

文章编号: 1672-2892(2012)05-0616-05

Si SOI 微剂量探测器电荷收集特性数值模拟

唐 杜, 刘书焕, 李永宏, 贺朝会

(西安交通大学 核科学技术学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 采用数值模拟软件 TCAD 对影响绝缘体上硅(SOI) PIN 微剂量探测器灵敏区电荷收集特性的主要因素进行了模拟与分析。分析了 3 MeV α 粒子在 PIN 探测器内沉积能量产生的瞬时电流随探测器偏置电压(10 V 至 50 V)和掺杂浓度、粒子入射方向的变化。模拟结果表明, 随着反偏电压的增大, 载流子复合效应降低, 瞬态电流增加; 当 n+ 区域反偏电压为 10 V 时, 由 α 粒子入射产生的空间电荷在 1 ns 内几乎全部被收集, 电荷收集效率接近 100%; 辐射产生的瞬时电流随探测器各端掺杂浓度的增大而减小。

关键词: 微剂量探测器; 瞬时电流; 空间电荷; TCAD 模拟

中图分类号: TN34; TL814

文献标识码: A

Numerical simulation of charge collection characteristics of Si SOI microdosimeter

TANG Du, LIU Shu-huan, LI Yong-hong, HE Chao-hui

(School of Nuclear Science Technology, Xi'an Jiao Tong University, Xi'an Shaanxi 710049, China)

Abstract: 2D simulation of the main influence factors on the charge collection characteristics of Silicon On Insulator(SOI) PIN microdosimeter was performed with TCAD software. The transient current in the microdosimeter induced by 3 MeV alpha particle was calculated at different applied voltages(from 10 V to 50 V), doping concentrations and alpha incident directions. The simulation results show that the transient current increases with the increase of reverse bias voltage due to the decrease of the carrier recombination effect; and the space charges induced by alpha particle are almost collected in 1 ns with 10 V applied to the n+ region at the charge collection efficiency nearly 100%; and the transient current decrease when the doping concentration of each region increases.

Key words: microdosimeter; transient current; space charge; TCAD simulation

自 20 世纪 50 年代末 Rossi 教授提出微剂量学概念之后, 国际上对微剂量的研究日益增多^[1-3]。Rossi 教授认为^[1], 电离辐射产生的生物效应不仅取决于受照生物体的宏观受照剂量, 而且取决于辐射粒子在生物体细胞内能量沉积的时间、空间分布。研究表明, 活体组织的辐射伤害是在微米甚至更小的尺度上发生的^[4]。辐射粒子入射到电子器件内, 产生单粒子效应, 其作用机理也与辐射粒子在其微米、纳米级灵敏体积内的能量沉积分布有关。在辐射防护、放射生物学以及电子器件的辐射效应等领域中, 需要采用微剂量学方法来确定在微小尺寸中能量沉积模式^[5]。因此, 研究电离辐射在微观空间内的能量沉积, 对于半导体器件的辐射效应、放射生物学、放射治疗、核医学应用有至关重要的意义。

1 微剂量探测器工作原理及新型结构

Nai Shyan Lai 等人^[6-8]设计了一种新型基于 SOI 技术圆柱形 PIN 阵列半导体探测器, 可用于模拟电离辐射在生物组织器官微观空间内的能量沉积, 也可用于模拟空间环境中航天器器件受到重离子入射时的能量沉积。其工作原理是: 当高能粒子入射到探测器的灵敏区时, 在硅材料中沉积能量, 电离产生的大量电子-空穴对在外加电

场作用下进行漂移运动,最后电子和空穴分别被 n 区和 p 区所收集,产生瞬时电流脉冲。该阵列探测器由 2 500 个圆柱形 PIN 硅探测器串接,形成阵列结构,采用 SOI 技术,并且在 PIN 二极管外围添加了一个 n+型掺杂的保护环。同其他探测器相比,这种新型的探测器具有几方面的优势:采用圆柱形结构可以最大化灵敏体积,提高信噪比;将 2 500 个 PIN 探测器单元串接起来组成阵列结构,可以提高探测器的灵敏度^[9-10];与 PN 探测器相比,该新型探测器多了一个本征区,称为 I 区,又称为补偿区,受主杂质和施主杂质在补偿区中能达到精确平衡,因此具有精确定义的灵敏体积,增大了灵敏区的宽度;采用了 SOI 工艺中的氧化层绝缘技术,显著降低了结区下部的氧化层下方 Si 衬底载流子扩散效应的影响;在灵敏体积外添加了一个 n 型掺杂的保护环结构,可有效防止灵敏体积外的电荷收集,有效提高了电荷收集效率。在文献[7]中提出了 8 种不同结构的探测器,如表 1 所示。

表 1 不同结构的微剂量探测器参数
Table 1 Parameters of microdosimeter with different structures

type of structure	parameters				
	substrate thickness/ μm	n+GR type	doping pattern	sensitive region width/ μm	sensitive area of single PIN / μm^2
1	2	DGR	impurity diffusion	≈ 2	≈ 50
2	2	GRE			
3	10	DGR			
4	10	GRE			
5	2	DGR	ion implant	≈ 6	≈ 169
6	2	GRE			
7	10	DGR			
8	10	GRE			

表中, n+GR 类型一栏, DGR(Define Annulus Guard Ring)代表 n+保护环, GRE(Guard Ring Everywhere)代表除了灵敏体积外,在一个 PIN 探测器单元内其他区域均为保护环结构,如图 1 所示。图 1 列出了 4 种不同类型的探测器俯瞰图。

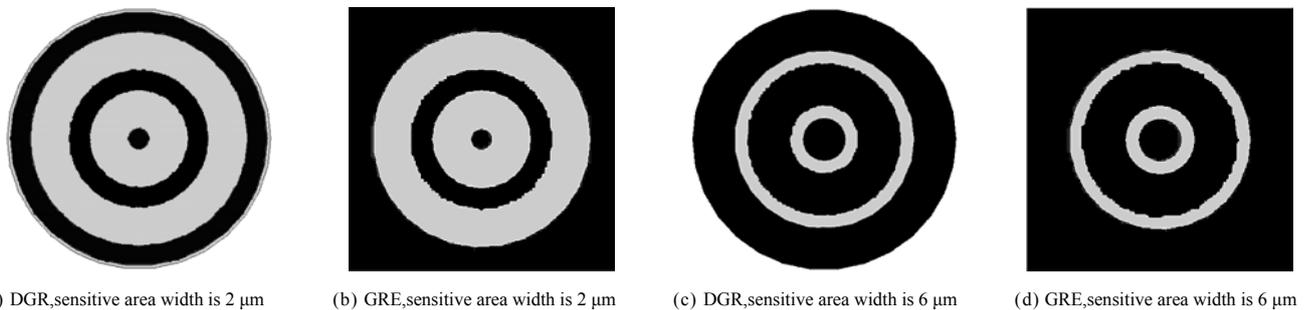


Fig.1 Bird's eye views of different structures
图 1 不同结构俯瞰图

实际工艺中,掺杂主要有扩散和离子注入 2 种方式,采用离子注入的方法相对于扩散掺杂能获得更大的总灵敏体积和更高的灵敏度。图 2 示出了 2 种 PIN 探测器单元的完整结构。图 2(a)~(c)为表 1 中第 3 种结构,图 2(d)~(f)为第 7 种结构。探测器电极置于 n+和 p+掺杂中心的顶端,灵敏区宽度分别为 $2 \mu\text{m}$ 和 $6 \mu\text{m}$,灵敏区面积分别约为 $50 \mu\text{m}^2$ 和 $169 \mu\text{m}^2$,掺杂深度分别为 $2 \mu\text{m}$ 和 $0.57 \mu\text{m}$ 。n+区杂质为磷(P), p+区杂质为硼(B), n+保护环杂质为磷(P),掺杂峰浓度均为 $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$,表层硅厚度 $10 \mu\text{m}$,埋氧层厚度 $2 \mu\text{m}$,埋氧层下衬底厚度 $500 \mu\text{m}$ 。在探测器表面添加了厚度为 100nm 的 SiO_2 层, n+区、p+区、n+GR 上制作了厚度为 200nm 的金属铝电极。

2 模拟

本文基于第 7 种类型的结构进行模拟。为了获得探测器收集电流曲线随反偏电压和掺杂的变化以及空间电荷的时间空间分布情况,模拟了不同反偏电压情况下的电场和电势分布, 3MeV α 粒子入射到灵敏体积时空间电荷分布情况以及不同工艺参数对 α 粒子入射瞬时电流收集效率的影响。

采用数值模拟工具 Sentaurus TCAD 模拟,在 mesh 模块中绘出探测器结构,编写代码定义探测器的掺杂和网格,在 sdevice 模块中编写代码定义探测器的输入输出、各端电压、物理模型和数学模型。模拟时使用了漂移扩散模型,模型能自洽求解泊松方程、电子空穴连续方程和载流子输运方程。复合模型部分考虑了 Shockley-Read-Hall(SRH)复合和 Auger 复合。

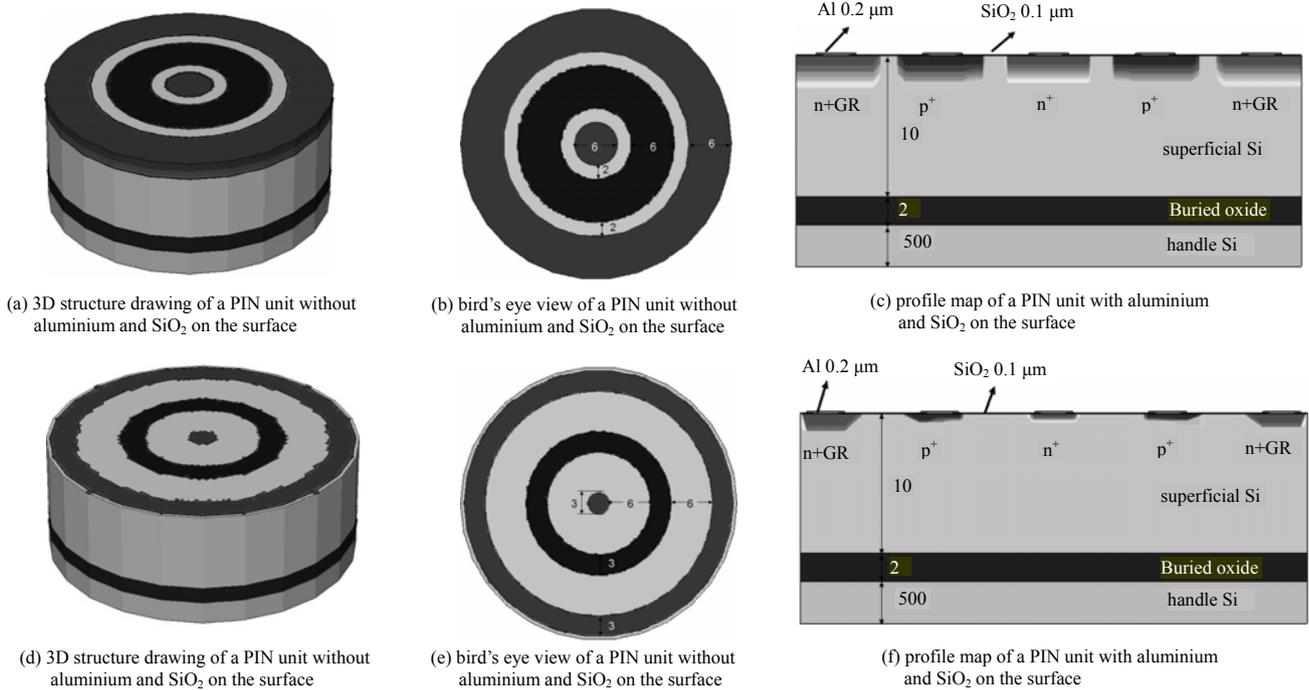


Fig.2 Structure parameters of two different kinds of PIN cell
图 2 两种不同 PIN 单元的结构参数

在 n+端加上 10 V 至 50 V 反向偏压时，电场和电势随空间变化的分布情况如图 3 和图 4 所示。在 n+外围区域的电场最大值达到了 10⁵ V/cm 量级，电场随着离 n+中心距离的增大而迅速减小，呈 1/r 规律分布

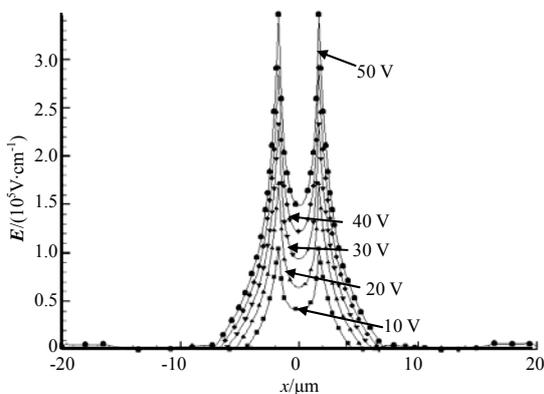


Fig.3 Spatial distribution of electric field with different reverse bias voltages applied to n+ region
图 3 n+端加反向偏压时电场的空间分布

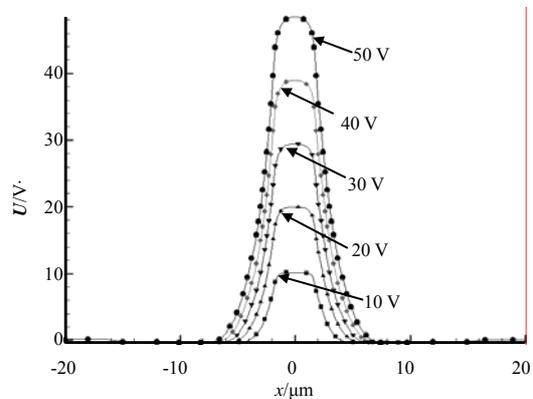


Fig.4 Spatial distribution of electric static potential with different reverse bias voltages applied to n+ region
图 4 n+端加反向偏压时电势的空间分布

由于在 n 区和 p 区中间增加了一个 I 层，I 层的电阻很大，外加电压主要施加在 I 层，当辐射穿过半导体材料时，产生的电子-空穴对会立即被外加电场分离，并做快速漂移运动，最后到达收集极，产生电流脉冲。本文模拟了一个 3 MeV 的 α 粒子入射到灵敏体积时空间电荷在不同时刻的空间分布情况，模拟结果如图 5 所示。模拟结果表明，当反向偏压为 10 V 时，在粒子入射后约 1 ns 内，电荷几乎全部收集。

PIN 探测器有特殊的结构，在 p 区和 n 区间有一个 I 区，其电荷收集效率依赖于探测器外加偏压。由图 3 可知，当外加反向偏压增大时，补偿区的电场随之增大，高能粒子入射产生的电子在高电场作用下被加速，产生很高的能量，在漂移过程中与其他原子发生碰撞，使原子发生电离，产生更多电子-空穴对，新产生的电子被高电场加速，又会使更多的原子发生电离，产生更多的电子-空穴对，从而产生雪崩倍增效应，使 n+端收集电流急剧增大。在 n+端分别加上 10 V, 20 V, 30 V, 40 V 和 50 V 反向偏压时，受到 3 MeV α 粒子入射时产生的瞬时电流脉冲的模拟结果如图 6 所示。模拟结果表明，n+端反向偏压越大，产生的瞬时电流就越大。增大反偏电压而获得探测器内部的雪崩放大是可能的，利用载流子的雪崩放大可以提高电流增益。

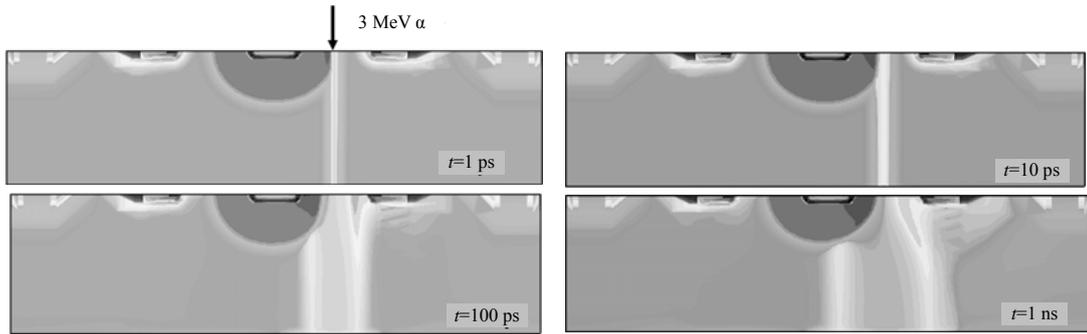


Fig.5 Spatial distribution of space charge induced by a 3 MeV alpha particle at 1 ps,10 ps,100 ps,1 ns
图 5 3MeV α 粒子入射到灵敏体积后 1 ps,10 ps,100 ps,1 ns 时的空间电荷的分布

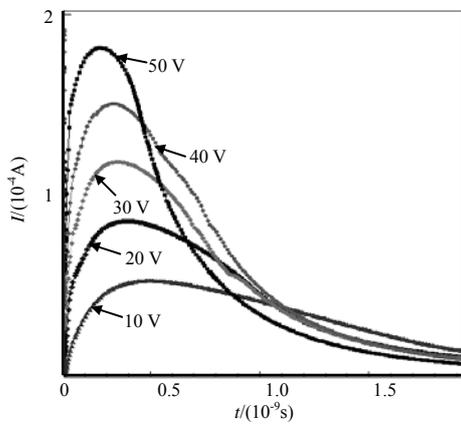


Fig.6 Transient current curve with different voltages applied to n+ region
图 6 n+端施加不同反向偏压时瞬时电流

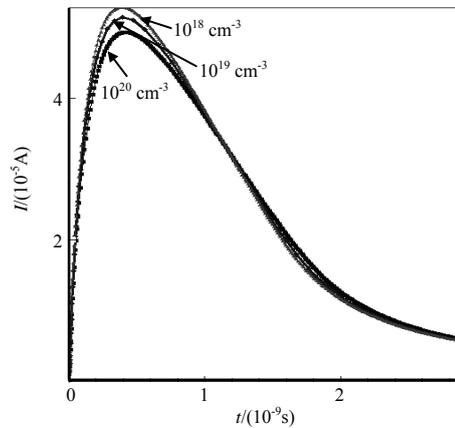


Fig.7 Transient current curve with different doping concentration
图 7 不同掺杂浓度下 α 粒子入射瞬时电流

高掺杂区域的掺杂浓度对收集电流也有影响,当 n+区、p+区、n+GR 区都采用峰浓度为 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,3 MeV α 粒子入射到灵敏体积内产生的瞬时电流见图 7。由模拟结果得出,掺杂浓度越高,产生的收集电流越小。这是因为掺杂浓度越高,载流子横向扩散越严重,探测器收集的电荷比例减小。

不同方向入射的 α 粒子产生的收集电流也不同, α 粒子分别从(2,1),(1,1),(0,1),(-1,1)方向入射到探测器灵敏体积内(如图 8 所示),探测器收集到的电流如图 9 所示。 α 粒子越偏向于 n+方向入射,收集电流越大。

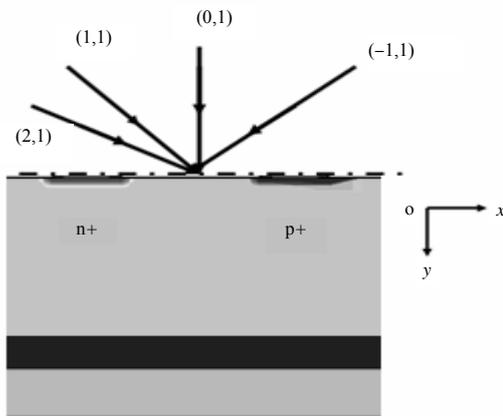


Fig.8 Alpha incident directions
图 8 改变粒子入射方向

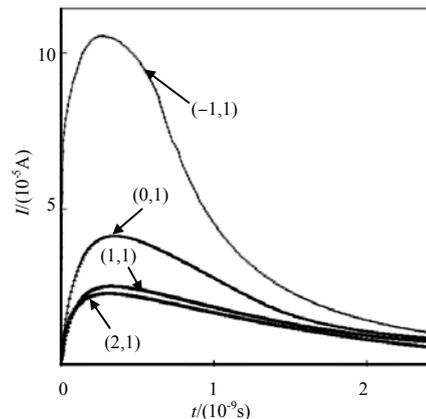


Fig.9 Transient current curve with different incident directions
图 9 改变粒子入射方向时瞬时电流

3 结论

模拟结果表明,随着 n+端反向偏压增大,n+端的收集电流增大了,探测器内部可发生雪崩放大;p+区和 n+

区掺杂浓度越高,辐射产生的收集电流越小。这种新型的探测器具有明确定义的灵敏体积和接近100%的电荷收集效率,克服了以前设计的探测器的不足,有望成为新一代SOI微剂量探测器。

参考文献:

- [1] Rossi H H. Microscopic energy distribution in irradiated matter,Radiation Dosimetry[M]. New York:Academic Press, 1968.
- [2] Dyer C S,Comber C,Truscott P R,et al. Microdosimetry code simulation of charge-deposition spectra,single-event upsets and multiple-bit upsets[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 1999,46(6):1486-1493.
- [3] Liberti M,Apollonio F,Merla C,et al. Microdosimetry in the Microwave Range:A Quantitative Assessment at Single Cell Level[J]. Antennas and Wireless Propagation Letters,IEEE, 2009,8:865-868.
- [4] 张文仲,郭勇. 微剂量学的发展及其应用[J]. 辐射防护, 2004,24(6):388-398. (ZHANG Wenzhong,GUO Yong. Development and Application of Microdosimetry[J]. Radiation Protection, 2004,24(6):388-398.)
- [5] 张庆祥,侯明东,甄红楼. 基于半导体集成电路辐射效应的空间辐射环境探测器[J]. 核电子学与探测技术, 2002,22(4):374-376. (ZHANG Qingxiang,HOU Mingdong,ZHEN Honglou. Dosimeters based on radiation effects of Si ICS[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2002,22(4):374-376.)
- [6] Nose H,Matsufuji N,Kase Y,et al. Biological dose distribution analysis with microdosimetry;experiment and Monte Carlo simulation[C]// Nuclear Science Symposium Conference,Record,2007. Honolulu,HI:[s.n.], 2007:4680-4684.
- [7] Nai S L,Wee H L,Ziebell A L,et al. Development and Fabrication of Cylindrical Silicon-on-Insulator Microdosimeter Arrays[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2009,56(3):1637-1641.
- [8] Ziebell A L,Lim W H,Reinhard M I,et al. A Cylindrical Silicon-on-Insulator Microdosimeter:Charge Collection Characteristics[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2008,55(6):3414-3420.
- [9] 欧阳晓平,王义,曹锦云,等. 高灵敏大面积硅PIN探测器阵列[J]. 核电子学与探测技术, 2000,20(5):329-331. (OU YANG Xiaoping,WANG Yi,CAO Jinyun,et al. High-sensitivity large-area Si PIN Detectors Array[J]. Nuclear Electronics & Deection Technology, 2000,20(5):329-331.)
- [10] 胡孟春,叶文英,唐章奎,等. 提高电流型PIN探测器灵敏度的方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2005,24(1):2-4. (HU Mengchun,YE Wenying,TAN Zhangkui,et al. Study into Methods of Increasing Current Model PIN Detector Sensitivity[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2005,24(1):2-4.)

作者简介:



唐 杜(1988-),女,湖南省株洲市人,在读硕士研究生,主要研究方向为集成电路辐射效应.email:tangdu98@126.com.

刘书焕(1970-),女,河北省邯郸市人,博士,副教授,主要研究方向为核辐射探测器、半导体器件和材料辐射效应、核环境学。

李永宏(1977-),男,西安市人,博士,主要研究方向为集成电路辐射效应。

贺朝会(1966-),男,陕西省武功县人,博士,教授,主要研究方向为电子元器件、大规模集成电路和系统的辐射效应。