (2) 器件 A 的  $V_s$  高于器件 B 和 C,这是由于器件 A 中相对较大的寄生串联电阻的影响;
- (3) 器件 B 的  $V_s$  明显低于器件 A 和 C,这是由于器件 B 的漏电流较大。

通过以上比较可以看出,经改进的电极结构既能避免寄生串联电阻的作用,又能消除“铝钉”效应对器件漏电的影响。

## 4 结论

本文对  $P^+-Ge_xSi_{1-x}/P-Si$  异质结内光发射红外探测器的电极结构进行了改进。改进后的结构不但减小了器件的工艺难度，而且通过对其在 77K 下的电学特性和光学响应进行测试和比较，证明该结构既能避免寄生串联电阻的作用，又能消除“铝钉”效应对器件漏电的影响。从测试结果可以看出，器件在 77K 下对红外辐射亦有明显的响应，且响应范围可到长波范围。从而展示了  $P^+-Ge_xSi_{1-x}/P-Si$  异质结内光发射红外探测器的较好应用前景。

**致谢** 作者感谢清华大学微电子所器件物理组和中国科学院物理所六零五组的同事的大力合作。同时感谢中国科学院物理所三零八组在测试方面，中科院半导体所王森老师在压焊方面，清华大学微电子所马淑兰老师，陆自强老师在照片方面的无私帮助。

## 参 考 文 献

- [1] 熊洗骏，半导体光电，1993，14(1)：7.
- [2] T. L. Lin and J. Maserjian, Appl. Phys. Lett., 1990, 57(14): 1422.
- [3] B. Y. Tsaur *et al.*, IEEE Electron Device Letters, 1991, 12(6): 293.
- [4] 龚大为,等, 半导体学报, 1993, 14(4): 260.
- [5] 龚大为,等, 红外与毫米波学报, 1994, 13(2): 149.
- [6] Akitoshi Ishizaka and Yasuhiro Shiraki, J. Electrochem. Soc., 1986, 133(4): 666.
- [7] T. L. Lin *et al.*, Optical Engineering, 1994, 33(3): 716.

## Improvement on Structure of $P^+-Ge_xSi_{1-x}/P-Si$ Heterojunction Internal Photoemission Long-Wavelength Infrared Detectors and its Characteristics at 77K

Wang Ruizhong, Chen Peiyi and Tsien Peihsin

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Luo Guangli, Zhang Lei, Zheng Kangli and Zhou Junming

(Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Received 28 March 1996, revised manuscript received 21 August 1996

**Abstract** The electrode structure of  $P^+-Ge_xSi_{1-x}/P-Si$  heterojunction internal photoemission long-wavelength infrared detector is improved and the electrical and photo-responsible characteristics of this kind of device at 77K are reported for the first time in China.

EEACC: 7230C