

引用格式: SUN Peng, FU Jianyu, XU Gaobo, et al. Research on Structure Simulation of Silicon Pixel Sensor Guard Ring for Advanced Light Source[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(12):1228002

孙朋,傅剑宇,许高博,等. 面向先进光源的硅像素传感器保护环结构仿真研究[J]. 光子学报, 2021, 50(12):1228002

# 面向先进光源的硅像素传感器保护环结构仿真研究

孙朋<sup>1,2</sup>, 傅剑宇<sup>1,2</sup>, 许高博<sup>1,2</sup>, 丁明正<sup>1</sup>, 翟琼华<sup>1</sup>, 殷华湘<sup>1,2</sup>, 陈大鹏<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院微电子研究所 集成电路先导工艺研发中心, 北京 100029)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 硅像素传感器上的保护环结构有利于提高传感器的耐高电压性能, 为评估保护环结构对硅像素传感器的保护效果, 仿真分析了三种保护环结构。通过计算机辅助设计技术对三种保护环结构进行二维建模, 利用 TACD 内置的电学模型对三种保护环结构的  $I-V$  特性进行了仿真。研究表明, 电流收集环会提高像素的耐高电压性能, 同时不等间距保护环、保护环的内外等距离 Al 悬挂以及多个保护环结构有利于进一步提高传感器的击穿电压。

**关键词:** PIN 二极管; 硅像素传感器; 保护环; 耐高电压; 计算机辅助设计

中图分类号: O436

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215012.1228002

## Research on Structure Simulation of Silicon Pixel Sensor Guard Ring for Advanced Light Source

SUN Peng<sup>1,2</sup>, FU Jianyu<sup>1,2</sup>, XU Gaobo<sup>1,2</sup>, DING Mingzheng<sup>1</sup>, ZHAI Qionghua<sup>1</sup>,  
YIN Huaxiang<sup>1,2</sup>, CHEN Dapeng<sup>1,2</sup>

(1 Key Laboratory of Microelectronics Devices & Integrated Technology, Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The guard ring structure on the silicon pixel sensor is beneficial to improve the high voltage withstand performance of the sensor. In order to evaluate the protection effect of the guard ring structure on the silicon pixel sensor, three kinds of guard ring structures are simulated and analyzed. Two-dimensional modeling of the three guard ring structures was carried out by Technology Computer Aided Design, and the  $I-V$  characteristics of the three guard ring structures were simulated using the electrical model built in the software. The existence of the current collecting ring can make the pixel withstand high voltage, and the unequal-spaced guard ring, The different space guard ring, the inner and outer equidistant Al suspension of the guard ring, and the multiple guard ring structures are beneficial to further increase the breakdown voltage of the sensor.

**Key words:** PIN diode; Silicon pixel sensor; Guard ring; Withstand high voltage; Technology computer aided design

**OCIS Codes:** 280.4750; 230.0040; 230.5160

## 0 引言

X 射线是波长在 0.01~10 nm 之间的电磁波, 可用于在原子或分子尺度上揭示物质结构和生命现象。目

基金项目: 中国科学院重大科研仪器研制项目(No. ZDKYYQ20200007)

第一作者: 孙朋(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 X 射线传感器技术。Email: 1335644509@qq.com

导师(通讯作者): 傅剑宇(1984—), 女, 副研究员, 博士, 主要研究方向为 X 射线传感器技术和红外探测器技术。Email: fujianyu@ime.ac.cn

收稿日期: 2021-06-04; 录用日期: 2021-08-11

<http://www.photon.ac.cn>

前, X射线成像探测应用大都采用半导体探测器。混合型硅像素探测器是一种试验站上常用的半导体探测器<sup>[1-3]</sup>。该探测器包含传感器和读出电子学两个部分, 分别制造在独立的硅片上, 通过倒装焊连接在一起。其中, 硅像素传感器用于将X射线转换成电信号, 读出电子学用于电信号的前端处理<sup>[4]</sup>。

随着X射线光源逐渐从X光管发展到包括同步辐射衍射极限环与自由电子激光在内的先进光源, X射线的亮度也不断提升<sup>[5-6]</sup>。为避免因高亮度射线在硅像素传感器体内产生的电荷屏蔽效应, 传感器通常需要工作在高偏压下<sup>[7-9]</sup>。例如为欧洲自由电子激光探测任务研制的一款硅像素探测器, 其硅像素传感器的设计工作电压高达1 000 V<sup>[10]</sup>。

硅像素传感器由像素阵列、电流收集环和保护环组成<sup>[11]</sup>。其中, 保护环主要承担增大传感器击穿电压的作用。为克服由于高偏压引起像素阵列结构表面强度过大导致的雪崩击穿现象<sup>[12-13]</sup>, 合理地设计保护环结构显得尤为重要。为此, 研究人员针对保护环结构对传感器击穿的影响开展了多方面研究<sup>[14-17]</sup>, 在早期主要围绕单个保护环结构与电流收集环之间的间距对器件击穿电压的影响展开研究; 后来又针对多个保护环结构的结深对电流收集环击穿电压的影响进行了研究<sup>[18-21]</sup>。但已有研究对于多个保护环的排布和环数变化以及铝(Al)悬挂的延伸方式, 对传感器电流收集环击穿的影响尚有不足。

本文结合计算机辅助设计(Technology Computer Aided Design, TCAD), 使用sentaurus软件对面向先进光源的硅像素传感器保护环结构, 从保护环间距排布、Al悬挂结构以及保护环个数三个方面研究保护环对传感器击穿电压的影响。

## 1 器件结构与工艺

图1为硅像素传感器剖面结构示意图。图中, 硅像素传感器由像素阵列、电流收集环、保护环三部分组成。其中, 像素阵列为传感器的敏感区域, 其内的每个像素均为PIN型二极管, 且像素n型半导体一侧, 共用背面电极。传感器工作时, 背面电极接正向偏压; 每个像素p型半导体一侧的读出电极分别接地, 且与读出电子学连接; PIN二极管形成反向偏置的全耗尽状态。X射线从传感器的背面入射, 在体硅中激发出电子和空穴, 在电场的作用下, 空穴向像素阵列的读出电极运动, 被读出电子学读出, 由此完成光电信号的转换。

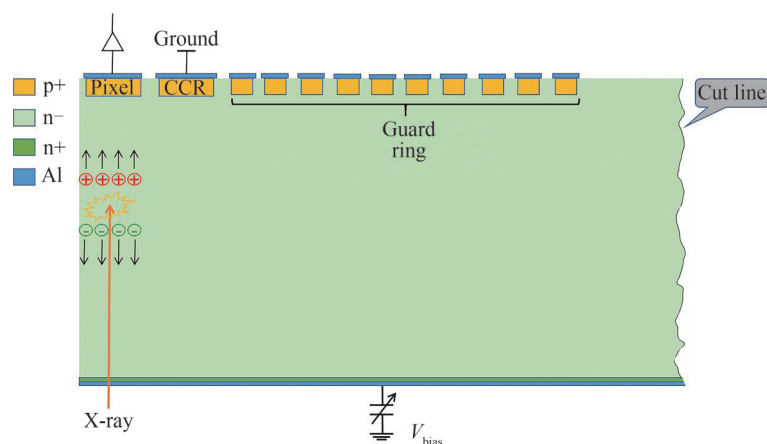


图1 传感器边缘位置示意

Fig.1 Schematic of the edge position of the sensor

像素阵列外侧的电流收集环和保护环构成传感器的非敏感区域。传感器工作时, 电流收集环接地, 保护环浮空。接地的电流收集环用于降低像素阵列的漏电, 浮空的保护环可以使传感器边缘处的电势缓慢落到电流收集环, 用于提高器件的击穿电压。

该传感器可基于CMOS工艺制造, 工艺流程如图2。具体流程包括:(a)湿氧化, 形成场氧化层;(b)场氧光刻, 刻蚀出有源区;(c)生长一层致密的薄栅氧, 正面注入硼, 形成p+区域; 背面注入磷, 形成n+区域, 高温退火, 注入激活;(d)栅氧光刻, 刻蚀形成用于正面电极接触的接触孔;(e)正面溅射金属Al、光刻, 刻蚀形成用于正面电学接触的金属Al电极;(f)背面金属Al溅射、高温退火, 形成背面电极接触;(g)淀积氮化硅、光刻, 露出用于正面电学接触的Al电极。

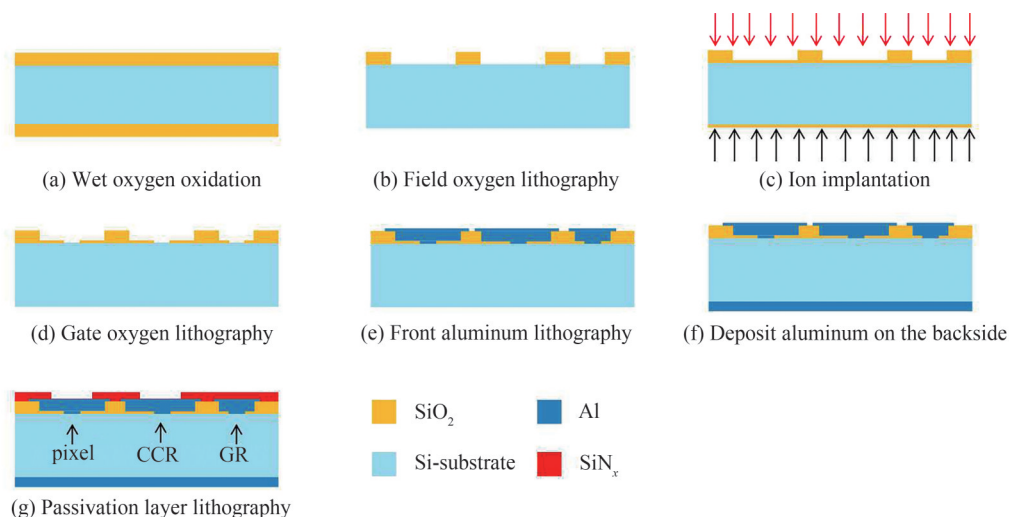


图2 传感器工艺流程  
Fig.2 Sensor process flow chart

## 2 器件仿真模型

为研究保护环对击穿电压的影响,使用TCAD sentaurus软件进行仿真。因传感器的整体结构具有对称性和重复性,所以选取传感器的边缘部分进行仿真模型的构建和研究。表1给出了传感器边缘部分的基本仿真参数。图3为使用这些参数按照传感器制造的实际工艺流程,利用工艺仿真模块sprocess在软件中构造的二维仿真模型。

表1 仿真模型构造中使用到的衬底参数和部分结构参数

Table 1 Substrate parameters and some structural parameters used in the simulation model construction

Substrate thickness/ $\mu\text{m}$	Substrate resistivity/ $(\Omega\cdot\text{cm})$	Crystal orientation	Active area injection width/ $\mu\text{m}$		
			Pixel	CCR	GR
500	5 000	$\langle 100 \rangle$	180	200	25

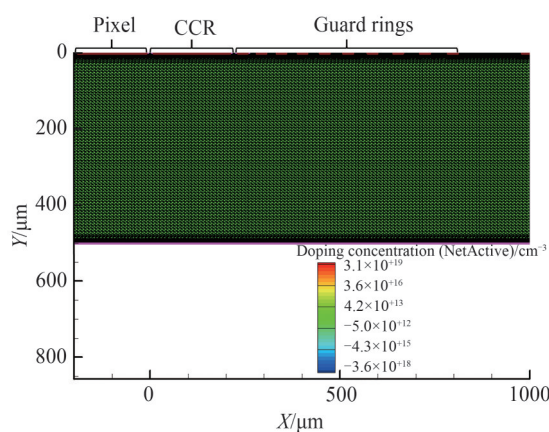


图3 传感器边缘仿真模型  
Fig.3 Sensor edge simulation model

在此模型基础上,将像素和电流收集环电极的电势定义为0 V,在器件的背部加正向偏置,使用到载流子的迁移率模型、载流子的产生复合模型、雪崩击穿模型、氧化层固定电荷密度模型,定义Si/SiO<sub>2</sub>界面处的固定正电荷的密度为 $1.8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 。运用sdevice模块对传感器开展了电学I-V仿真。

### 3 仿真结果分析

#### 3.1 保护环间距排布的影响

保护环结构的排布形式可分为等间距和不等间距两种情况。在距离电流收集环注入区边缘的 600 μm 范围内,固定保护环个数为 10 环,并定义靠近电流收集环的为保护环第一环。对于等间距情况,相邻两个保护环之间的间距为 35 μm。对于不等间距保护环结构的环间距是采用逐环递增的排布方式,具体的环间距遵循式(1)。

$$S_n = 21.5 + (n - 1) \times 3 \quad n = 1, 2, \dots, 10 \quad (1)$$

式中,  $S_n$  代表第  $n$  个保护环与它前面保护环的间距。

图 4 是在两种不同保护环结构下的像素和电流收集环的暗电流情况。从图中可以看出,击穿主要发生在电流收集环处,这是由于电流收集环靠近传感器边缘一侧的电流密度比较大,如图 5。由此,电流收集环能对像素起到有效的保护作用,降低了像素的暗电流。

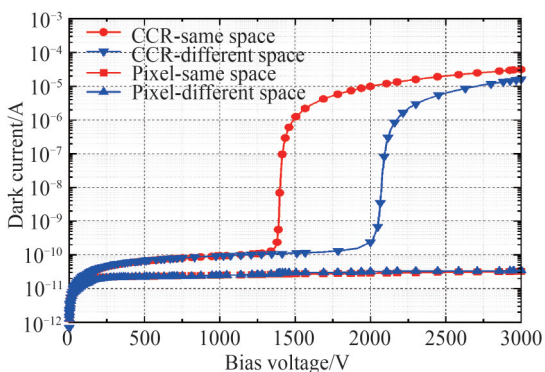


图 4 像素和电流收集环暗电流  
Fig.4 Pixel and current collecting ring dark current

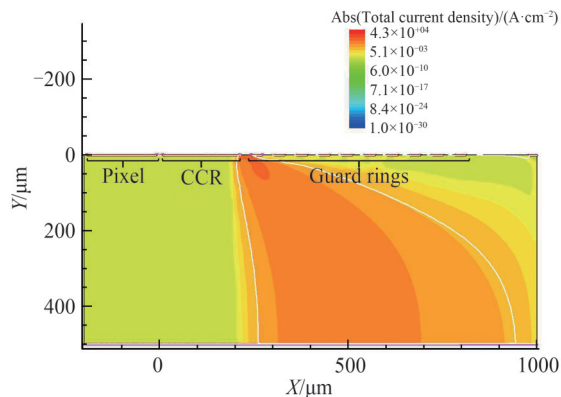


图 5 等间距保护环结构电流密度分布图(2 000 V 偏压)  
Fig.5 Current density distribution diagram of equidistant guard ring structure (2 000 V bias)

此外,在图 4 中,采用等间距和非等间距保护环结构的电流收集环的击穿电压分别为 1 350 V 和 2 000 V,这说明虽然两种结构都具有很好的抗击穿能力,但是不等间距保护环结构的抗击穿能力更强。这是由于保护环结构为器件边缘的电势顺利地降落到像素表面区域提供了一条缓慢降落的通路,不同的保护环间距排布造成了边缘位置处的电势降落到电流收集环位置处的方式不同,进而造成了在电流收集环靠近传感器边缘一侧结区附近的电场分布不同,如图 6。图 7 为两种结构的表面电场强度分布,对比两种结构在电流收集环靠近保护环一侧表面位置处的电场强度,等间距保护环结构和非等间距保护环结构在该位置处的表面电场强度分别为 39 000 V·cm<sup>-1</sup> 和 37 800 V·cm<sup>-1</sup>。结区附近更强的电场强度使得等间距保护环结构比非等间距保护环结构的击穿电压低。

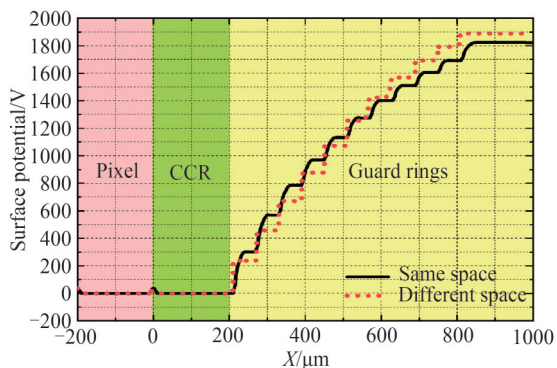


图 6 表面电势分布(2 000 V 偏压)  
Fig.6 Surface potential distribution (2 000 V bias)

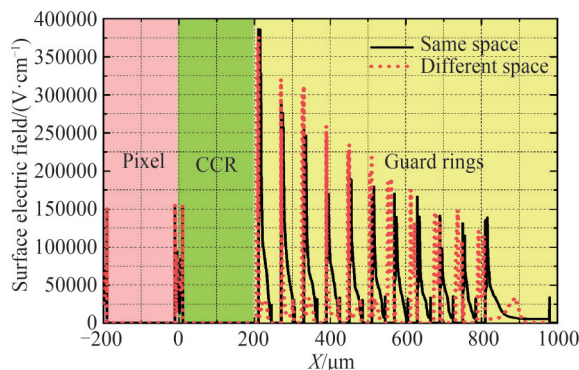


图 7 表面电场强度分布(2 000 V 偏压)  
Fig.7 Surface electric field intensity distribution (2 000 V bias)

### 3.2 保护环 Al 悬挂结构的影响

在传感器的保护环设计中,通常会配备 Al 悬挂结构。Al 悬挂结构与氧化层还有衬底表面的硅构成了 MOS 结构,这会改变保护环的表面电势。对于悬挂在保护环两侧的 Al 结构,通常称朝向像素阵列一侧的为向内延伸的 Al 悬挂结构,朝向边缘一侧的为向外延伸的 Al 悬挂结构。对于 n 型衬底 p+ 注入的保护环结构,金属悬挂结构和 p+ 注入区保持相同的电位,传感器的表面电势是从边缘区降落到像素区,在氧化层电荷密度比较小的情况下,向延伸的 Al 悬挂结构会在底层硅表面形成聚集层,影响表面位置处的电势分布。在不等间距保护环的基础上,考察了两种不同 Al 悬挂结构。结构 1 是每个保护环上面的 Al 悬挂结构向内和向外延伸相同的距离都为 5 μm。如图 8 所示,结构 2 是每环的 Al 悬挂结构向外延伸都为 5 μm,向内的 Al 悬挂是按照逐环递增的方式延伸,每一环向内延伸 Al 悬挂结构的长度可表示为

$$L_n = 5 + (n - 1) \times 1.5n \quad n = 1, 2, \dots, 10 \quad (2)$$

式中,  $L_n$  为第  $n$  个环向内的 Al 悬挂结构的长度。

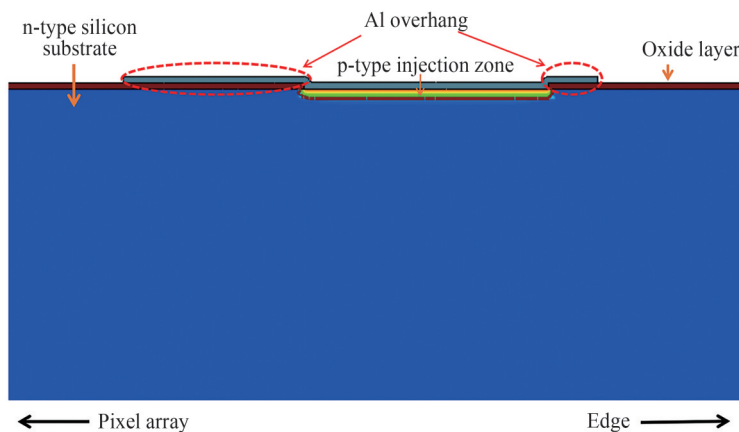


图 8 结构 2 的 Al 悬挂  
Fig.8 Al overhang of structure 2

图 9 为两种结构下电流收集环和像素的暗电流。图中使用结构 1 器件的击穿电压要比使用结构 2 器件的高 20 V。图 10 是提取了器件快要发生击穿时(2 000 V 偏压)电流收集环和第一个保护环之间的表面电势分布,从图中可以看出在第一个保护环处使用结构 2 的电势比使用结构 1 的大。这种电势降落的差别会造成电流收集环附近的电场强度出现不同。如图 11,使用结构 1 器件电流收集环处的电场强度相对较小,这使得配备结构 1 的器件具有更高的击穿电压。

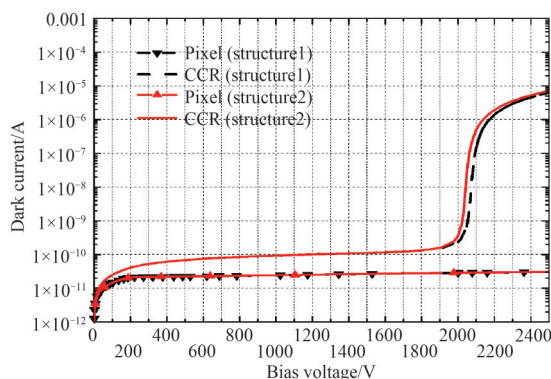


图 9 不同 Al 悬挂结构下的电流收集环和像素漏电  
Fig.9 Current collecting ring and pixel leakage under different Al overhang structures

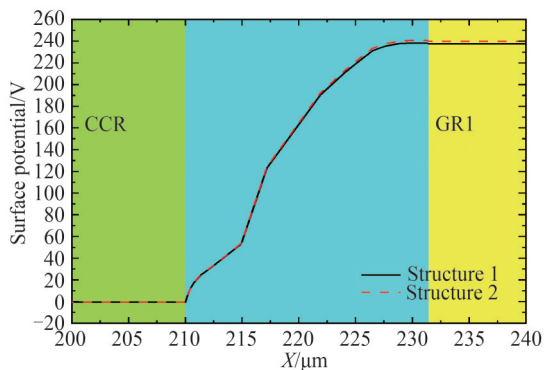


图10 不同Al悬挂结构下的表面电势分布(2 000 V 偏压)  
Fig.10 Surface potential distribution under different Al overhang structures (2 000 V bias)

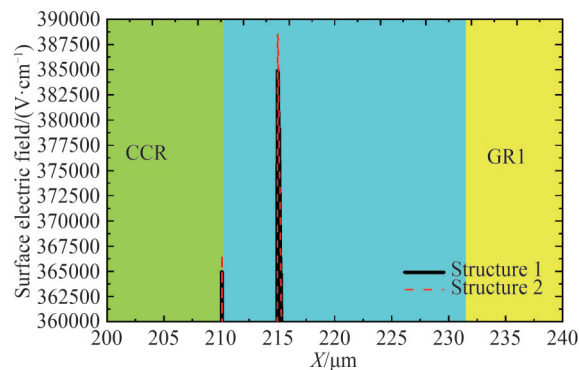


图11 不同Al悬挂结构下的表面电场分布(2 000 V 偏压)  
Fig.11 Surface electric field distribution under different Al suspension structures (2 000 V bias)

### 3.3 保护环数目的影响

图12为在每环Al悬挂内外延伸一致的条件下,随着非等间距保护环数目变化,器件的I-V仿真结果。在没有保护环的情况下电流收集环在600 V左右就出现了击穿,随着保护环数目的增加电流收集环的击穿电压也在随之增加。如图13所示,没有保护环结构的电流收集环结区附近的电场明显比有保护环结构的大,这使得没有保护环结构器件的电流收集环过早地发生雪崩击穿。如图14所示,保护环结构可以使边缘位置处的电势缓慢降落到电流收集环位置处,这有效降低了器件表面附近的电场强度。

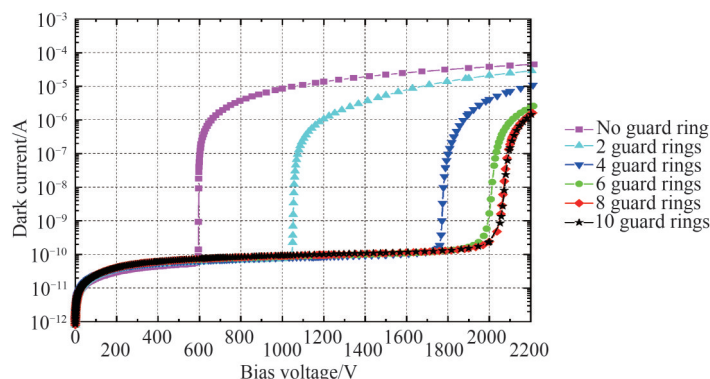


图12 不同保护环数目下的电流收集环漏电  
Fig.12 Leakage of current collecting ring under different number of guard rings

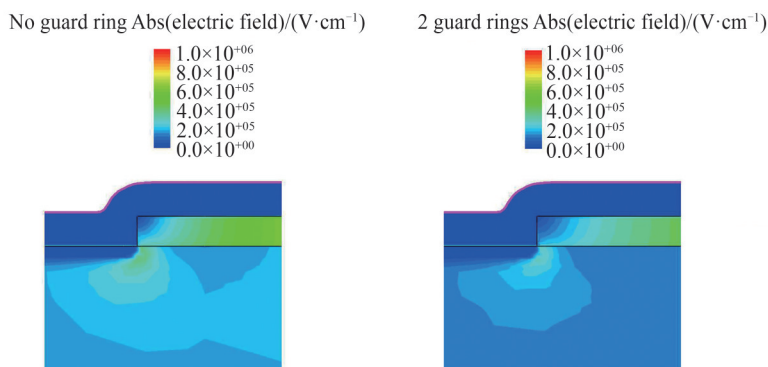


图13 电流收集环结区附近的电场分布(1 000 V 偏压)  
Fig.13 Electric field distribution near the current collecting ring junction area (1 000 V bias)

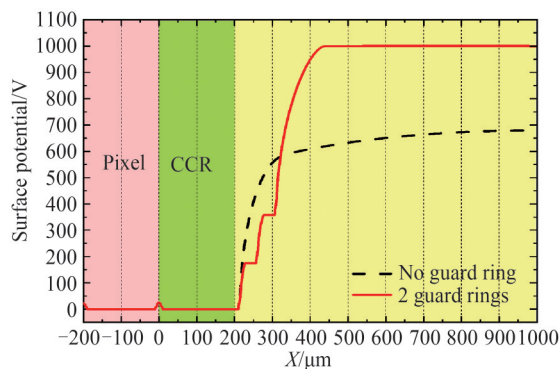


图 14 不同保护环结构的表面电势分布(1 000 V 偏压)

Fig.14 Surface potential distribution of different guard ring structures (1 000 V bias)

图 15 是将图 12 中各个保护环的击穿电压提取出来,反映了击穿电压和保护环个数之间的关系。如图随着保护环数目的增加电流收集环的击穿电压也在增加,但是当保护环的数目增加到 4 环时,击穿电压增长的趋势变缓。第一个保护环位置处的电势对电流收集环结区附近的电场强度有很大影响。图 16 是在 1 000 V 偏压的条件下,第一个保护环位置处的电势向电流收集环方向降落的情况。随着保护环数目的增加,第一个保护环位置处的电势在降低,且降低的幅度也在减小,当保护环数目由 8 环增长到 10 环时,第一环上电势降落幅度很小,这说明当保护环增加到一定数目时对器件击穿电压的提升效果也变得缓慢。

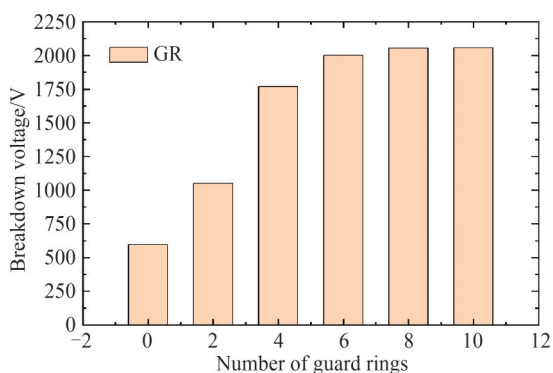


图 15 电流收集环击穿电压随保护环数目的变化

Fig.15 The breakdown voltage of the current collecting ring changes with the number of guard rings

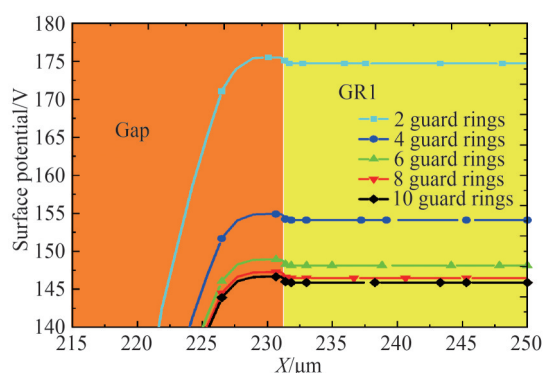


图 16 第一个保护环附近的电势降落分布(1 000 V 偏压)

Fig.16 Distribution of potential drop near the first guard ring (1 000 V bias)

## 4 结论

本文基于 TCAD 技术,针对 PIN 二极管型硅像素传感器阵列的保护环结构进行仿真研究。研究发现:非等间距保护环结构可以使边缘位置处的表面电势更平缓地降落到电流收集环位置处,因此非等间距保护环结构比等间距保护环结构拥有更好的耐高电压性能。相较于向内延伸逐环增加的 Al 悬挂结构,保护环上内外延伸一致的 Al 悬挂结构可以降低第一个保护环位置处的表面电势;所以对于非等间距保护环结构,内外延伸一致的 Al 悬挂结构比向内延伸逐环增加的 Al 悬挂结构拥有更好的防击穿保护作用。保护环的数目会改变第一个保护环位置处的表面电势,随着保护环数目的增加,第一个保护环位置处的表面电势也在减小;因此随着保护环数目的增加,器件的击穿电压也在提高。综上,在 Al 悬挂结构内外延伸一致的条件下,选用 10 个非等间距排布的保护环结构能使传感器的耐高电压性能达到最优,击穿电压可超过 2 000 V。对于自由电子激光硬 X 射线这样具有高亮度、短脉冲特性的光源,需要对传感器施加大的偏置电压来避免因高亮度射线在硅像素传感器体内产生的电荷屏蔽效应。经过优化后的保护环结构,为可满足自由电子激光硬 X 射线探测任务而研发的传感器提供了可行性的设计参考方案。

## 参考文献

- [1] GRAAFSMA H. Hybrid pixel array detectors enter the low noise regime [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2016, 23(2): 383-384.
- [2] PONCHUT C, VISSCHERS J, FORNAINI A, et al. Evaluation of a photon-counting hybrid pixel detector array with a synchrotron X-ray source [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2002, 484(1): 396-406.
- [3] LIU Peng. The application and development of detectors for synchrotron radiation [J]. *Physics*, 2007(8): 595-601.  
刘鹏. 同步辐射探测器的应用与发展 [J]. *物理*, 2007(8): 595-601.
- [4] LI Zhenjie, JIA Congyun, HU Lingfei, et al. Study of silicon pixel sensor for synchrotron radiation detection [J]. *Chinese Physics C*, 2016, 40(3): 036001.
- [5] ZHAO Yu, LI Zhiping, LIU Weihang, et al. Physics issues of the diffraction-limited storage ring light source [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(24): 2587-2600.  
赵瑀, 李志平, 刘伟航, 等. 衍射极限储存环光源相关物理问题 [J]. *科学通报*, 2020, 65(24): 2587-2600.
- [6] 赵璇, 张文凯. X射线自由电子激光: 原理、现状及应用 [J]. *现代物理知识*, 2019, 31(2): 47-52.
- [7] SEIBT W, SUNDSTRÖM K E, TOVE P A. Charge collection in silicon detectors for strongly ionizing particles [J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1973, 113(3): 317-324.
- [8] BOHNE W, GALSTER W, GRABISCH K, et al. The influence of plasma effects on the timing properties of surface-barrier detectors for heavy ions [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1985, 240(1): 145-151.
- [9] BECKER J, ECKSTEIN D, KLANNER R, et al. Impact of plasma effects on the performance of silicon sensors at an X-ray FEL [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2010, 615(2): 230-236.
- [10] KLANNER R, BECKER J, FRETWURST E, et al. Challenges for silicon pixel sensors at the European XFEL [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2013, 730: 2-7.
- [11] SCHWANDT J, FRETWURST E, KLANNER R, et al. Design of the AGIPD sensor for the European XFEL [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2013, 731: 252-254.
- [12] MEZZA D, ALLAHGHOLI A, BECKER J, et al. Characterization of the AGIPD1.1 readout chip and improvements with respect to AGIPD1.0 [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2019, 945(6): 162606.
- [13] SAINI N, SRIVASTAVA A K, KAMESWARA R K. Design and development of radiation hard p + n Si pixel detector for the next generation photon science experiment [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 26: 3466-3472.
- [14] KAO Y C, WOOLLEY E D. High voltage planar p-n junctions [C]. *IEEE*, 1967.
- [15] ADLER M S, TEMPLE V A K, FERRO A P, et al. Theory and breakdown voltage for planar devices with a single field limiting ring [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1977, 24(2): 107-113.
- [16] BALIGA B J. Closed-form analytical solutions for the breakdown voltage of planar junctions terminated with a single floating field ring [J]. *Solid-State Electronics*, 1990, 33(5): 485-488.
- [17] BRIEGER K, GERLACH W, PELKA J. Blocking capability of planar devices with field limiting rings [J]. *Solid-State Electronics*, 1983, 26(8): 739-745.
- [18] AVSET B S, EVENSEN L. The effect of metal field plates on multiguard structures with floating p+ guard rings [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A*, 1966, 377(2-3): 397-403.
- [19] BISCHOFF A, FINDEIS N, HAUFF P D, et al. Breakdown protection and long-term stabilisation for Si-detectors [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A*, 1993, 326(1-2): 27-37.
- [20] BOISSON V, HELLEY M L, CHANTE J. Analytical expression for the potential of guard rings of diodes operating in the punchthrough mode [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1985, 32(4): 838-840.
- [21] BAE D G, CHUNG S K. An analytical model for punch-through limited breakdown voltage of planar junction with multiple floating field limiting rings [J]. *Solid-State Electronics*, 2000, 44(12): 2109-2116.