

光伏型硅 X 射线探测器

张治国[†]

(泉州师范学院物理系, 泉州 362000)

摘要: 介绍了垂直多结器件的结构, 给出了热迁移制结的工艺条件和结果, 特别介绍了处理器件电极引线的隔离线方法, 解决了经过热迁移掺杂后光刻电极套不准的难题, 以及把所有 p 型区域连接起来的问题, 达到了敏感区金属零遮挡的目的. 同时分析了工艺条件对器件性能的影响. 通过对敏感区和无效区的计算和对比, 对器件的几个电流参数进行了详细的计算; 对两种靶材的标识谱在器件内产生的光电子的收集效率做了计算, 对器件的光谱响应度也作了计算和分析; 同时对器件窗口材料的选择进行了详细讨论; 最后叙述对器件进行的实验验证, 通过对金属模板上模拟缺陷的测量, 证明器件有足够的灵敏度和分辨率.

关键词: 探测器; 垂直多结; X 射线

PACC: 7820J; 7870D

中图分类号: TN364⁺. 1

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)07-1294-06

1 引言

目前, 对大型金属拼焊件焊缝的质量检查, 仍旧沿用费用较低的拍片法、超声法等方法. 虽有高技术设备投入使用, 但是价格昂贵, 对于大规模工业生产的产品如煤气管道、天然气管道等在线检验、拍片更是困难的事. 有鉴于此, 为了实现自动化生产, 国外早已出现了探头检测式自动化装置, 这种装置价格低廉, 实用性强, 故得到人们的普遍重视. 目前国内生产的可用于 X 射线方面的探头大致有以下几种: 硅锂探头、锗锂探头、pin 型探头、金硅面垒型探头. 但是这几种探头都要求有一个稳定的高压电源, 其次, 它们只适用于单位时间几个乃至几千个光子的辐照量. 硅锂、锗锂探头价格昂贵且保存环境苛刻. 近些年来, 大家对半导体光电探测器的研究主要在减小暗电流、增加灵敏区、减小无效区方向的努力^[1-5]. 为了增加灵敏区体积, 大多数设计者都设计了反偏压. 若研制一种像光电池一样的 X 射线探头, 它既不需要高压电源、苛刻的保存条件, 也不要复杂的制作工艺和昂贵的成本, 而且寿命长, 适应较大剂量辐射和较大的 X 光强度变化, 这才是无损检测条件下所适用的. 本文介绍的就是这种 X 射线探测元件.

2 实验及电极问题

2.1 实验及工艺

对于平面 PN 结来说, 要得到一个大的灵敏区

须选用昂贵的高阻单晶, 而且还要加上一个反偏电源以取得足够厚的敏感区. 垂直多重结结构具有天生的灵敏区厚度(硅片厚度). 热迁移掺杂工艺^[6-9]就可以方便地实现垂直多重结的制作. 目前我们的热迁移掺杂工艺水平可以达到 1 ~ 3mm/h 的制结速度. 针对器件的特点, 选用电阻率为 60 $\Omega \cdot \text{cm}$, 晶向为 111, 厚度为 1mm 的 n 型硅单晶片, 之后利用光刻工艺在硅片表面制成深 40 ~ 50 μm , 宽 140 μm 的沟槽阵列, 间隔 300 μm ; 在刻好沟槽的表面蒸发一层 20 μm 厚的 Al, 再去掉沟槽外边的 Al, 只留下沟槽内的 Al. 最后将其放入自己研制的真空热迁移炉内^[10,11], 高温面温度控制在 1000 $^{\circ}\text{C}$, 温度梯度控制在 90 $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$, 时间 2h, 之后迅速降温, 取出片子. 磨掉背面多余的铝, 这样就制成了垂直多重结, 如图 1 所示.

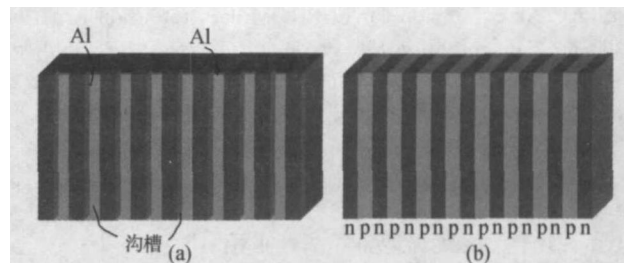


图 1 (a) 在腐蚀好的沟槽内淀积铝; (b) 在热迁移掺杂之后形成 p-n 相间的垂直结阵列

Fig. 1 (a) Disposing Al in corroded grooves; (b) p and n vertical multi junction array formed after thermo-migration

[†] 通信作者. Email: qzzzg@yahoo.com.cn

2005-12-02 收到, 2006-02-09 定稿

2.2 电极问题

热迁移掺杂后的 pn 结电极引线一直是个难题.乍看起来只要在图 1(b) 所示的左右两端寻找一个 n 区和一个 p 区镀上电极就可以形成 pn 阵列的串联使用,但是稍加留意就发现它们原来是一列背靠背的 pn 结阵列,根本就不能简单地串联使用.要串联使用必须设法间隔地短路一个 pn 结才行.然而要间隔地短路一个 pn 结实际上是件非常不容易的事;其次,这还会使器件的敏感区减少一半,显然是得不偿失的.对于并联使用情况,分别在 p 区和 n 区敷设电极事实上也有困难.由于晶体的微缺陷和掺杂时温度梯度方向的微小偏斜使得掺杂后的 p 型区不像图 1(b) 那样整齐,特别是微缺陷可以导致杂质 Al 在经过 1mm 的迁移之后,使得某个 p 型区发生较大的偏斜.这使得光刻电极时版图无法套准原图形.再者,金属电极遮挡敏感区是不希望发生的.针对这些情况,在反复考虑后,在原始版图的纵向线阵列上增加一条横线,目的是在掺杂后形成的横向 p 型层将芯片隔离成两个区域,左边是敏感区,右边是为电极敷设留下的面积.这样做有几个好处:一是 p 型隔离层可以把所有的 p 区域连接起来,形成二极管阵列的并联;二是避免了电极金属层对敏感区的遮挡;三是解决了金属电极光刻套不准的难题;四是利用了 Al 的最大固溶度^[12],形成良好的欧姆接触.具体结构如图 2 所示,这一技术未见报道.

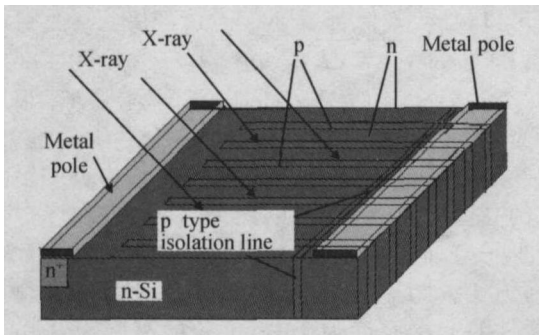


图 2 p 型隔离线把芯片分为敏感区和电极敷设区

Fig. 2 p layer isolation line formed sensitivity and laying electrode region

3 器件主要性能及参数

垂直结结构的灵敏区是由许许多多片状区域叠合而成,如图 3 所示.要得到较大的灵敏区体积就必须提高结密度.光伏型探测器和雪崩型探测器都需要厚的灵敏区,这当然是为了适应不同能量的光子的需要.较高能量的光子在穿入晶体内很深的地方才能被吸收,这就要增加灵敏区厚度才能适应.特别是原子序数较低的硅更应如此.垂直结光伏型探测

器的灵敏区由三部分组成.如果设芯片厚度为 h ,则一部分是耗尽层 $X_m h$,另外两部分是与结相邻的少子扩散长度 L_n, L_p 有关,而且主要贡献区是 $1/3(L_n + L_p) h$,在零偏压下工作的 X_m 较小.在 VMJ 光电器件的设计中,在工艺条件允许的情况下尽量减少无效区(死区)尺度,即可得到较高的收集效率.如果 $l - \frac{2}{3}L = 0$,收集效率可达 99%.由于 Si 的原子序数较低,它的内量子效率取下限 1,这样不会高估器件性能.对于一般的无损检验、测厚、探伤等应用来说,首先是要使用方便、体积小、价格低.在一般检测情况下,探头输出的电压信号足够大就可以了.

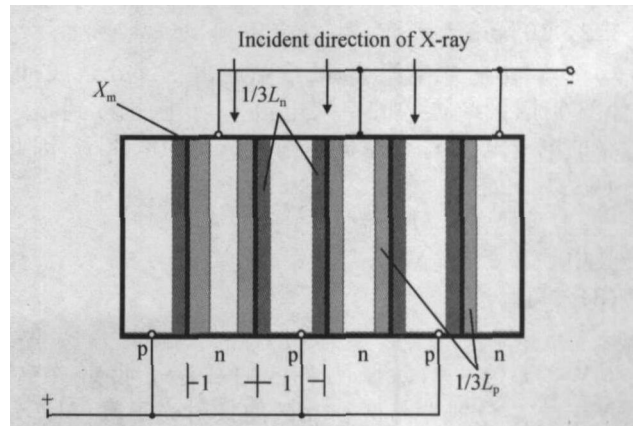


图 3 多重结的敏感区由耗尽层、电子扩散区和空穴扩散区组成及并联连接示意图

Fig. 3 Sensitivity regions of multijunction region made of depletion regions, electron diffusion layers and hole diffusion layers, and in-parallel

3.1 器件的几个主要参数

在高能光子辐照下器件的光生开路电压为

$$V_{oc} = \frac{kt}{q} \ln \left(\frac{J_p}{J_o} + 1 \right) \tag{1}$$

其中 J_p 为光电流; J_o 为 pn 结反向漏电流.由(1)式可见,要使 V_{oc} 较大, J_p 就得较大, J_o 就得较小. J_o 的表达式为

$$J_o = qn_i^2 \left[\frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{kt\mu_n}{q}} + \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{kt\mu_p}{q}} \right] \tag{2}$$

其中 N_A 为热迁移掺杂浓度; N_D 为 n 区浓度; μ_p, μ_n 分别为非平衡少子空穴和电子的迁移率; τ_p 和 τ_n 分别为少子空穴和电子的寿命.从(2)式来看, J_o 小就使 N_A 和 N_D 较大,但是这两个参数增大势必导致 τ_n 和 τ_p 减少,反过来又使 J_o 增加,这是一个相互制约的关系.如果求 $d(N_A \tau_n) / dN_A = 0$ 和 $d(N_D \tau_p) / dN_D = 0$ 的关系,使 N 之积为一最大值的方法,理论上也可找其最佳值,但是却受到工艺上的限制不能实现.因而这个问题还需综合考虑,应从工艺条件

出发决定其参数. 这当然会牺牲 J_0 的一些贡献. 那就只能是在工艺条件决定的前提下尽可能地减小 J_0 . 比如在工艺条件下 N_A 只能是一个定值, 即 Al 在 Si 中的最大固溶度. 对 N_D 的选取又要考虑到器件的灵敏区域 (单元 pn 层尺寸由于工艺条件限制又不能很小, 即使可能做到很小, pn 结面积势必增大, 同样会导致 J_0 增大. 故而 N_D 就不能太大). N_D 较小可以使得单元 pn 层尺寸放宽, 使器件的收集率提高. 更重要的是如选取一些大电阻率的材料 ($\rho = 1/qN_D\mu$), 但高阻材料在一般工艺下表现得很不稳定, 一旦经过热处理其电阻率变化几倍甚至几十倍. 统筹考虑, 顾及到工艺条件、收集率等方面的因素, 采用 $50 \sim 60 \mu\text{m}$ 的 n 型 Si 单晶材料. $N_A = 1.2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ [7], N_D 由查表得到, 算得 $J_0 = 9.6 \times 10^{-12} \text{A/cm}^2$. 光电流 I_{ph} 的贡献应由三部分组成, 即 n 区扩散到结边缘的空穴电流 i_p , p 区扩散到结边缘的电子电流 i_n 和空间电荷区产生的电流 i_c , 因此 I_{ph} 为

$$I_{ph} = i_n + i_c + i_p \quad (3)$$

其中 $i_n = q n N_{ph1}$; $i_p = q p N_{ph2}$; $i_c = q c N_{phc}$, 故 (3) 式可写成

$$I_{ph} = q (n N_{ph1} + p N_{ph2} + c N_{phc}) \quad (4)$$

其中 i ($i = 1, 2, c$) 为各区的载流子收集效率; N_{ph1} , N_{ph2} 分别为 n 区和 p 区的入射光子数; N_{phc} 为空间电荷区的光子数; $c = 1$. 并设内量子效率为 1. 改写 (1) 式为

$$I_p = I_0 [\exp(qV_{oc}/kt) - 1] \quad (5)$$

考虑到器件内阻的影响, 将 (5) 式修改为

$$I_p = I + I_0 \{ \exp[q(V + IR_s)/kt] - 1 \} + V/R_{sh} \quad (6)$$

其中 I 为测量电路总电流; V 为输出电压; R_s 为器件内阻; R_{sh} 为并联等效电阻. 由 (6) 式第二项可求出器件正向电流 I_D ,

$$I_D = I_0 [\exp(q(V + I_D R_s)/kt) - 1] \quad (7)$$

其中 V 为负载上的电压; I_D 为流过内阻 R_s 的电流, 它是流过分路电阻与负载电阻电流之和. V 由仪器测出, 负载电阻可视为测量仪器的内阻. 这两个值是现成的, 负载电阻 R 为 $1 \text{M}\Omega$. R_{sh} 可由反向漏电流的斜率确定, 即 $dV/dI = R_{sh}$, 按理反向漏电流应为一定值, 即 I_0 , 但实际上从被测曲线很难确定 I_0 之值, 所测曲线是一条斜线, 这可以认为是由 R_{sh} 引起的, R_{sh} 应是一个定值, 所测斜率是由恒定值 I_0 与流过 R_{sh} 叠加形成的. 在正向偏压下 R_{sh} 仍流过一定的电流. 我们测得四个器件的平均值约为 $21.7 \text{k}\Omega$, 算得 $I_{sh} = 0.0018/21666 = 8.3 \times 10^{-8} \text{A}$, $I = 0.0018/10^6 = 1.8 \times 10^{-9} \text{A}$, $I_D = I + I_{sh}$ 约为 $8.48 \times 10^{-8} \text{A}$. 这样, 光电流为 $I_{ph} = I + I_D = 3.128 \times 10^{-7} \text{A}$, 有效光子数为 $N^* = I_{ph}/q = 1.955 \times 10^{12} \text{s}^{-1}$. N^*

为 n 区有效区和 p 区有效区以及空间电荷区被吸收的光子数 (内量子效率为 1).

3.2 效率

为了简单起见, 将 n 区和 p 区的入射光子数 N_{ph1} , N_{ph2} 以及 n , p 分别折合为一个数, 则 (4) 式应为

$$I_{ph} = q (N_{ph} + N_{phc}) \quad (8)$$

进入器件表面的总光子数为四部分之和, 即 $N = N_{ph1} + N_{ph2} + N_{phc} + N_{pho}$ 或 $N = N_{ph} + N_{phc} + N_{pho}$. 其中 N_{pho} 为无效区的入射光子数; 有效光子数应为

$$N_e = N_{ph} + N_{phc} \quad (9)$$

假定无效区与有效区有明确的界限, 则可写出耗尽区与另外两个有效区入射光子数之比

$$\frac{N_{pho}}{N_{ph}} = \frac{3 X_m}{L_n + L_p} \quad (10)$$

其中 X_m 为空间电荷区宽度. 由 (9) 和 (10) 式联立解出 N_{phc} 以及 N_{ph} , 分别为

$$\begin{cases} N_{ph} = \frac{N_e (L_p + L_n)}{L_p + L_n + 3 X_m} \\ N_{phc} = \frac{3 X_m N_e}{L_p + L_n + 3 X_m} \end{cases} \quad (11)$$

由上两式可以看出, 只要 $L_p + L_n \gg X_m$, N_{ph} 就非常接近 N_e . 对于 $50 \sim 60 \mu\text{m}$ (实取 $55 \mu\text{m}$) 的 n 型单晶来说, 由查表得空穴扩散长度 $L_p = 200 \mu\text{m}$ 而 $X_m = 1.1 \mu\text{m}$, 所以上述条件满足. N_{phc} 与 N_{ph} 比起来可以忽略. 实际计算 $N_{phc} = 0.0133 N_e$, 改写 (7) 式可以求出 η , $\eta = (I_{ph} - qN_{phc})/qN_{ph} = 0.986$, 可见 η 接近于 c , 约为 1. 空间电荷区宽度 X_m 很小, 它对光电流的贡献也很小. 故而可以认为 η 是整个有效区的收集率. 在热迁移制结的过程中, 硅晶体所经历的高温时间较短, 可以认为这样的短时间热处理对少子寿命影响不大. 即使 p 型冶金层的 L_p 有出入, 但 $L_n \ll L_p$, 故 L_n 对 $L_p + L_n$ 这个值影响不大. 器件的 p 层厚度为 $140 \mu\text{m}$, n 层厚度为 $300 \mu\text{m}$, 这样每个敏感单元层厚度为 $70 \mu\text{m} + 150 \mu\text{m}$, 把这个尺寸再减去有效区厚度 $1/3(L_n + L_p)$, 剩下的 $146 \mu\text{m}$ 为无效区. 即每个厚度为 $220 \mu\text{m}$ 的单元只有 $74 \mu\text{m}$ 对光电子有贡献, 其他无贡献. 无效入射的光子数为

$$N_{pho} = N - N_e = \frac{N_e}{3} \frac{1}{(L_n + L_p) + X_m} \quad (12)$$

其中 N 为整个晶体内吸收的光子数; X_m 为无效区宽度 (这里 $X_m = 146 \mu\text{m}$). 计算得 $N_{pho} = 3.86 \times 10^{12} \text{s}^{-1}$; $N = 5.82 \times 10^{12} \text{s}^{-1}$ 对于不同波长的 X 射线在硅内被吸收的量也不同, 因此器件在不同光波下使用效率就可能不一样. 在垂直于表面 x 处的光强 $I(x)$ 与 x 的关系为

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \tag{13}$$

改写为 $I(x)/I_0 = e^{-\mu x}$ ，其中 μ 为硅材料对 X 光的吸收系数； I_0 为 $x=0$ 时的光强。已知钼靶和铜靶的质量吸收系数分别为 $\mu_{m1} = 6.70(\text{Mo K})$ ； $\mu_{m2} = 62(\text{Cu K})$ ； $\rho_{\text{Si}} = 2.33\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ； $\mu_m = \mu/\rho$ ，故 $\mu_{\text{CuK}} = 140.5$ ； $\mu_{\text{MoK}} = 15.6$ ；透过硅片的光子与入射光子的比值为 $B_{\text{CuK}} = 0$ ； $B_{\text{MoK}} = 0.34$ ；总的射入器件表面的光子数

$$N_0 = N + N_{tr}； N_{tr} = BN_0 \tag{14}$$

对于铜靶的 X 射线 K 来说， $N_{tr} = 0$ ；对于 K (Mo) 来说，计算得 $N_{tr} = 1.95 \times 10^{12}$ 故有 $N_{\text{CuK}} = 5.82 \times 10^{12}$ ； $N_{\text{MoK}} = 7.77 \times 10^{12}$ ；器件的总收集效率为

$$= \frac{I_{ph}}{qN_0} \tag{15}$$

因此可以得到铜和钼两个 K 线系的收集效率 $\eta_1 = 0.34$ ； $\eta_2 = 0.25$ 。

3.3 器件的光谱响应度

光伏型探测器的光谱响应度为 $R = q R_s / E$ 也可写成

$$R = 10^7 \frac{q R_s}{hc} \tag{16}$$

其中 λ 为入射光波长； h 为普朗克常数； c 为光速。将 $\lambda_1 = 0.1542\text{nm}$ ， $\lambda_2 = 0.0711\text{nm}$ 分别代入 (16) 式有 $R_1 = 3.34 \times 10^{-3} \text{V/W}$ ； $R_2 = 1.15 \times 10^{-3} \text{V/W}$ ，其中 λ_1 ， λ_2 分别为铜靶和钼靶的 K 线的波长。开路情况下光谱探测灵敏度为

$$D^* = \left(\frac{qA}{2hc I_0} \right)^{1/2} \tag{17}$$

将探测器窗口面积 $A = 1.44\text{cm}^2$ 代入得 $D_1^* = 3.0 \times 10^9 \text{cm} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ ； $D_2^* = 1.0 \times 10^9 \text{cm} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ ；响应时间为 $\tau_c = R_T C$ ，其中 C 为 pn 结电容， R_T 为器件串联电阻与负载电阻的并联值，改写上式为

$$\tau_c = \frac{R_s R_L}{R_s + R_L} \times \sqrt{\frac{q_0 N_A}{2V_D}} A \tag{19}$$

对于负载电阻 $R_L \gg R_s$ 的情形，可将上式近似写成

$$\tau_c = R_s A \sqrt{\frac{q_0 N_A}{2V_D}} = R_s \times \frac{q_0}{X_m} A \tag{20}$$

将我们的器件数据代入上式有 $\tau_c = 3.38 \times 10^{-6} \text{s}$ ，约为微秒数量级。

4 窗口材料及器件的应用

4.1 窗口材料

窗口材料的选择是重要的，器件对材料的要求是对入射光子的吸收越小越好。一般选择原子序数低的材料(比如铍)。从探伤和测厚的工作原理中可

以看到，探头所测到的 X 射线主要由两部分组成。一部分是 X 光穿透被测物质的透射部分，另一部分是 X 射线与被测材料作用后所产生的荧光射线。透射线平均硬度较大，而荧光则波长分布范围较广。在探伤及测厚过程中主要是测量透射线相对强度的变化，对荧光射线要尽可能地排除掉。这就要求透射线在经过窗口时尽量不被吸收；窗口应能吸收绝大部分荧光而阻止其进入硅片；材料应有稳定的化学性能，还要有较高的机械强度。故选铝箔作为窗口材料。铝箔可以有效吸收 0.19nm 以上的射线。比如对于探伤与测厚应用几率较大的钢材、铁铸件，他们的主要荧光波长约为 0.19nm 左右，故而可以被铝窗有效地吸收(铝对 0.19nm 的 X 光线的吸收系数为 250cm^{-1})。而它对 0.07nm 以下的透射线则吸收较小(吸收系数为 14.3cm^{-1})，可以顺利通过。如果窗口材料不能有效地吸收荧光的话，当荧光强度与透射线强度不能忽略或近于相等的话，探头的相对灵敏度就会下降，一些微小缺陷不能被发现。其二，铝在空气中很易生成氧化膜，它能在一般环境中不被侵袭，又具有较好的延展性，不易被损。其三，铝的主要荧光波长很长(约 0.8nm 左右)，即使它所吸收的射线也会转化为长波射线(0.8nm)，这就很容易被芯片表面的 150~200nm 厚的 Al_2O_3 钝化膜吸收而变为热量散掉。现在以吸收 80% 的波长为 0.19nm 的应用几率较大的铁物质荧光射线为基准，来确定窗口厚度。熟知的公式为

$$x = - \frac{1}{\mu} \ln \frac{I(x)}{I_0} \tag{20}$$

将 $\mu = 250$ 及 $I(x)/I_0 = 0.2$ 代入上式得 $x = 0.00643\text{cm}$ ，约为 $64\mu\text{m}$ ，取 $70\mu\text{m}$ 。芯片表面钝化膜材料 Al_2O_3 ；钝化膜厚度 150~200nm；外壳用黄铜制成，窗口面积为 $1.8\text{cm} \times 0.8\text{cm}$ 。

4.2 器件的实用检验与性能

为了检验器件的实用效果，加工了厚 16mm 直径 300mm 的圆形钢板，在距外边缘 10mm 处分别相间打了不同深浅的 11 个洞，将圆盘装在转动惯量实验仪的轴上，轴上缠绕细绳，拉动细绳圆盘就可以转动起来，同时人可以远离 X 光机；将探头固定在圆盘的下面，距钢板 3mm；X 光机的出光口距钢板约 10cm。调节 X 光管窗口平面与钢板平行，并设法使模盘上的洞和探头窗口对准。探头的输出端通过电缆连接到 SR-54 型超低频示波器，开启 X 光机，拉动细绳这时在示波器的屏幕上看到 11 个高矮不同的方波脉冲，最高为 24mV，最低约为 1mV。脉冲宽度显示了孔洞的直径，脉冲高度显示了孔洞的深浅。特别是，为了考察器件对不同强度的 X 光照射时的输出情况，测量了在不同管电压和管电流产生的 X

光的照射下器件的输出情况,输出光电压与 X 光的照射强度有很好的线性关系,如图 4 和图 5 所示.

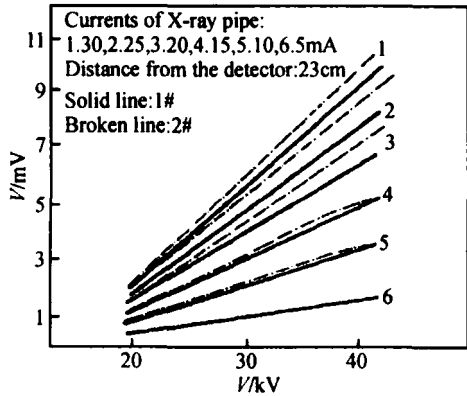


图 4 1# ,2# 探测器的输出电压与 X 光管的电压电流关系
Fig.4 Relationship between the output voltage of the 1# ,2# detectors and the voltage & current of the X-ray pipe

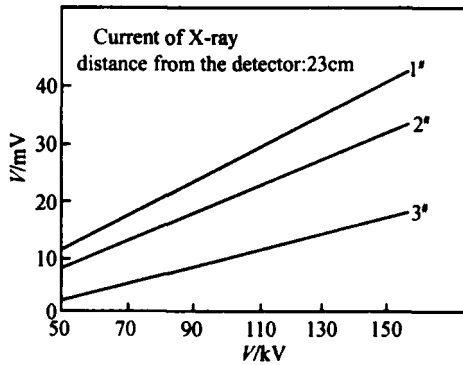


图 5 1# ,2# ,3# 探测器的输出电压与 X 光管的电压电流关系
Fig.5 Relationship between the output voltage of the 1# ,2# ,3# detectors and the voltage & current of the X-ray pipe

5 结论

(1) 该器件是一种光伏型探测元件,基本符合设计要求.以应用较广的铜、钼靶光源为例,对于 Cu K 谱响应度为 3.3mV/W.对于 Mo K 谱线的响应度为 1.2mV/W.器件在强光下仍表现出非凡的线性输出而不损坏^[8].(2) 探测器有较高的收集效率.(3) 器件的灵敏度可由器件调节因子 $l - \frac{1}{3}L_p$ 和 $l - \frac{1}{3}L_n$ 调节.若要敏感度大些就使它们的差值

较小,若要敏感度小,就使它们的差值大些.敏感调节因子是设计不同用处探测元件的重要依据之一.(4) 响应时间较短.能够完全适应于一般工作的需要.如果是测量线状缺陷还可以将芯片立起来用.

参考文献

[1] Sheng Liyan, Han Dejun, Zhang Xiurong, et al. Reduction of "dead region" of silicon stripe detectors by guard ring structure. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(2) :198 (in Chinese) [盛丽艳, 韩德俊, 张秀荣, 等. 带保护环结构的条形 X 光阵列探测器. 半导体学报, 2003, 24(2) :198]

[2] Shao Chuanfen, Zhu Meihua, Shi Changxin. Irradiation characteristic of GaAs microstrip particle detectors. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(2) :221 (in Chinese) [邵传芬, 朱美华, 史常忻. GaAs 微条粒子探测器的辐照特性. 半导体学报, 2003, 24(2) :221]

[3] Dai Zhenhua, Xie Jinshan, Xia Yinghua, et al. Study of high speed mesa silicon avalanche photodiodes. Chinese Journal of Semiconductors, 1983, 4(5) :478 (in Chinese) [戴振华, 解金山, 夏应华, 等. 高速台型硅雪崩光电二极管的研制. 半导体学报, 1983, 4(5) :478]

[4] Ning Baojun, Zhang Taiping, Zhang Lu, et al. Silicon PIN photodiode for UV and blue spectral regions. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(2) :174 (in Chinese) [宁宝俊, 张太平, 张录, 等. 紫外和蓝光区域硅 PIN 光电二极管. 半导体学报, 2002, 23(2) :174]

[5] Wang Jun, Zhao Degang, Liu Zongshun, et al. GaN Schottky barrier ultraviolet detector. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(6) :711 (in Chinese) [王俊, 赵德刚, 刘宗顺, 等. GaN 肖特基势垒结构紫外探测器. 半导体学报, 2004, 25(6) :711]

[6] Anthony T R, Cline H E. Method of making isolation grids in bodies of semiconductor material. US Patent, 3 904 442, 1975

[7] Cline H E, Anthony T R. Thermomigration of aluminum rich liquid wires through silicon wafer. J Appl Phys, 1976, 47(6) : 2332

[8] Cline H E, Anthony T R. High-speed droplet migration in silicon. J Appl Phys, 1976, 47(6) :2325

[9] Anthony T R, Cline H E. Deep-diode arrays. J Appl Phys, 1976, 47(6) :2550

[10] Zhang Zhiguo, Yan Guang. A thermomigration doping equipment of using carbon electric heater. Equipment for Electric Products Manufacturing, 1989, (2) :29 (in Chinese) [张治国, 燕光. 用石墨做电热器的热迁移掺杂设备. 电子工业专用设备, 1989, (2) :29]

[11] Zhang Zhiguo, Wu Qiaolan. Design of main parts for thermomigration doping equipment. Equipment for Electric Products Manufacturing, 1991, (4) :26 (in Chinese) [张治国, 吴巧兰. 热迁移掺杂设备主要部件技术指标设计. 电子工业专用设备, 1991, (4) :26]

[12] Zhang Zhiguo, Wu Qiaolan. Measurement of thermomigration doping concentration. Semiconductor Technology, 1994, (2) : 55 (in Chinese) [张治国, 吴巧兰. 热迁移掺杂浓度分布的测量. 半导体技术, 1994, (2) :55]

A Photovoltaic Si X-Ray Detector

Zhang Zhiguo[†]

(Department of Physics, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China)

Abstract : The structure of a vertical multijunction detector is presented. The workmanship conditions and results of thermomigration are presented. The insulation line method of disposing electrode wire is introduced, and the problem of photoetching an electrode after thermomigration is solved. Additionally, the effects of the workmanship conditions on device performance are analyzed. Through contrasting the sensitivity region and the inefficacy region, several current parameters of the vertical multijunction detector are calculated. In particular, the efficiency of collecting photoelectrons excited in the device for two X-ray marker spectra that come from two targets is calculated. The spectrum responsivity of the device is calculated and discussed, and the selection of window material of the device is discussed. Finally, through measuring the simulation defects in the metal mouldboard, the device is proved to have sufficient responsivity and distinguishability.

Key words : detector; multijunction; X-ray

PACC : 7820J ; 7870D

Article ID : 0253-4177(2006)07-1294-06

[†] Corresponding author. Email : qzzg @yahoo . com . cn

Received 2 December 2005 , revised manuscript received 9 February 2006