

# 风云一号气象卫星用三元线列硅探测器

梁平治 张忠堂 孙德庆 谈德明

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

**摘要**——根据对器件响应率光谱分布、暗电流、结电容的要求, 确定了硅材料参数和有关工艺参数。讨论了为提高器件可靠性及防止光串音, 在器件结构设计上采用的光敏元圆角化、加保护铝环和铝屏蔽、浓磷扩散等措施。研制的器件响应率在 632.8 nm 时为 0.3 A/W, 在 -10V, 25°C 时暗电流为  $5 \times 10^{-11}$  A, 结电容为 29 pF。器件通过了严格的老化筛选和各种环模试验, 因而能适应于空间环境的使用要求。

**关键词**——线列硅探测器, 量子效率, 响应率光谱分布。

## 1. 引 言

三元线列硅探测器是由一硅衬底上的三个 PN 结组成。三个 PN 结作为三个光敏元, 它们的面积均为  $1 \times 1 \text{ mm}^2$ , 中心距为 1.57 mm。三个光敏元分别接收 0.48~0.53、0.53~0.58 和 0.58~0.68  $\mu\text{m}$  三个波段的可见光辐射信号, 而其波段的限制是通过在光敏面前方加上一个三波段的微型组合带通滤光片来实现的。

本文叙述了这一器件的设计原则, 从高性能和高可靠性的要求出发, 涉及硅材料参数的选择、钝化  $\text{SiO}_2$  厚度的确定以及器件的结构。还描述了器件的工艺流程及器件的各项性能指标。

## 2. 器件的设计

### 2.1 Si 材料和工艺参数的选择

对于一个光伏型的硅光探测器来说, 其衬底 Si 材料的参数大致上决定了它的光谱响应曲线(量子效率的光谱分布)、结电容和暗电流。因此, 根据扫描辐射计的要求来设计探测器时, 首先要确定 Si 材料的电阻率、寿命等参数。

为了在使用的波段(0.43~0.68  $\mu\text{m}$ )内得到尽可能大的量子效率  $\eta$  值, 必须降低表面复合速度, 减少结深  $x_j$ , 增大电子和空穴的扩散长度  $L_n$  和  $L_p$ 。而衬底载流子浓度  $N_D$  对该波

段  $\eta$  的影响并不显著<sup>[1]</sup>。因此,从提高  $\eta$  看,衬底电阻率的选择有很大的余地。然而,因为  $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ , 其中  $D_p$  为空穴的扩散系数,  $\tau_p$  为空穴的寿命,对于电阻率高的材料,其  $\tau_p$  往往也大,因此,选择高阻材料有利于增大  $\eta$  值。

其次,我们从器件的暗电流  $I_a$  和结电容  $C_j$  来考虑对材料电阻率的要求。在室温条件下,器件的暗电流  $I_a$  主要是耗尽区的产生电流,其大小正比于耗尽区宽度  $W$ <sup>[2]</sup>,而器件的结电容  $C_j$  却与耗尽区宽度  $W$  成反比。

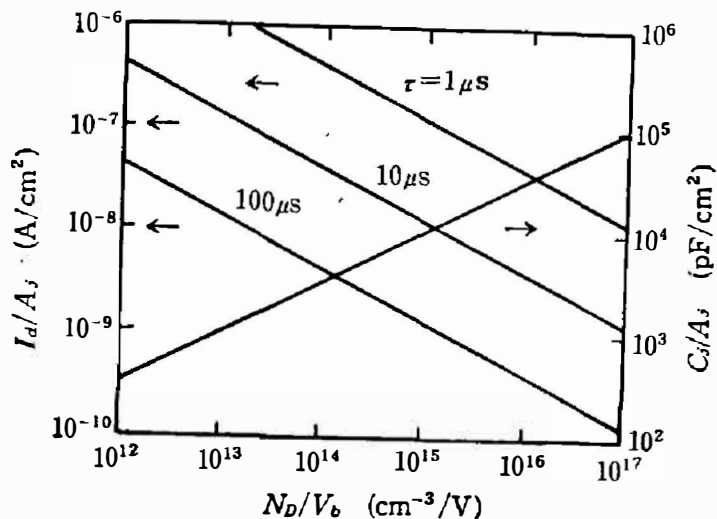


图 1 暗电流、结电容与衬底杂质浓度及偏压的关系  
Fig. 1 Dark current, junction capacitance versus impurity concentration in substrate and bias voltage.

对于一个 P<sup>+</sup>N 的单边突变结,我们有图 1 所示的  $N_D$  与  $I_a/A_j$ ,  $C_j/A_j$  的关系曲线。其中,  $A_j$  为结面积,  $I_a$  的曲线对应几个不同的产生寿命  $\tau_0$ 。由图 1,根据辐射计使用要求提出的  $C_j$  和  $I_a$  值,就可确定应该选择的硅衬底载流子浓度值,从而决定其电阻率。

除了电阻率,必须确定材料的寿命参数。我们总希望寿命越长越好。因此,寿命总选择在材料制造厂能达到的最好水平。

我们还确定一些工艺参数选择的原则。例如,为了提高可见光波段的量子效率,结深应尽可能浅;P<sup>+</sup> 区的杂质浓度不宜过高,否则将使  $N_A$  增大,  $L_n$  减小;工艺中必须注意降低 SiO<sub>2</sub> 及 P<sup>+</sup> 区接能的界面态,以减小

我们还确定一些工艺参数选择的

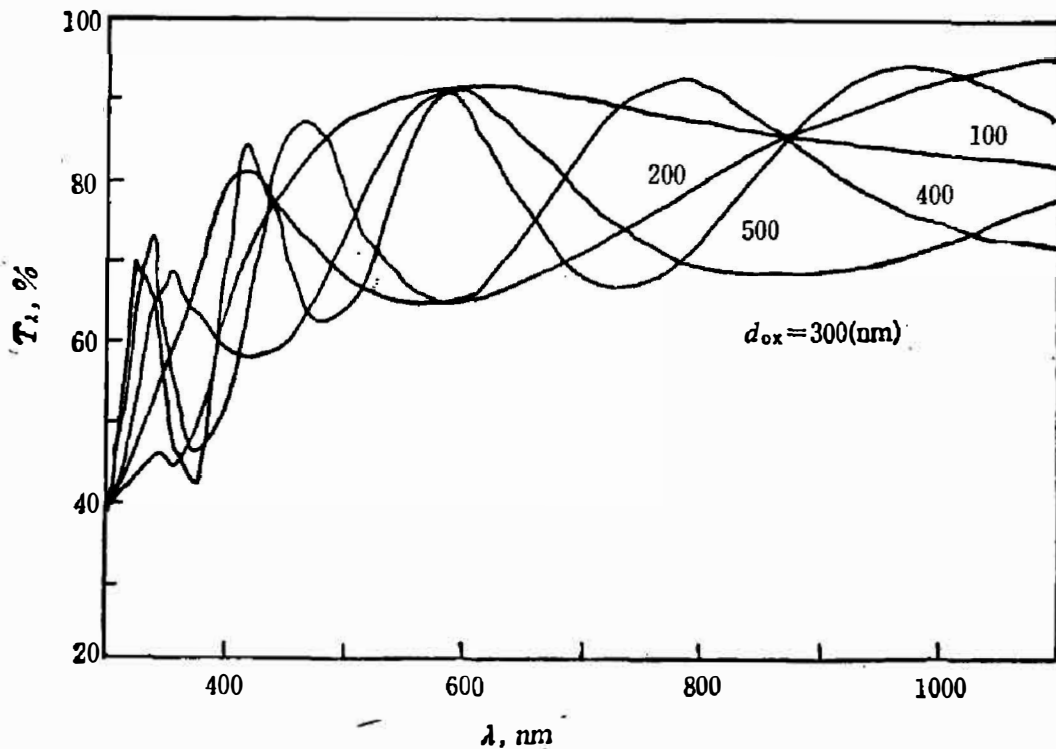


图 2 Si 衬底上 SiO<sub>2</sub> 薄膜的透射率

Fig. 2 Transmittance of SiO<sub>2</sub> layer on a Si substrate, as a function of wavelength.

表面复合速度。根据这些原则所确定的工艺,使研制的器件得到了较高的量子效率。

## 2.2 $\text{SiO}_2$ 膜厚度的确定

为了钝化,在光敏面的表面热生长了一层  $\text{SiO}_2$  膜。由于干涉的原因,这层膜的厚度会明显地影响器件的量子效率<sup>[1]</sup>。图 2 画出了不同  $\text{SiO}_2$  膜厚度  $d_0$  对应的透射率  $T_\lambda$  计算曲线。我们根据图 2 选择了  $\text{SiO}_2$  层的厚度,使选定波长下的  $T_\lambda$  达到最大。器件的总量子效率  $\eta_{\text{总}}$  为内量子效率与  $T_\lambda$  的乘积,因此  $\eta_{\text{总}}$  也将得到增强。

## 2.3 器件的结构

器件芯片的版图结构如图 3 所示。在设计中有以下几个特点:

### (1) 光敏元圆角化

光敏元的硼扩散窗的四角采用圆弧形,这样就避免了在尖角处产生电场集中的球面结,从而提高了结的击穿电压。

### (2) 加保护铝环

实验表明,在器件在制造过程中形成的  $\text{SiO}_2$  层中不可避免地存在可动的正离子(主要是  $\text{Na}^+$ )。在电老化时,由于 P 区加了负电压,所以正离子会在 P 区与  $\text{SiO}_2$  的界面上聚集。

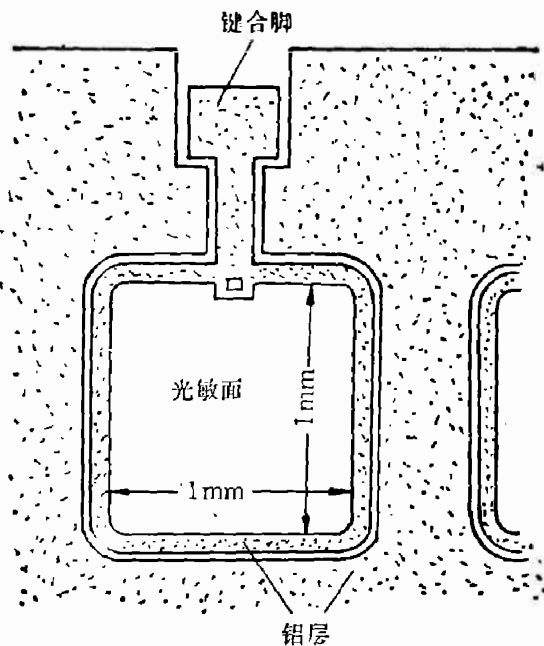


图 3 器件芯片的版图结构

Fig. 3 Layout of a sensing element.

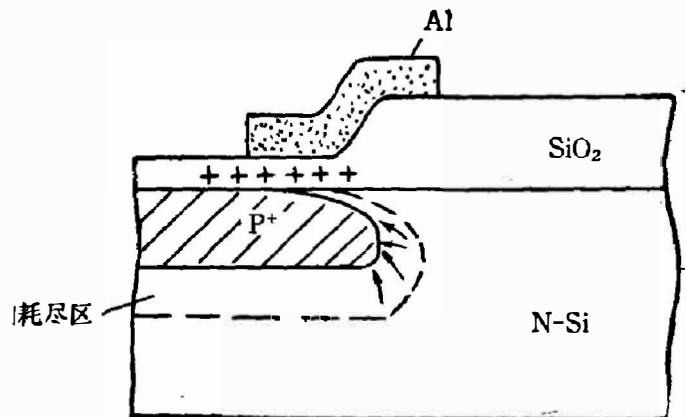


图 4  $\text{SiO}_2$  中的正离子对  $\text{P}^+\text{N}$  结漏电的影响

Fig. 4 Influence of positive ions in  $\text{SiO}_2$  on leakage current of a  $\text{P}^+\text{N}$  junction.

在  $\text{P}^+\text{N}$  结靠近  $\text{SiO}_2$  的边界处,由于  $\text{P}^+$  区的杂质浓度较低,因此,在正离子的作用下会引起反型。这样,就造成了  $\text{P}^+$  区边界的弯曲(见图 4),从而出现耗尽区电场的局部集中。这一现象会使  $\text{P}^+\text{N}$  结的漏电增加,击穿电压下降<sup>[3]</sup>。为了避免这一点,设计了一个铝保护环加在  $\text{P}^+\text{N}$  结的周界上,并把这一环与  $\text{P}^+$  区的引出键合脚相联。这样,在  $\text{P}^+$  区加负偏压时,铝环上也处于负偏置。因此, $\text{P}^+\text{N}$  结边界处不再出现吸引  $\text{SiO}_2$  中正离子电场,上述现象将不复存在。

然而,加了保护环后,器件的总电容将增大。

### (3) 防止光敏元扩大与光串音的考虑

对于  $\rho=20\sim 40\ \Omega\ \text{cm}$  的 N 型硅衬底材料,其少子扩散长度为  $160\sim 200\ \mu\text{m}$ 。这样,光敏元周围衬底中的光生载流子,只要其产生位置到 PN 结耗尽区边界的距离小于扩散长度,就对光电流有贡献,造成光敏面的扩大。因此我们用铝层对光敏元周围的区域进行了光屏蔽。然而,仍然存在两个引起光串音的因素:一是由于屏蔽铝与保护铝环之间必须绝缘,因此它们之间有一间隙。这一间隙内会产生光生载流子,这些载流子会向相邻光敏元的耗尽区扩散。二是在光敏面下耗尽区外产生的光生载流子将向四周扩散,当它们进入相邻光敏元的耗尽区时,就产生了串音。为了阻止这些光生载流子的扩散,我们在光敏元的周围采用浓磷扩散,其浓度可达  $10^{20}\ \text{cm}^{-3}$ 。由于在浓磷扩散区,光生载流子的扩散长度减小为约  $25\ \mu\text{m}$ ,因此,就有效地防止了光生载流子扩散引起的光串音。

## 3. 器件制造工艺

硅器件制造工艺流程如图 5 所示。

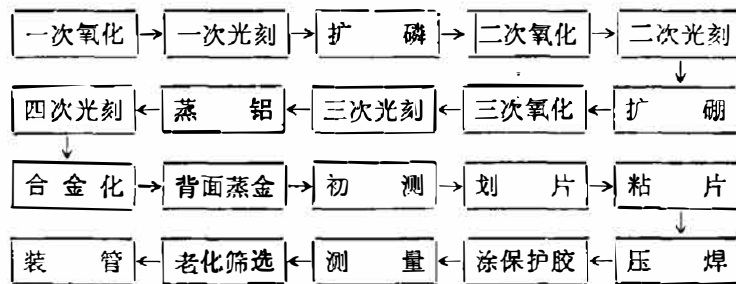


图 5 器件制造的工艺流程图

Fig. 5 Process of the device fabrication.

## 4. 器件性能

### 4.1 响应率

用两种方法测试器件的响应率,其一是用 2856 K 室温的标准照度灯作为光源,测得器件的积分响应率。其二是用波长为  $632.8\ \text{nm}$  的 He-Ne 激光作为光源,或者用白炽灯经过窄带滤光片变成单色光作为光源,测量器件的单色响应率。测得的典型值是:当光源为  $100\ \text{lx}$  时,积分响应率为  $1.2\times 10^{-6}\ \text{A}$ ;当波长为  $632.8\ \text{nm}$  时,单色响应率为  $0.3\ \text{A/W}$ 。

### 4.2 暗电流

用美国 HP 公司的 4140 BPA 测量仪测得了器件的暗电流及其与温度的关系。器件在  $25^\circ\text{C}$ 、 $-10\ \text{V}$  偏压时,暗电流的典型值为  $1\sim 5\times 10^{-11}\ \text{A}$ 。图 6 是暗电流与温度的关系。从曲线可见,在  $100^\circ\text{C}$  以下暗电流的贡献主要来自产生电流,而在  $100^\circ\text{C}$  以上扩散电流的贡献开始变得越来越大。

### 4.3 电容

器件的电容用 CTG 型高频 C-V 特性测试仪测量。测试频率为  $1\ \text{MHz}$ ,图 9 画出了器

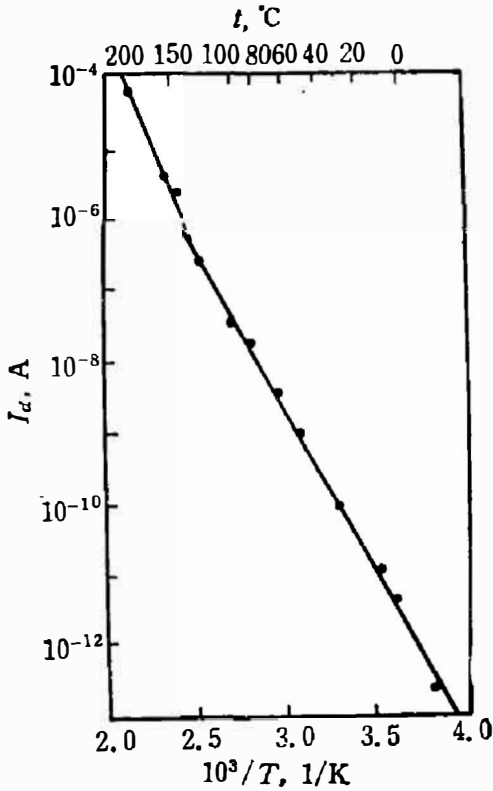


图 6 器件的暗电流与温度关系  
Fig.6 Dark current of the device vs temperature.

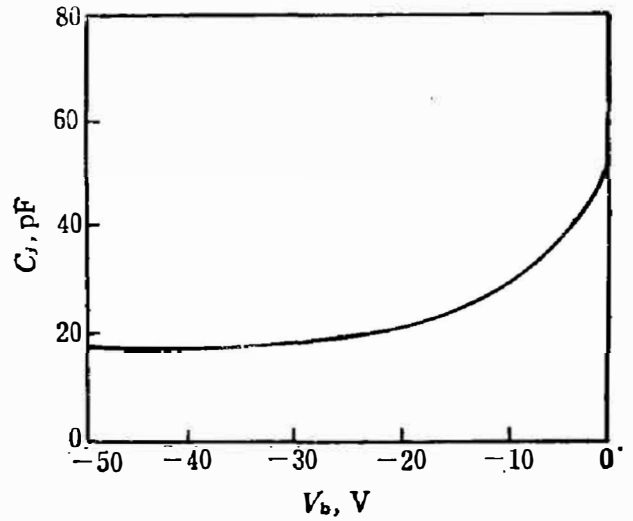


图 7 器件的电容与偏压关系  
Fig. 7 Capacitance of the device vs bias voltage.

件的典型 C-V 曲线。由曲线可见，在 -10 V 偏压时，器件的电容约为 30 pF。

#### 4.4 响应率光谱分布

用研制的自动光谱测试系统测试了器件的响应率光谱分布。其典型结果见图 8。从图 8 曲线可见，器件响应的峰值向短波方向移动。

#### 4.5 光串音

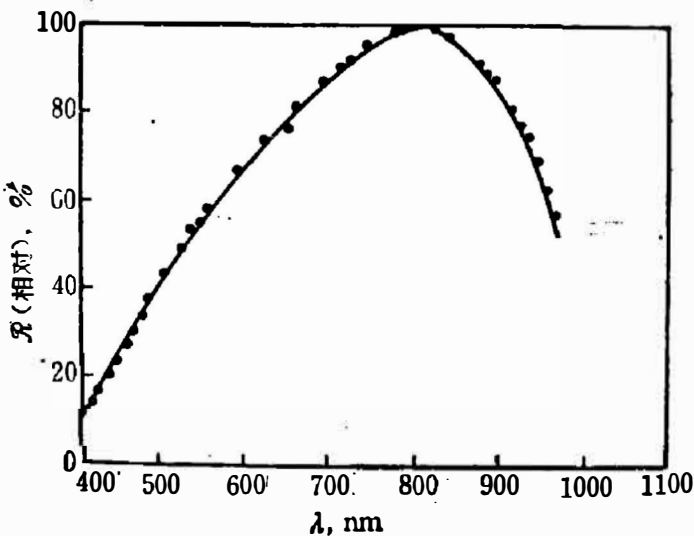


图 8 器件的响应率光谱分布  
Fig. 8 Relative responsivity of the device vs wavelength.

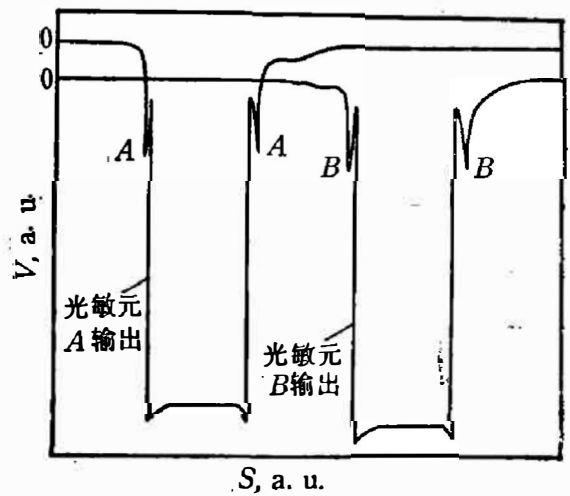


图 9 器件的光串音测试结果  
Fig. 9 Measured result of cross-talk between two adjacent elements.

用一小光点(直径约为  $30 \mu\text{m}$ ), 其光波长为  $632.8 \text{ nm}$ , 在器件上扫描, 同时记录相邻两个光敏元  $A$  和  $B$  的输出信号, 其典型的结果如图 9 所示. 从图 9 可以看到光点照在屏蔽铝与保护铝环之间的缝隙中得到了信号. 同时也可看出, 当光点照在  $A$  元件时, 元件  $B$  在测试灵敏度的范围内无信号输出. 同样, 光点照在  $B$  元件时,  $A$  也无输出. 因此, 可以得出结论: 器件的光串音在  $1\%$  以下.

#### 4.6 噪声电流频谱

用 HP3585 型频谱仪测试了器件的噪声电流频谱, 其典型的结果见图 10. 在  $30 \text{ Hz}$  以下是  $1/f$  噪声, 从  $30 \text{ Hz}$  至  $1 \text{ kHz}$  是散粒噪声, 而在更高频率时有介质噪声出现.

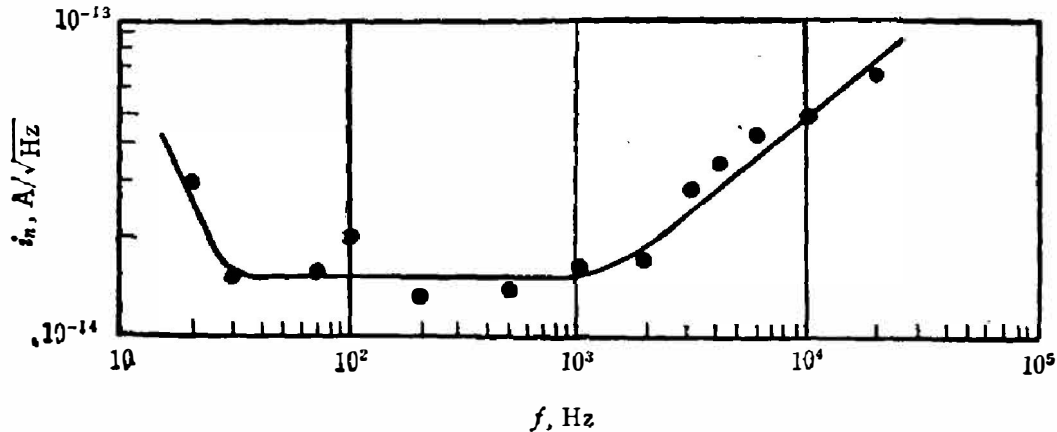


图 10 器件的噪声电流频谱

Fig. 10 Noise spectrum of the device.

上述测得的各项性能指标均能满足系统设计的要求(见表 1).

表 1 系统设计要求和器件实测值对照表

Table 1 Comparison of requirements in system design and the measured values of devices.

参 数	系统设计要求	器件实测值
响应率 ( $\text{A/W}$ )	0.15(0.48~0.53 $\mu\text{m}$ ) 0.25(0.53~0.58 $\mu\text{m}$ ) 0.30(0.58~0.68 $\mu\text{m}$ )	0.15 0.25 0.30
暗电流 $A$ ( $-10\text{V}$ , $25^\circ\text{C}$ )	$2.5 \times 10^{-8}$	$1 \sim 5 \times 10^{-11}$
结电容 ( $\text{pF}$ ) ( $-10\text{V}$ , $25^\circ\text{C}$ )	$< 35$	29
反向击 穿电压 ( $\text{V}$ )	$> 40$	60~100

为了适应空间应用的要求, 研制的器件必须经过严格的老化筛选和各种环模试验, 其中包括振动、冲击、离心、真空冷热浸、湿度、高能粒子辐照等等. 实践表明, 经过老化筛选的器件基本上都可通过各种环模试验.

## 5. 结 论

(1) 已经建立了根据对器件响应率光谱分布、暗电流、结电容的要求, 决定应选择的硅材料参数和有关的工艺参数的方法。根据由此方法决定的硅材料及工艺参数研制的三元线列硅探测器能很好地满足扫描辐射计使用的要求。

(2) 器件结构上采用的光敏元圆角化、加保护铝环等措施, 提高了器件的可靠性。

(3) 使用铝屏蔽和浓磷扩散的方法有效地防止了光敏面的扩大, 并使光串音降低到 1% 以下。

(4) 研制的器件各参数典型值如下: 在波长为 632.8 nm 时, 响应率为 0.3 A/W, 在 -10 V, 25°C 时暗电流为  $5 \times 10^{-11}$  A, 结电容为 29 pF, 反向击穿电压大于 60 V。这些参数都超过了扫描辐射计所要求的性能指标。器件通过了严格的老化筛选和各种环模试验, 因而能适应于空间环境的使用。

致谢——中科院上海技术物理所六室硅工艺组董健民等同志以及测试组董亮初等同志参加了本器件的研制工作, 在此深表感谢。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Paul G. Jespers et al., *Solid State Imaging Noordhoff International Publishing*, (1976), p29; 47.
- [ 2 ] Sze S. M., *Physics of Semiconductor Devices A Wiley-Interscience Publication*, (1981), p84.
- [ 3 ] Fitzgeralld D. J. and Grove A. S., *Physics of Failure in Electronics*, Vol. 4, Rome Air Development Center, (1966), p315.

## THREE-ELEMENT LINEAR SI DETECTOR FOR FY-1 METEOROLOGICAL SATELLITE

LIANG PINGZHI, ZHANG ZHONGTANG, SUN DEQING, TAN DEMING  
(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica, 200083, Shanghai, China)

## ABSTRACT

According to the requirements on responsivity spectrum, dark current and junction capacitance, Si material parameters and processing parameters for the detector have been determined. The layout and processing design of detectors, Al guard ring, Al light shield layer and heavy doping of P for improvement of reliability and light crosstalk are discussed. The responsivity of the developed detector is 0.3 A/W at 632.8 nm, dark current and capacitance are  $5 \times 10^{-11}$  A and 29 pF at -10 V, 25°C, respectively. They excellently satisfy the requirements of the scanning radiometer.

## 彩 图 说 明

彩图 a FY-1 气象卫星照片\*

Fig. a Photo of the FY-1 Meteorological Satellite

彩图 b 360 rpm 扫描辐射计的光学扫描器和信息处理器外形照片

Fig. b Photo of the optical scanner and information processor of the 360 rpm Scanning Radiometer.

彩图 c 辐射定标试验现场照片

Fig. c Field test of radiation calibration.

彩图 d 带防污染罩的辐射致冷器

Fig. d Radiant cooler with anti-contamination cover.

彩图 e 多通道光谱仪

Fig. e Multispectrometer.

彩图 f 真空容器内的定标现场照片

Fig. f Photo of field test of calibration in vacuum vessel.

彩图 g 扫描器外形图

Fig. g Configuration of the scanner.

彩图 h 风云一号气象卫星拍摄的红外云图

1988 年 9 月 20 日 14:30, 波段  $10.5\sim 12.5\mu\text{m}$

Fig. h Photo of infrared cloud scene taken by FY-1 Meteorological Satellite.

彩图 i 1988 年 10 月 4 日 06 GMT 20 号台风云系可见光云图

Fig. i The visible color picture for typhoon AELSON cloud system at 06 GMT 4 October 1988.

彩图 j 1988 年 9 月 7 日 06 GMT

短波槽云系可见光云图

Fig. j The visible color picture for the short wave trough cloud system at 06 GMST 7 September 1988.

彩图 k 风云一号卫星的东中国海假彩色图象

Fig. k False color image of FY-1 Satellite for the East China Sea.

彩图 l 风云一号卫星第四通道的渤海湾图象

Fig. l Image of the fourth channel of FY-1 Satellite for the BO Hai Bay.

\* 气象卫星照片由 509 所张丽英供稿。