

带保护环结构的条形 X 光阵列探测器*

盛丽艳¹ 韩德俊¹ 张秀荣¹ 田晓娜¹ 王传敏² 杜树成¹ 谢 凡¹ 王光甫³

(1 北京师范大学低能核物理所, 射线束技术与材料改性教育部重点实验室, 北京市辐射中心, 北京 100875)

(2 中国航天电子技术研究院新器件室, 北京 100076)

(3 北京师范大学测试中心, 北京 100875)

摘要: 研究了带有保护环结构的条形 X 光阵列探测器, 结果表明, 保护环的存在不仅降低了表面漏电, 而且抑制了耗尽区的侧向扩展。厚度为 300 μm 的探测器样品, 切割后的“死区”长度为 150 μm; 环境温度为 18°C 时, 70V 偏压下加保护环测得的探测器完全耗尽时的漏电流为 20nA。

关键词: X 光探测器; 死区; 漏电流; 保护环; 端面入射

PACC: 9580N, 2940, 8160C

中图分类号: TN312⁺.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)02-0198-05

1 引言

一直以来医学上的 X 光透视都是用胶片作为感光材料, 这种方法不利于计算机处理, 无法便利地在网络上进行传输。为了发展远程医疗, 必须找到一种 X 射线数字信号接收装置。现在研究最多的是半导体的 X 射线探测器。应用于医学透视的 X 光能量一般在 15~120keV, 如果采用面入射的光电探测器(X 光自半导体硅材料的表面垂直入射)进行直接探测, 对于能量在 60keV 以上的 X 光, 探测器厚度至少需要几个乃至几十个 mm, 而一般的面入射探测器厚度在 300~500μm 之间, 远远达不到要求^[1~5]。如果使 X 光从条形探测器的端面入射, 探测器的吸收区长度将不受硅片材料厚度的限制。虽然用 X 光底片或荧光板对可见光敏感的光电探测器也可以获取 X 光影像, 但是端面入射条形探测器更优越, 它有量子探测效率高、动态范围大、康普顿散射的不良影响小、可以利用几乎无噪声的光子计数法探测和与大规模集成电路兼容的优点^[3]。

制作端面入射条形 X 光探测器的关键有两点,

首先是获得小的安全“死区”长度以提高对低能量 X 光的探测效率, 其次是尽量减小漏电流。Arfelli 等人^[5]的研究结果在 400μm 的器件上得到 200μm 的“死区”长度, 切割之后器件的漏电流增大了 7 倍。Mali 等^[6]在 220μm 的硅片上做成“死区”长度为 136μm 的探测器, 切割后漏电流增大了 26 倍。Krizaj 等^[7]的研究结果表明切割之后漏电流的增大是因为耗尽区扩展到了受损伤很严重的端面。我们的研究是在条形探测器的外围加保护环, 结果在 300μm 的器件上得到 150μm 的安全“死区”长度; 而且由于保护环的存在, 切割之后的器件漏电流几乎没有增加。

2 器件结构与原理

端面入射的条形探测器及其它射线探测器一般采用高阻 Si 材料^[8](电阻率 1~10kΩ·cm)做成 pin 结构, pn 结在工作时加反向偏压, 它的耗尽区除了在垂直方向扩展到器件背面外, 在侧向也有一定程度的扩展, 侧向扩展长度与器件厚度相当^[2,5], 耗尽区的侧向扩展带来三个方面的问题。

* 国家自然科学基金(批准号: 69976006), 北京市科技新星计划(合同号: 952870300)及教育部优秀青年教师基金资助项目

盛丽艳 女, 1979 年出生, 硕士研究生, 主要从事半导体光电子学的研究。

韩德俊 男, 1964 年出生, 博士, 副教授, 主要从事半导体光电器件方面的研究。

2002-03-26 收到, 2002-09-06 定稿

©2003 中国电子学会

首先,不利于获得小的安全“死区”长度。死区是指探测器的条形末端和器件边缘之间的区域。它作为端面入射的X光探测器的通光窗口,对软X光有很大的吸收系数。Henke等人^[9]研究表明,500μm的“死区”会吸收掉70%的能量为15keV的X光。这样探测的量子效率非常低^[10],在实际应用中必然要延长透视时间,或增加软X光强度,这不利于病人的身体健康。所以必须尽量减小“死区”的长度。但是“死区”长度并不能无限制地减小。因为器件的端面在切割时,晶体受到严重破坏,如果“死区”太短,耗尽区扩展到端面,缺陷、位错会在耗尽区内产生复合中心,将增大探测器的漏电流;而对于信号较弱的医用X光探测来说,漏电流必须要小。所以获得小的安全“死区”长度(耗尽层不能扩展到端面)可使端面入射X光探测器应用到软X射线的探测。安全的“死区”长度与器件厚度有关,在实际应用中一般选择为器件厚度的2倍^[5]。

其次,不利于得到高分辨率。X光影像要有好的分辨率,需要小的象素。一个光敏器件就是一个象素。对于端面入射的条形X光探测器,理论上象素的大小由器件的厚度和条形的空间周期(一个条宽加一个条间隙)决定。但由于耗尽区的侧向扩展,实际的象素大小大于理论值,这就不利于得到高的分辨率。

另外在核物理研究中经常需要用多个较小面积的半导体阵列探测器拼接成一个大面积的半导体阵列探测器,减小“死区”的长度,有利于减小拼接处探测器单元之间的间距,提高拼接处的分辨率。

“死区”的存在成为提高端面入射的X光探测器的探测效率和分辨率,减小漏电流的主要障碍。为克服这一困难,本研究采取了在条形X光探测器外加保护环的器件结构。

保护环结构广泛应用于可见光探测器和射线探测器中。它围在探测器有源区的四周,和探测器有相同的器件结构,工作时加与有源区相同的偏压。许多文献报道的工作都是利用保护环结构来降低表面漏电流^[11, 12],没有涉及它对耗尽区的侧向扩展的抑制作用。在没有保护环的情况下,耗尽区随着电压的加大不断沿纵向和侧向扩展。加了保护环之后,由于保护环和探测器的条形电极加相同的偏压,它们是等势的。当内部电场的等势面相接时,探测器的耗尽区在侧向就不再扩展。所以加保护环的耗尽区侧向扩展应该比不加保护环的小。

我们的研究是在1×8条形X光探测器的外围加了保护环。实验证明,保护环的存在一方面可以减小表面漏电,另一方面会限制耗尽区的侧向扩展,得到小的安全“死区”长度。这有利于提高软X光探测的量子效率,减小象素的实际尺寸,提高半导体探测器的分辨率。

3 器件工艺及结构

实验中采用电阻率大约为 $4k\Omega \cdot cm$ 的n型硅片,其晶向为 $\langle 100 \rangle$,双面抛光,厚度为300μm。主要工艺步骤如下:

- (1) 清洗n型硅片,热氧化350nm的氧化层($1100^{\circ}C/5min$ 干氧+ $20min$ 湿氧+ $5min$ 干氧)。
- (2) 选择性地腐蚀掉正面氧化层及背面全部氧化层。
- (3) 正面注入 B^+ ($60keV, 5 \times 10^{15} cm^{-2}$);背面注入 P^+ ($120keV, 5 \times 10^{15} cm^{-2}$)。
- (4) 退火($600^{\circ}C/30min$ + $900^{\circ}C/2s$)。
- (5) 制作Ti/W/Ti/Au电极。

器件的结构如图1所示。黑色长条(8条)为器件的条形电极,宽为80μm,周期为200μm;外面的黑框为保护环。器件设计时,条形末端距离保护环为20μm,保护环在末端面一侧的宽度为10μm。理论上可以得到20μm的安全“死区”长度,实际解理完之后,死区长度为150μm。

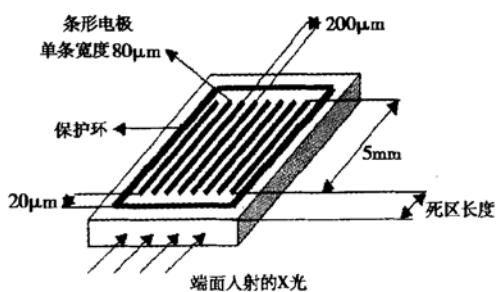


图1 端面入射的1×8条形探测器的俯视图

Fig. 1 Top view of the 1×8 “edge on” stripe detector

4 测量结果

图2为测试的C-V特性,电压超过70V左右时,电容不再随反向偏压的增加而减少,说明在反向电压加到70V左右的时候,器件已将整个硅片厚度

耗尽.

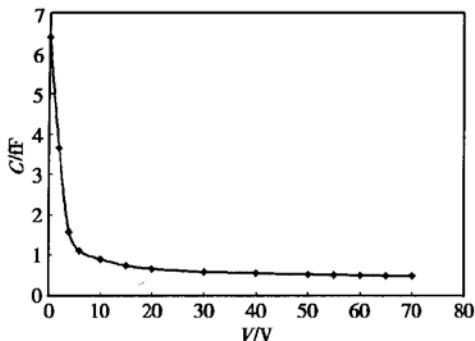


图 2 $C-V$ 特性

Fig. 2 $C-V$ characteristics

我们用 KEITHLEY 237 高压源测量仪测量了器件解理后的 $I-V$ 特性, 测量的时候, 衬底接地, 保护环和条形电极加相同的负压, 但是只取条形电极的输出信号. 图 3 为器件的 $I-V$ 特性图. 由图示可知: (1) 在加了保护环之后, 漏电流随着反向电压的增大增加缓慢. 比如在室温下, 0 到 50V 只变化了

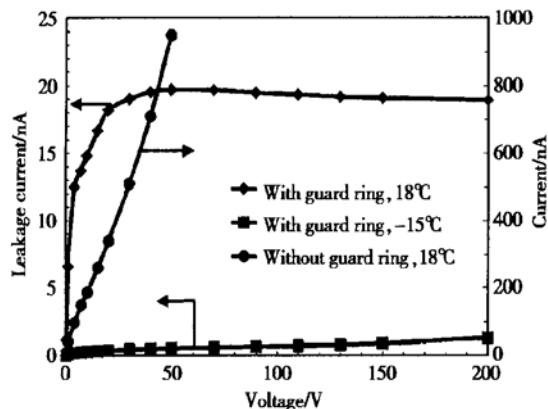


图 3 有无保护环的情况下, 漏电流在室温和低温下随电压的变化曲线

Fig. 3 Dependence of leakage current with guard ring and without guard ring at 18°C and -15°C

20 个 nA 左右, 而且 50V 之后几乎不再增大. 这说明保护环确实抑制了耗尽区的侧向扩展. 因为对于 $300\mu\text{m}$ 的器件来说, 安全的“死区”长度为器件厚度的两倍即 $600\mu\text{m}$, 这样耗尽区很容易扩展到 $150\mu\text{m}$ 外的端面, 只要扩展到端面, 端面大量的缺陷和位错会成为耗尽区中的产生复合中心, 体漏电增大, 而体漏电随着电压的增大会更快增大. 现在的结果说明耗尽区并没有扩展到端面, 即保护环抑制了耗尽区的侧向扩展. (2) 保护环明显降低了漏电流. 反向偏压为 50V 的时候, 常温下不加保护环的漏电流为

950nA, 而加了保护环的漏电流为 20nA, 缩小了 40 多倍. (3) 在 -15°C 下, 反向偏压为 50V 的时候, 加保护环测得的漏电流是 1nA 左右, 比常温下加保护环的漏电流小了一个数量级. 这说明加上冷却装置可以得到特性更好的探测器.

图 4(a) 为新研制的条形探测器对 ^{241}Am 放射源的 X 光谱线的响应. 测量时, 由探测器接收 X 光信号, 直接经电荷灵敏前置放大器(即采用 DC 耦合测量方式)和主放大器放大后, 接到多道分析仪上分析处理信号. 条形探测器处于 -15°C 的温度条件下. 作为比较, 我们把用 Si(Li) 探测器对同一放射源所测量的结果表示在图 4(b) 中, 可以看出图中出现了多

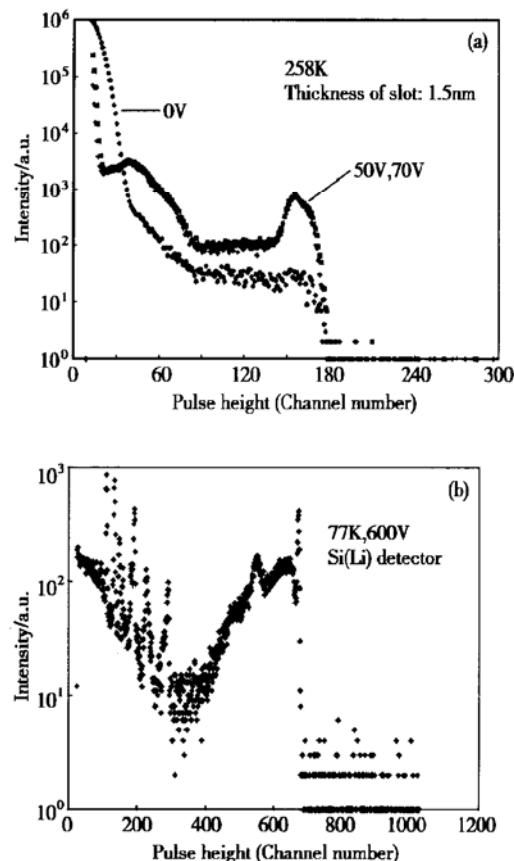


图 4 ^{241}Am 放射源的接收谱图 (a) 新研制的探测器; (b) 商用 Si(Li) 探测器

Fig. 4 Spectra of ^{241}Am radioactive source
(a) Detector in this study; (b) Si(Li) detector

个谱峰; 在图 4(a) 中, 外加偏压为 50V 或 70V 条件下, 出现两个谱峰, 说明条形探测器对 ^{241}Am 的 10~20keV 及 60keV 的射线都有响应, 只是器件工艺不合理, 漏电流较大, 能量的分辨率尚不如商品化的 Si(Li) 探测器高.

5 结论

在 1×8 条形X光探测器的外围加上保护环，能有效地抑制耗尽区的侧向扩展，降低漏电流。采用带保护环结构的端面入射条形探测器阵列，能够得到小的安全“死区”长度（例如 $150\mu\text{m}$ ），和小的像素，有利于提高探测软X光的探测效率。

致谢 感谢北京市辐射中心的兰李乔老师在本工作中帮助测量了 ^{241}Am 放射源的X光谱。

参考文献

- [1] Hulta B, Fessler P, Prévot G. The quantum X-ray radiology apparatus. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2000, 442: 355
- [2] Arfelli F, Babuelli G, Bonvicini V, et al. An “edge-on” silicon strip detector for X-ray imaging. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1997, 44: 874
- [3] Beuville E, Cahn R, Cederstrom B, et al. High resolution X-ray imaging using a silicon strip detector. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1998, 45(6): 3059
- [4] Beuville E, Collins T, Kipnis I, et al. An efficient digital X-ray imaging system with high spatial resolution and robust ener-
- gy sensitivity. *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record*, 1995, 3: 1602
- [5] Arfelli F, Barbiellini G, Bonvicini V, et al. New developments in the field of silicon detectors for digital radiology. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 1996, 377: 508
- [6] Mali T, Cindro V, Mikuz M, et al. Effect of cutting distance on noise of silicon microstrip detectors. *Proceedings 34th International Conference on Microelectronics, Devices and Materials*, 1998: 199
- [7] Krizaj D, Amon S. Numerical analysis of edge effects in side illuminated strip detectors for digital radiography. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2000, 439: 451
- [8] Dubnicha M. Functional properties of microstrip Si detector structures with implanted p-n junctions. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 1987, 253: 360
- [9] Henke B L, Gullikson E M, Davis J C. X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at $E = 50\sim 30000\text{eV}$, $Z = 1\sim 92$. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1993, 54(2): 181
- [10] Naber J F. Edge illumination of a silicon photodiode at ultraviolet wavelengths. *Appl Opt*, 1987, 26(1): 21
- [11] Kaluza A, Ohns T, Rente C, et al. Micro strip X-ray detector with a very high dynamic range based on LPE-GaAs. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1998, 45: 724
- [12] Holland S. Fabrication of detectors and transistors on high resistivity silicon. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 1989, 275: 537

Reduction of “Dead Region” of Silicon Stripe Detectors by Guard Ring Structure*

Sheng Liyan¹, Han Dejun¹, Zhang Xiurong¹, Tian Xiaona¹, Wang Chuanmin²,
Du Shucheng¹, Xie Fan¹ and Wang Guangfu³

(1 Key Laboratory of Beam Technology and Materials Modification of Ministry of Education, Institute of Low Energy Nuclear Physics,
Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(2 New Device Laboratory, China Academy of Space Electronics Technology, Beijing 100076, China)
(3 Test Center, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: A silicon stripe X-ray detector with guard ring is studied. It is demonstrated that the guard ring can not only decrease the surface leakage current, but also prevent the lateral spreading from the depletion layer of pn junction. A “dead region” achieves for a strip detector on 300 μ m-thick silicon wafer is 150 μ m. Dark current of the diode (with guard ring) under a voltage of 70V (the diode is completely depleted under this voltage) is 20nA at temperature of 18°C.

Key words: X-ray detector; dead region; leakage current; guard ring; edge on

PACC: 9580N; 2940; 8160C

Article ID: 0253-4177(2003)02-0198-05

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (No. 69976006), New Star Plan of Science and Technology of Beijing (No. 952870300), and Foundation of Chinese Ministry of Education for Outstanding Young Teachers

Sheng Liyan female, was born in 1979, graduate student. She is engaged in the research on semiconductor optoelectronics.

Han Dejun male, was born in 1964, PhD, associate professor. He is engaged in the research on semiconductor optoelectronic devices.

Received 26 March 2002, revised manuscript received 6 September 2002

© 2003 The Chinese Institute of Electronics