

垂直多结光伏型集成硅 X 射线探测器的实现和实验

张治国

Realization and experiment of vertical multijunction integrated photovoltaic Si X-ray detector

Zhang Zhi-Guo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **63**, 248501 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.248501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.248501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2014/V63/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

堆叠栅介质对称双栅单 Halo 应变 Si 金属氧化物半导体场效应管二维模型

Two-dimensional model of symmetrical double-gate strained Si single halo metal-oxide semiconductor field effect transistor with gate stack dielectric

物理学报.2014, 63(24): 248502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.248502>

应变(001)p型金属氧化物半导体反型层空穴量子化与电导率有效质量

Hole quantization and conductivity effective mass of the inversion layer in (001) strained p-channel metal-oxid-semiconductor

物理学报.2014, 63(23): 238501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.238501>

直接带隙 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 本征载流子浓度研究

Study on intrinsic carrier concentration of direct bandgap $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$

物理学报.2014, 63(23): 238502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.238502>

对称三材料双栅应变硅金属氧化物半导体场效应晶体管二维解析模型

Two-dimensional analytical models for the symmetrical triple-material double-gate strained Si MOSFETs

物理学报.2014, 63(14): 148502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.148502>

ZnO 半导体电导型 X 射线探测器件研究

Study of ZnO photoconductive X-ray detector

物理学报.2014, 63(9): 098502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.098502>

垂直多结光伏型集成硅X射线探测器的实现和实验*

张治国†

(泉州师范学院功能材料研究所, 泉州 362000)

(泉州师范学院物理与信息工程学院, 泉州 362000)

(2014年6月11日收到; 2014年8月21日收到修改稿)

介绍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; 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, 解决了把所有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. 描述了利用展宽电极尺度的方法实现多单元器件的集成; 给出了X光强与光电流电压之间的数学模型和几个重要参数, 介绍了器件输出电压与X光强度之间的测量关系, 理论与实际情况符合得很好. 最后对测量数据做了分析, 证明器件有足够的灵敏度和分辨率.

关键词: 垂直多结, 集成X射线探测器, 性能及测量**PACS:** 85.25.Oj, 85.30.De, 85.30.Kk**DOI:** 10.7498/aps.63.248501

1 引言

X射线探测器的应用非常广泛, 如高能天文、同步辐射装置、X射线荧光探矿、金属零件无损检验、金属板测厚、微电子器件电极质量检验、医学监测检验成像等. 对X射线探测器的研究也视应用领域的不同而不同. 比如, 医用探测器应该是越灵敏越好^[1-6], 用于对大型金属拼焊件焊缝的质量检测和铸件砂眼检验的探测器则需要对光强有较高的分辨率. 目前, 后者仍沿用费时的拍片法、超声法等. 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、拍片更为困难. 实现自动化生产, X射线探测器用于在线检测是必要的, 该装置价格低廉、实用性强. 目前国内生产的可用于X射线方面的探测器大致有以下几种: 硅锂探头、锗锂探头、PIN型探头、金硅面垒型探头等. 但是这几种探头都要有一个稳定的高压电源, 其次, 它们只适用于低能量、弱光强的辐照量探测. 硅锂、锗锂探头价格昂贵且保存环境苛刻. 近年来, 对闪烁晶

体探测器进行了改良, 使之适用于更宽能量范围1 keV—1 MeV^[7]; 一种新型快塑料闪烁体探测器也在研究^[8]; 同时, 利用化合物半导体ZnSe, ZnO和金刚石的诱发光电导来测量X射线^[9-11]有潜在的优势. 为了提高载流子输运速度, 在二极管结构的活性层中加了有机物, 提高了载流子的迁移率^[12]. 为了提高对X射线谱的分辨率, 采用固体制冷器冷却normal-metal/insulator/superconductor NIS隧道结收到了很好的效果^[13]. PIN二极管在X射线探测中的应用, 具有很好的位置分辨率^[14]. 如果研制一种像光电池一样的X射线探测器, 不要高压电源, 无需苛刻的保存条件, 制作工艺不复杂, 成本较低, 适应较大的X光强度变化和能量变化, 才是无损检测条件下所适用的. 垂直多结X射线探测器在这方面有一定的优势^[15], 尝试了一种新型廉价的X射线敏感元件, 使得用热迁移工艺制成的深PN结得以应用. 本文就是在单元探测器的基础上, 把这样一种X射线探测单元按照集成电路的原理设法集成起来, 使之能够输出更大的信号电压和适应于更高能量X射线的应用.

* 福建省高校服务海西建设重点项目(批准号: A100)和内蒙古自然科学基金(批准号: 86044)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: qzzzg@aliyun.com

2 实验及电极问题

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大的敏感区.垂直多重结结构具有内秉的灵敏区厚度(硅片厚度),热迁移掺杂工艺^[16-18]就可以方便地实现垂直多重结制作.目前我们的热迁移掺杂工艺水平可以达到0.5—1 mm/h的掺杂速度.针对器件的特点,选用电阻率为60 Ω·cm,晶向为<111>,厚度为1 mm的N型硅单晶片,然后利用光刻工艺在硅片表面制成深为40—50 μm,宽60—80 μm的沟槽阵列,间隔200—300 μm;在刻好沟槽的表面蒸发一层20 μm厚的铝,再去掉沟槽外的铝,只留下沟槽内的铝.最后将其放入自行研制的真空热迁移炉内,见图1.硅片高温面温度控制在1000 °C,温度梯度控制在90 °C/cm,对于1 mm厚的硅片,两个面的温差为9 °C.温度梯度由精密温度控制器和冷却水控制器分别控制高温电热板和低温水冷却板形成,时间为2 h.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2(a), (b)所示.在被上电极后,用直流溅射法在芯片表面淀积一层Al₂O₃膜.在淀积Al₂O₃膜时,真空室须经过2—3次的洗氧程序,且将氧压调节到一个合适点(10 Pa),气体离化时呈纯黄色.

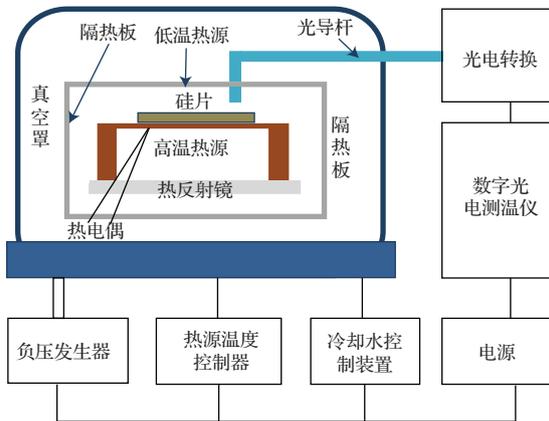


图1 热迁移掺杂设备示意图

热迁移掺杂后的PN结电极引线问题一直是个难题.初步看来,只要在图2(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,能够注意到它们是一列背靠背的串联PN结,这样阵列产生的光电压是互相抵消的,因此不能这样形成串联.要串联使用,必须设法间隔短路一个PN结(然而,要间隔短路一个

PN结实际上非常不易);其次,这还可以使器件的敏感区减少一半,得不偿失.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2(b)那样整齐,特别是微缺陷可以导致杂质铝在经过1 mm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中原图形.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型区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.这样做有如下优点:一是横线P型隔离区可以把所有的P区域连接起来(形成二极管阵列的并联连接);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;四是利用了铝在硅中的最大固溶度^[19],形成良好的欧姆接触,具体结构如图3所示.从图3和图4可以看出,每一个P型区是两个背靠背的二极管,PN结阵列等效于二极管阵列,见图5.

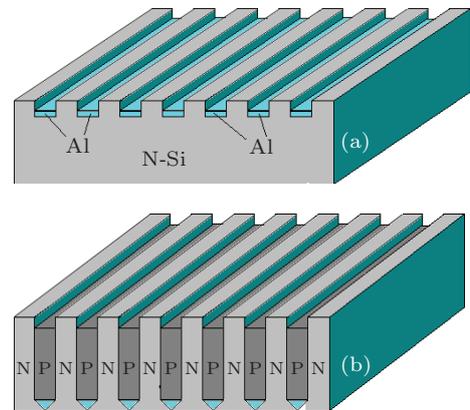


图2 热迁移掺杂工序 (a)在刻好的沟槽内淀积铝;(b)在热迁移掺杂之后形成PN相间的垂直结阵列

能否进一步提高器件的输出电压,或者说进一步提高器件对X射线的吸收,对探测器来说是至关重要的.显然,只要增加如图3所示的敏感单元数目,这一问题就能够解决.可以看出,由于上述问题用一般的集成电路工艺对1 mm左右厚度的硅片进行集成是难以实现的.一个新思路是:敏感器单元在制作时的图形在硅片表面是以阵列形式出现的,只是在制作电极时才把它们切割成如图3的单元形式.如果在制作N⁺区之后不是将它们切割成单元块而是将它们切割成条形,在敷镀电极的时候

用金属将隔离线右边的P区和它附近的N⁺区覆盖,即把前一个二极管阵列单元的正极和下一个二极管阵列单元的负极短路,形成串联形式,依次重复这一工作就可以形成如图7所示的集成式二极管阵列,其等效电路见图6.

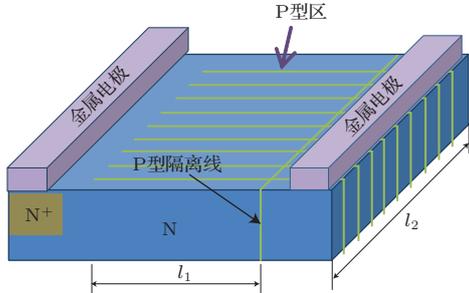


图3 P型隔离线把芯片分为敏感区和电极敷设区

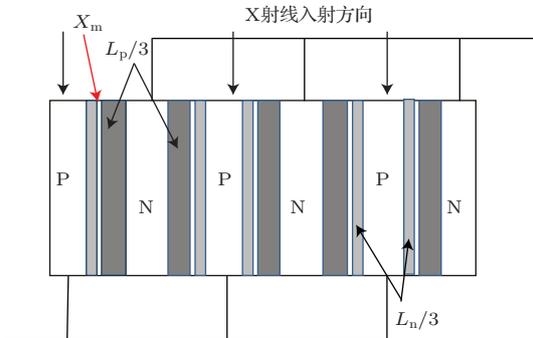


图4 多重结的敏感区和并联连接示意图

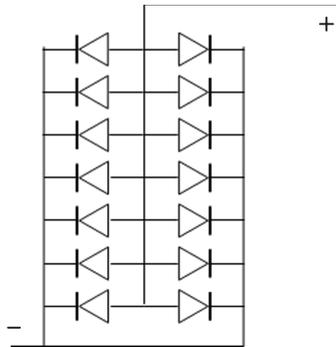


图5 单元探测器的等效电路

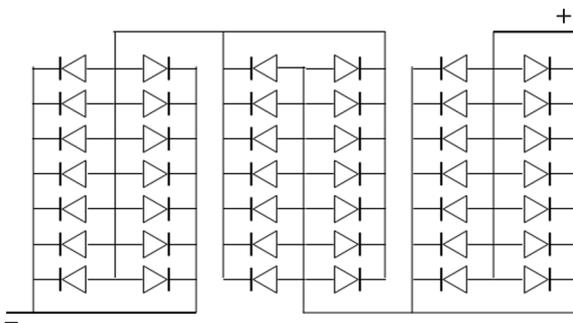


图6 三单元探测器集成后的等效电路

二极管的并联可以增加输出电流,单元的串联可以增加输出电压.

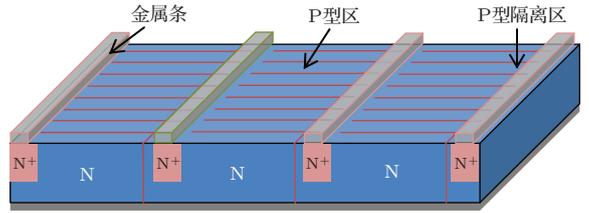


图7 三个敏感单元以串联形式被集成在一起

3 芯片的封装

将1 mm厚的Al₂O₃陶瓷片按一定尺寸切割成长方形,在一个较长的边缘附近涂上银浆,面积约1—2 mm²,250 °C烘干1 h,再置于550 °C的炉中烧结30 min.取出后电极呈银白色,在陶瓷片的其他地方涂上粘合剂并将芯片粘牢,充分干燥后将4个电极用金属导线连接起来,在银电极的另一端焊上较粗的金属引出线备用.4个电极分别标记为a,b,c和d.具体情况见图8(a).这样做的目的是既可以测量每一个单元的输出电压,又可以测量两单元或者三单元的输出电压.总输出电压满足 $V_{\text{pho}} = \sum_i^n v_i = nv_i$, v_i 是单元芯片输出电压.再将芯片固定在X光管的窗口附近,芯片置入暗盒内,用多芯电缆线连接到普通示波器.连接时将a端与电缆线的金属网连接,其余连接芯线.初步测量合格后,芯片可以封入用黄铜制成的外壳内(见图8(b)),只保留a端和d端引出线,中间几条不用.

4 器件的敏感区域

垂直结结构的灵敏区是由许多片状区域叠合而成(由图4所示).要得到较大的灵敏区体积就必须适当提高结数目.光伏型探测器和雪崩型探测器都需要厚的灵敏区,这是为了适应于不同能量光子的需要.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.设芯片厚度为 h ,则一部分是耗尽层横截面 $X_m h$, X_m 为耗尽层厚度.另外两部分是与结相邻的少数扩散长度 L_n, L_p 有关,而且输出的主要贡献区还是 $\frac{1}{3}(L_n + L_p)h$,在

零偏压下工作的耗尽层 X_m 较小, 在垂直多重结光电器件的设计中, 在工艺条件允许的情况下尽量减少无效区尺度, 即可得到较高的收集效率.

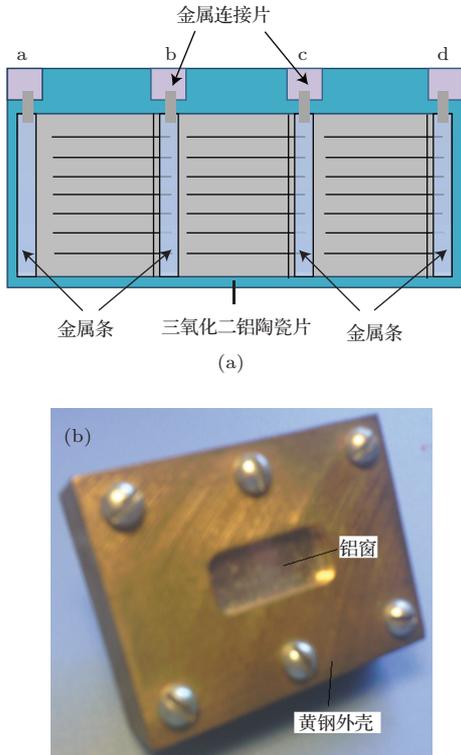


图8 (网刊彩色) 芯片电极和封装 (a) 芯片电极引线示意图; (b) 芯片封装在带有铝窗的黄铜壳内

5 器件的输出电压与电流的问题

器件的单元体积是 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 1\text{ mm}$. 为了提高输出电压, 可以根据需要选择受光面, 按照图7定义, 比如光从顶部或底部(方式1)、从前面或后面(方式2)、从左面或右面(方式3)入射. 它的输出电压都应该是 $V_{\text{pho}} = \sum_i^n v_i$, 其中 v_i 是单元器件输出电压. 单元器件输出电压 v_i 表示随 X 射线的硬度和受光面积及方向的不同而不同. 如果以单位受光面积来讨论问题的话(以图7为参照), 受光面为顶部或底部的情况适宜于较软(较小能量)的 X 射线, 如果光从前面或后面入射的话适宜于较硬的 X 射线, 若把左右面当作受光面则适宜于更硬(能量更大)的 X 射线, 其光子入射长度可以达到 18 mm . 对它们的输出电压可以计算出来, 设 E_0 为抵达芯片表面的光强, 沿入射线方向 x 处的光强为 $E_0 e^{-\mu x}$, 其中 μ 为衰减常数, 在厚度 $\leq x$ 内材料吸收的光子数 $\Delta E = E_0 - E_0 e^{-\mu x}$; 敏感区体积应该

是 $\Delta V = \left[\frac{1}{3}(L_p + L_n) + X_m \right] l_1 l_2 x \zeta$, 其中 ζ 是单位长度的 PN 结数目, l_1 和 l_2 分别是图3的两条边长, x 为 X 射线的入射深度. 再设芯片的非平衡载流子的收集系数为 η_c , 内量子系数为 $\eta_q \geq 1$, 考虑到入射线方向与芯片面元矢量的夹角 θ , 则非平衡载流子的产生额为

$$Q = \Delta E \cdot \Delta V q \eta_c \eta_q \cos \theta, \quad (1)$$

其中 q 为电子电荷; 若光强以能量为单位, 则(1)式要除以单光子能量 $h\nu$. 光生电流应该是对(1)式微分, 有

$$J_{\text{pho}} = \frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t}, \quad (2)$$

其中 A 为 PN 结面积. 改写(2)式有

$$J_{\text{pho}} = \frac{I}{A} E_0 (1 - e^{-\mu x}) \left[\frac{1}{3}(L_p + L_n) + X_m \right] \times l_1 l_2 x \zeta \eta_c \eta_q \cos \theta, \quad (3)$$

其中 $I = dq/dt$ 为光电流, 单元器件的开路电压为

$$v_i = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{J_{\text{pho}}}{J_0} + 1 \right], \quad (4)$$

其中 k 为玻尔兹曼常数, T 为温度, J_0 为所有 PN 结的反向漏电流密度, J_{pho} 为光电流. 由(4)式可见, 要 v_i 大些, J_{pho} 就得大些, J_0 就得小些. J_0 的表达式为

$$J_0 = q n_i^2 \left(\frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{kT \mu_n}{q \tau_n}} + \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{kT \mu_p}{q \tau_p}} \right), \quad (5)$$

其中 N_A 为热迁移掺杂浓度; N_D 为 N 区浓度; T 为环境温度; k 为玻尔兹曼常量; 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(5)式, J_0 小就使 N_A 和 N_D 大些, 但是这两个参数大些势必导致 τ_p 和 τ_n 减少, 反过来又使 J_0 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 $N \cdot \tau$ 之积为一最大值的方法, 理论上也可找其最佳值, 但是受到工艺上的限制也不能实现. 综合考虑, 从工艺条件出发, 进而决定其参数. 这会牺牲 J_0 的一些贡献, 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(单位长度 PN 结数目又

不能做的很多, 否则, 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 小些可以使得单元的 P 或 N 层尺寸减小, 使器件的收集率提高. 更重要的是如何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可达几倍甚至几十倍. 统筹考虑, 顾及到工艺条件、收集率等方面的因素, 采用 50—60 $\Omega\cdot\text{cm}$ 的 N 型 Si 单晶材料. $N_A = 1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, N_D 由查表得出, 算得 $J_0 = 9.6 \times 10^{-12} \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$. 光电流 J_{pho} 的贡献应由三部分组成, 即 N 区扩散到结边缘的空穴电流 j_p 、P 区扩散到结边缘的电子电流 j_n 和空间电荷区产生的电流 J_c , 因此 J_{pho} 为

$$J_{\text{pho}} = j_p + j_n + j_c. \quad (6)$$

光生电流 I_{pho} 在实际使用中三个支路分流: 流过负载的电流 I ; 流过 PN 结电流

$$I_D = I_0[\exp(q(V_{\text{pho}} + I_z R_s)/(kt)) - 1],$$

其中 R_s 为 PN 结体电阻, I_z 为流过 R_s 的电流; 流过器件并联等效电阻的电流 V/R_{sh} ; 故光生电流可以写成三项之和:

$$I_{\text{pho}} = I + I_0\{\exp[q(V_{\text{pho}} + IR_s)/(kt)] - 1\} + V_{\text{pho}}/R_{\text{sh}}, \quad (7)$$

其中 I 为测量电路流过负载的电流; V_{pho} 为器件在 X 射线照射下的输出电压; R_{sh} 为器件的并联等效电阻. 对于硅材料 PN 结, 正向导通电压约为 700 mV, 单元器件一般的光生电压小于 30 mV, 故 (7) 式第二项近似等于 0. 所以

$$I_{\text{pho}} = V_{\text{pho}}/(R_L + R_{\text{sh}}), \quad (8)$$

负载电阻为示波器内阻 $R_L = 1 \text{ M}\Omega$, 则 R_{sh} 立即得出. 测得三个单元器件的 R_{sh} 平均值约为 21.7 k Ω , 算得 $I_{\text{sh}} = 8.3 \times 10^{-8} \text{ A}$, $I = 1.8 \times 10^{-9} \text{ A}$, $I_{\text{pho}} = I + I_{\text{sh}}$ 约为 $8.48 \times 10^{-8} \text{ A}$. 更精细的计算还要考虑到在几十毫伏正向电压的情况下流过的结电流.

6 器件的光谱响应度灵敏度和响应时间

光伏型探测器的光谱响应度为 $R_\lambda = \frac{q\eta R_s \lambda}{E_\lambda}$, 也可写成

$$R_\lambda = 10^7 \frac{q\eta R_s \lambda}{hc} \text{ V}\cdot\text{W}^{-1}, \quad (9)$$

其中, λ 为入射光波长, h 为普朗克常数, c 为光速. 将 η_1 , $\lambda_1 = 1.542 \text{ \AA}$ 和 η_2 , $\lambda_2 = 0.711 \text{ \AA}$ 分别代入 (9) 式有 $R_{\lambda_1} = 3.34 \times 10^{-3} \text{ V}\cdot\text{W}^{-1}$; $R_{\lambda_2} = 1.15 \times 10^{-3} \text{ V}\cdot\text{W}^{-1}$, 其中 λ_1 , λ_2 分别为铜靶和钼靶的 K_α 线系的波长. 开路情况下光谱探测灵敏度为

$$D_\lambda^* = \frac{\lambda\eta}{2hc} \left(\frac{qA}{I_0}\right)^{1/2}. \quad (10)$$

将探测器窗口面积 $A = 1.44 \text{ cm}^2$ 代入得

$$D_{\lambda_1}^* = 3.0 \times 10^9 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-\frac{1}{2}}\cdot\text{W}^{-1};$$

$$D_{\lambda_2}^* = 1.0 \times 10^9 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-\frac{1}{2}}\cdot\text{W}^{-1}.$$

响应时间为

$$\tau_c = R_T \cdot C, \quad (11)$$

其中 C 为 PN 结电容, R_T 为器件串联电阻 R_s 与负载电阻 R_l 的并联值. 改写 (11) 式:

$$\tau_c = \frac{R_s R_l}{R_s + R_l} \cdot \sqrt{\frac{q\epsilon\epsilon_0 N_A}{2V_D}} A^*. \quad (12)$$

对于负载电阻 $R_l \gg R_s$ 的情形, 可将 (12) 式近似写成

$$\tau_c \approx R_s \cdot A^* \sqrt{\frac{q\epsilon\epsilon_0 N_A}{2V_D}}$$

$$= R_s \cdot \frac{\epsilon\epsilon_0}{X_m} A^*, \quad (13)$$

其中, ϵ 为硅的介电常数; ϵ_0 为真空介电常数; X_m 为耗尽层宽度; V_D 为 PN 结接触电势差, 取 0.7 V; A^* 为 PN 结面积. 对于三单元集成器件, 将器件数据

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{3}{C_1} = \frac{3}{C_2} = \frac{3}{C_3}$$

代入 (13) 式, 有 $\tau_c = 1.13 \times 10^{-6} \text{ s}$, 约为微秒量级.

7 主要性能测试

7.1 输出电压的测量

为了了解芯片集成后的输出电压是否满足

$$V_{\text{pho}} = \sum_i^n v_i = n v_i \quad (n = 1, 2, 3) \quad (14)$$

的关系 (n 为敏感单元数目). 在 50 kV 的管压下, 管芯表面距 X 光管窗口 23 cm. 光照面为“方式 1”测量了三个不同芯片厚度的集成器件的输出电压, 并且依次测量三个端头的输出电压, U_{ab} , U_{ac} , U_{ad} 结果由表 1 给出.

由表 1 可以看出, 在相同的光强照射下, 三个三单元集成器件的输出电压与单元数成比例. 每个单元的输出电压基本一致, 它们满足 (14) 式的关系, 输出信号加强了. 其次, 芯片的厚度对输出电压有较大的影响, 芯片越厚输出越强, 即光子打出非平衡载流子的机会越大, 内量子效率也越大.

要判别集成芯片各个单元的输出一致性, 可以在较强的可见光照射下用万用表做直接测量, 实际上不会有很大的误差, 其优点是可以省去很多麻烦.

表 1 器件三个输出端的输出电压

编号 (芯片厚度)	b 端输出 U	c 端输出 U	d 端输出 U
/mm	/mV	/mV	/mV
1(0.7)	12.20	24.52	36.00
2(0.6)	0.82	1.68	2.38
3(0.5)	0.20	0.39	0.62

7.2 器件光谱响应度的测试

K 线系特征 X 射线的强度与加在 X 光管的电流及电压的关系为

$$E = cI(V - V_k)^n, \quad (15)$$

这里, I 为管电流, V 为管电压, V_k 为靶材的临界激发电压, c 为常数, n 的取值在 1.5—2.0 之间. 这个光强不全部是线谱的强度, 而是线谱和一个弱的连续谱的叠加. 为了较准确地测量 R_λ 的值, 在 X 光管的窗口上用一定厚度的罗斯 (Ross) 滤片覆盖, 使得测试时得到较纯的 K 系谱线. 由 (15) 式可以看出, 只要 V 一定, 则光强 E 与管电流 I 的关系就简单得多. 此时, 可以把常数 c 以及 $(V - V_k)^n$ 合并为一个常数 c' . 这样, (15) 式可以写成 $E = c'IA''$, (c' 为管电压/光斑面积, A'' 是探测器窗口面积), 这意味着光强与管电流成线性关系, 这就给光谱响应度的测试带来极大的方便. 还可以设光强与器件的输出电压近似地有关, 即 $E \sim bV_{oc}$, b 为系数, V_{oc} 为器件输出电压. 则器件输出电压与管电流的关系可以有 $bV_{oc} \cong c'IA''$, 即器件输出电压与管电流仍然为线性关系

$$V_{oc} = \frac{c'A''}{b}I. \quad (16)$$

以 X 光管的电流为横坐标, 以器件的输出电压为纵坐标, 测量了它们之间的关系, 见图 9. 图中曲线是分别用钼靶和铜靶在逐次固定了管电压的

情况下, 变换管电流所测量得到的单元器件输出电压.

由图 9 可以看出, 管电流与器件输出电压呈线性关系, 与 (16) 式符合得相当好. 改写 (16) 式可以得到光谱响应度

$$R_\lambda = \frac{U}{E} = \frac{V_{oc}}{E} = \frac{V_{oc}}{c'IA''} = \frac{1}{b}. \quad (17)$$

根据 (17) 式和图 9 给出的具体数据, 可以得出 R_λ . 分别取管电压为 20, 30 和 40 kV, 器件与光源距离为 23 cm, 光斑半径为 10 cm, 所用的 X 光管为双窗口型. 对应于铜靶的测量值分别得出的响应度为

$$R_\lambda = 1.6 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{W}^{-1},$$

$$R_\lambda = 2.91 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{W}^{-1},$$

$$R_\lambda = 3.64 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}.$$

平均值为 $R_\lambda = 2.72 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$, 这和由 (9) 式给出的值的相对误差是 18.6%. 还可以看出, 上述测量值只有在 40 kV 的情况下与 (9) 式给出的值最接近, 相对误差较小, 只有 8.98%. 而误差较大的原因可能是由于在管电压较低的情况下射线的频谱较宽所致.

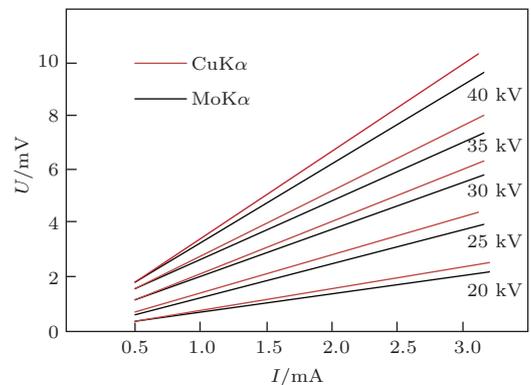


图 9 (网刊彩色) 器件输出电压与管电流的关系

对于 50 kV 以上的光谱响应只测了钼靶混合谱的效果, 并且是在固定管电流的情况下, 只变换管电压所测得的实际效果, 见图 10. 这样做有如下考虑: 其一, 钼靶是一般工业探伤使用的主要光源靶, 用钼靶测试可能更符合一些实际情况; 其二, 一般使用者在拍片检验时, 只注重管电流和管电压, 而非光强, 因此测出器件的输出电压与管电压之间的关系更有实际意义; 其三, 测量器件性能的一致性. 由图 10 可以看到, 器件输出与管电压的关系仍然为线性关系, 这是出乎预料的, 也是期望利用的; 其

次, 探测器芯片的厚度对响应度影响很大, 芯片愈厚响应愈大. 这就是说, 在工艺条件允许的情况下, 芯片厚度大一些好. 这也从另外一个角度证明, 要检验隙缝类缺陷, 可以将芯片立起来封装, 改变器件的受光面. 这样一来, 芯片厚度可以达到 6 mm, 乃至更大.

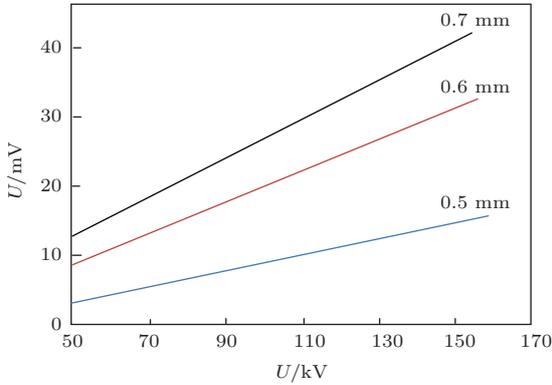


图 10 (网刊彩色) 器件输出电压与管电压的测量结果

7.3 器件的噪声

为了评定探头在工作时的准确性和分辨率, 须对探头的噪声水平进行测量. 对于探测器而言, 它的噪声主要有背景引起的本底噪声、有载流子引起的热噪声, 还有当载流子渡越高阻区引起的散粒噪声等. 在应用范围内, 用 SR-54 型示波器, 在 200 mV/div 的水平下测量, 没有读出噪声电平.

8 测量数据分析

对于 X 光管来说, 如果是一个出光口, 且没有加任何滤波板, 它的光强

$$E = bIZV^2 + b'I(V - V_k)^n. \quad (18)$$

考虑到多窗口的管子, 其光强与 (18) 式有如下关系

$$E' = \frac{1}{m}E, \quad (19)$$

这里, b, b' 为常数, Z 为靶的原子序数, n 的值在 1.5—2.0 之间, m 为 X 光管的出光口数目, 光强与管电压之间近似一个抛物线关系. 换言之, 器件的输出电压与管电压的关系应该是一个抛物线关系而非像图 10 那样的线性关系. 为了进一步考察图 10 的真实性及其形成原因, 考察了在低管压时器件输出与管压 V 的情况. 因为即使是抛物线关系, 也只是在坐标的原点附近其曲线斜率变化最大而其延伸部分近似一直线. 如果图 10 的结果正好是

抛物线的延伸部分, 或者说正好是较大管电压的部分, 问题就清楚了. 为此, 测量了管电压低值范围与器件输出的关系, 如图 11 所示. 由图 11 可知, 它们之间的确是一种近似抛物线关系, 这与理论公式相当符合. 这也从另一角度证明器件与光强呈良好的线性关系.

对于图 10 的情况, 它是高管压下的延长线. 可以认为在较高管电压的情况下, 器件与管电压也存在线性关系, 这对于对器件的使用会带来方便.

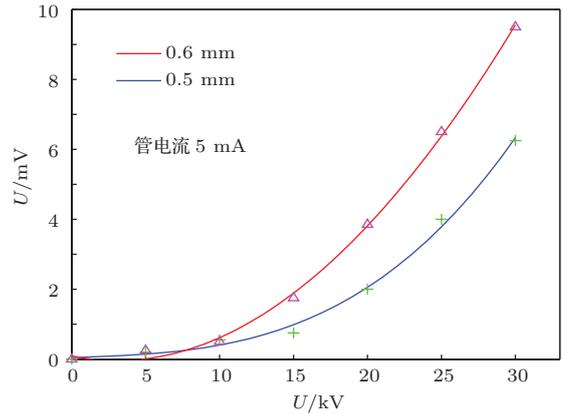


图 11 (网刊彩色) 探头在低管压下的输出特性

关于噪声问题, 对光伏型器件来说, 它没有雪崩效应, 不应该成为一个主要问题. 因为背景粒子大约每秒几个或几十个, 这对零偏压下工作的器件根本不足以引起本底噪声, 同时亦不会产生所谓散粒噪声. 对于热噪声应予以考虑, 但是由于器件内阻本身很小, 约为 80 Ω , 对于三单元器件也不超过 300 Ω , 故而热噪声在这种情况下也可以说是微不足道的.

为了实际考察器件的信噪比和模拟铸铁管砂眼的识别问题, 用直径为 300 mm、厚为 16 mm 的可以转动的钢制模盘一架, 上有直径 10 mm、深浅不同的洞 11 个, 洞的深度差为 1 mm. 探测器窗口正好对准洞的下方, 距离模版 10 mm. 一台 G200-8 型移动式 X 光机, 使其出光口对准模盘有洞的位置, 距离为 200 mm; 一台 SR-54 型超低频示波器的输入端用同轴电缆连接探测器的输出端 (见图 12). 开启 X 光机后, 匀速地缓慢转动模盘, 当模盘的角速度 ω 与示波器的扫描周期 T 的关系 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 时, 调节示波器, 可以在示波器的荧光屏上清楚地看到 11 个高矮不同的脉冲, 脉冲高度代表洞的深度, 脉冲宽度代表洞的直径. 在荧光屏上可以看出, 在扫描基线上没有出现噪声信号 (毛刺), 在脉冲上也沒

有噪声信号叠加. 这就是说利用集成式探测器可以探测到更小的金属缺陷.

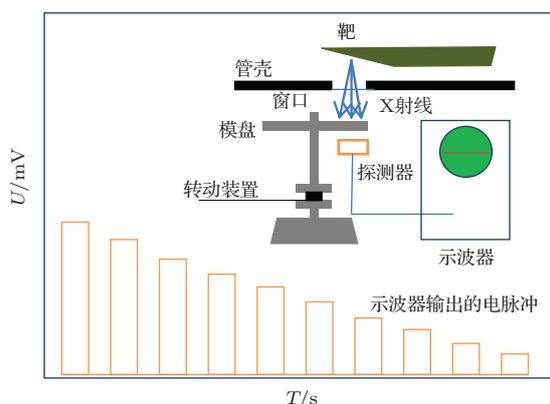


图 12 探头信噪比的测量结果及测量装置

9 结 论

利用PN结的隔离原理, 用一条隔离线, 把所有的垂直P型区连接起来, 形成阵列单元, 用金属薄膜将隔离线右边的P区和N⁺区覆盖, 方便地将相邻的两个单元串联起来, 既解决了光刻电极套不准的问题, 又消除了金属电极对敏感区的遮挡, 事实上相当于减小了器件的死区. 这样的集成结构可以把输出电压提高多倍; 如果改变器件的受光面, 器件还可以用来对付更硬X射线的探测, 这对于工业大件的无损探伤是有用的. 对于光电流公式中的内量子效率, 为了计算方便, 在实践中取为1. 载流子收集效率与结密度有关, 与少数载流子的扩散长度有关, 对于25结/cm的器件, 铜和钼两个K线系的收集效率 $\eta_{c1} = 0.34$, $\eta_{c2} = 0.25$. 对于电阻率为50—60 $\Omega \cdot \text{cm}$ 的N型单晶 $L_p \approx 200 \mu\text{m}$. 对于器件响应度的实际测量值和理论计算值误差较小, 这说明内量子效率取1时较为适当, 器件也完全可以用于金属铸件砂眼的检验和金属焊缝质量检验.

本工作的大部分是在内蒙古师范大学完成, 特别感谢内蒙古师范大学的刘典宪教授和豪斯巴雅尔教授的大力支持; 感谢内蒙古工业大学雷秀教授为我们器件特性测量提供的大力帮助.

参考文献

- [1] Brambilla A, Buffet P O, Gonon G, Rinkel J, Moulin V, Boudou C, Verger L 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 408
- [2] Koenig T, Hamann E, Procz S, Ballabriga R, Cecilia A, Zuber M, Llopart X, Campbell M, Fauler A, Baumbach T, Fiederle M 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 4713
- [3] Rocha J G, Dias R A, Goncalves L, Minas G, Ferreira A, Costa C M, Mendez S L 2009 *IEEE Sensors J.* **9** 1154
- [4] Ryu S G, Tsuru T G, Nakashima S, Takeda A, Arai Y, Miyoshi T, Ichimiya R, Ikemoto Y, Matsumoto H, Ima-mura T, Ohmoto T, Iwata A 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 2528
- [5] Porro M, Andricek L, Aschauer S, et al. 2012 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **59** 3339
- [6] Kim H S, Han S W, Yang J H, et al. 2013 *IEEE J. Solid-St. Circ.* **48** 541
- [7] Mikerov V, Koshelev A, Ozerov O 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 963
- [8] Guo C, Xu R K, Lee Z H, Xia G X, Ning J M, Song F J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1331 (in Chinese) [郭存, 徐荣昆, 李正宏, 夏广新, 宁家敏, 宋凤军 2004 物理学报 **53** 1331]
- [9] Andrii O S, Volodimir Y D 2012 *Radiation Measurements* **47** 27 e29
- [10] Zhao X L, Kang X, Chen L, Zhang Z B, Liu J L, Ouyang X P, Peng W B, He Y N 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 098502 (in Chinese) [赵小龙, 康雪, 陈亮, 张忠兵, 刘金良, 欧阳晓平, 彭文博, 何永宁 2014 物理学报 **63** 098502]
- [11] Yu B, Chen B L, Hou L F, Su M, Huang T X, Liu S Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 098502 (in Chinese) [余波, 陈伯伦, 侯立飞, 苏明, 黄天暄, 刘慎业 2013 物理学报 **62** 098502]
- [12] Akarin I, Joseph L K, Maxim S, Paul J S 2011 *Org. Electron.* **12** 1903
- [13] Miller N A, O'Neil G C, Beall J A, Hilton G C, Irwin K D, Schmidt D R, Vale L R, Ullom J N 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 163501
- [14] Aghamir F M, Behbahani R A 2014 *Chin. Phys. B* **23** 065203
- [15] Zhang Z G 2006 *Chin. J. Semicond.* **27** 1294 (in Chinese) [张治国 2006 半导体学报 **27** 1294]
- [16] Cline H E, Anthony T R 1976 *J. Appl. Phys.* **47** 2325
- [17] Cline H E, Anthony T R 1976 *J. Appl. Phys.* **47** 2332
- [18] Anthony T R, Cline H E 1976 *J. Appl. Phys.* **47** 2550
- [19] Zhang Z H, Wu Q L 1994 *Semicond. Technol.* **2** 55 (in Chinese) [张治国, 吴巧兰 1994 半导体技术 **2** 55]

Realization and experiment of vertical multijunction integrated photovoltaic Si X-ray detector*

Zhang Zhi-Guo[†]

(Institute of Functional Material, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China)

(School of Physics and Information Engineering, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China)

(Received 11 June 2014; revised manuscript received 21 August 2014)

Abstract

The structure of the vertical multijunction detector is introduced, and the result and technological conditions of preparing junction by thermomigration method are presented. In addition, the insulation line method of processing electrode wire is specially introduced; the problem of photoetching electrode after thermomigration is solved; the effects of technological conditions on device performance are analyzed. Besides, the difficulty in connecting all P regions is solved, and the aim of zero shade for sensitive regions is achieved. Specially, in order to realize integrating multicell device, a method of widening the size of electrode wire is described. Several important parameters are described, and the math model for the relationship of the X-ray intensity with both photovoltage and photocurrent is set up. At the same time, we introduce the measurement relation between the output voltage of the device and X-ray intensity, which shows that the measurement data and theoretical results are consistent. Finally, we analyze the measurement data, and demonstrate that the device has good enough sensibility and resolution.

Keywords: multijunction, integrated X-ray detector, performance and measuring

PACS: 85.25.Oj, 85.30.De, 85.30.Kk

DOI: 10.7498/aps.63.248501

* Project supported by the Important Item of University Serving Haixi of Fujian Provinca, China (Grant No. A100) and the Natural Science Foundation of Inner Mongolia, China (Grant No. 86044).

[†] Corresponding author. E-mail: qzzzg@aliyun.com