

## 全三维电离粒子有源像素探测器优化仿真\*

胡海帆<sup>1)</sup> 王颖<sup>1)†</sup> 陈杰<sup>2)</sup> 赵士斌<sup>2)</sup>

1) (哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

2) (中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

(2014年1月25日收到; 2014年3月6日收到修改稿)

提出了一种双外延高能离子注入的单片集成有源像素探测器的传感器结构, 以提升传感器对电荷的收集性能和辐射加固, 并进行了三维工艺模拟和物理级器件仿真计算. 研究表明, 所提出的传感器结构改善了内部电场和电势的分布, 且目标电极的电荷收集效率提高70%, 电荷收集时间减少64%. 此外, 当等效中子辐射流通量在 $10^{12}$ — $10^{15}$   $\text{cm}^{-2}$  范围内时, 所提出的传感器结构比标准传感器结构有更高的电荷收集能力.

**关键词:** 单片集成有源像素传感器, 探测器, 电荷收集, 高能离子注入

**PACS:** 07.07.Df, 29.40.Gx, 81.15.-z

**DOI:** 10.7498/aps.63.100702

## 1 引言

相对于成像领域应用中的竞争对手电荷耦合元件<sup>[1-3]</sup>, 单片有源像素传感器 (MAPS) 的广泛使用源于互补金属氧化物半导体 (CMOS) 技术的固有优势, 如低成本、低功耗, 并可集成检测等相关电路在同一芯片上. 近些年, 一些研究报道阐明 MAPS 同样适用于高能物理领域, 如高能物理粒子踪迹追踪实验<sup>[4-6]</sup>.

探测器的辐射能力取决于 MAPS 和电子电路 (EC) 两部分. 现代的工艺加工技术, 可以令 EC 有较高的辐射容忍度, 并且可以应用在线性对撞机 (等效中子辐射流通量  $\Phi_{\text{eq}} = 10^{14}$   $\text{cm}^{-2}$ ) 中<sup>[7,8]</sup>. MAPS 中电荷收集主要依靠热扩散, 辐射会在半导体晶格体内形成缺陷, 除了会降低少数载流子寿命和迁移率外, 还会影响少数载流子的扩散长度, 并且电荷收集效率随着辐射剂量的增加而快速衰退, 因此限制 MAPS 不能在更强的辐射环境中应用. 此外, 由于载流子扩散过程时间太长, MAPS 也不适合在高能物理实验和线性高能对撞机中应

用. 图 1 给出了标准 MAPS 横截面示意图.

尽管 MAPS 内电荷收集部分由轻掺杂外延层和重掺杂衬底构成, 但针对电荷收集敏感区域的改进研究仍在进行. 2004年, Dulinski 等<sup>[9]</sup>提出了无外延层 CMOS-MAPS 结构, 研究表明外延衬底并非是 MAPS 不可缺少的结构. 已证明无外延层 MAPS 的抗辐射强度满足很多未来粒子物理应用的要求, 但是最小电离粒子 (MIP) 探测的电荷收集时间和收集效率等特性退化较为严重<sup>[10]</sup>. 因此学者们提出了很多改进措施以增强 MAPS 的电荷收集效率<sup>[11-13]</sup>. 此外, 2011 年付民等<sup>[14]</sup>提出基于高斯分布掺杂衬底的 MAPS 结构, 通过改善载流子漂移机理提高电荷收集效率, 降低载流子收集时间. 但在实际工艺中, 杂质分布会同理想高斯掺杂分布有一定偏差, 因此他们提出的 MAPS 结构很难实现. Parker 等<sup>[15]</sup>提出三维 (3D) 阵列电极的 MAPS 结构, 其电极结构穿透到 MAPS 体硅中. 该结构具有很多优点, 不仅提高了电荷收集速度, 且有较高的辐射容忍度和空间分辨率. 目前, 学者们研究不同的 3D-MAPS 技术以满足极端辐射环境, 如应用在超级线性强子对撞机中<sup>[16]</sup>. 但由于深沟

\* 教育部科学技术研究重大项目 (批准号: 313017)、高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20122304110016) 和中央高等学校基本科研业务费 (批准号: HEUCF130818, HEUCF140814) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wangying7711@yahoo.com

槽工艺同传统 CMOS 工艺兼容性还存在技术难度, 目前很难直接将 3D 技术应用到 MAPS 中.

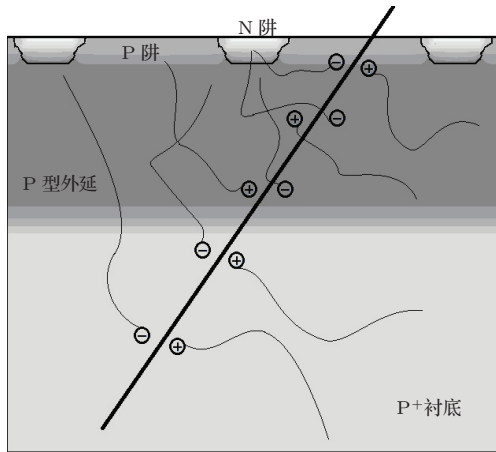


图1 标准 MAPS 横截面示意图

本文提出了一种双外延高能离子注入 (DEI) MAPS 结构, 延伸 N+ 阱至衬底中, 间接构成 3D-MAPS. 并通过初步仿真评估此结构的性能. 该结构可提高 MAPS 性能, 同时免去深沟槽刻蚀工艺, 简化实际制造难度. 此 DEI-MAPS 既可明显改善电荷收集时间和电荷收集效率, 又能有效提高辐射加固性能.

## 2 DEI-MAPS 结构

为了证明推论, 并评估电荷收集性能的改善情况, 采用 Silvaco 公司研发的 TCAD 模拟器进行一系列模拟研究<sup>[17-20]</sup>, 由 L-Edit 版图编辑软件绘制版图并以 GDSII 格式输出文件, 再导入 Maskviews 版图编辑软件, 结合 Victory Process Cell (VPC) 3D 工艺仿真模块构建出 DEI-MAPS 模型. 用 ATLAS3D 器件计算模块和 Tonyplot3D 分析模块对比研究 DEI-MAPS 和标准 MAPS 的结构特性.

基于 2008 年研制出的 MIMOSA-26 芯片, DEI-MAPS 和标准 MAPS 的结构模型均简化为  $3 \times 3$  矩阵结构. 标准 MAPS 相邻收集电极间距为  $18 \mu\text{m}$ , 在每个 N+ 电极下方存在  $4.2 \mu\text{m} \times 4.2 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$  的 N 阱结构, 用来收集电极附近带电粒子激发的电子. 在像素中, 所有的 N 阱结构都被 P 阱结构所包围, 以抑制邻近像素串扰和集成 N 型 MOS (NMOS) 晶体管电路. P 型外延层厚度为  $14 \mu\text{m}$ , 电阻率为  $19 \Omega\cdot\text{cm}$  (N 型掺杂浓度为  $7 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ). 这里 P 阱深度约为  $3 \mu\text{m}$ , 且 P+ 衬底厚度约为  $16 \mu\text{m}$ . 图 2 给出了 DEI-MAPS 的  $3 \times 3$  矩阵结构示意图和横截面示意图. 该 DEI-MAPS 工艺与标准 MAPS 工艺相近: 首先, 在 P+ 衬底上外延  $7 \mu\text{m}$  厚的 P 型硅 (P 型掺杂浓度为  $7 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ); 在生成第一层掩膜后, 以  $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$  剂量和  $1000 \text{keV}$  能量注入磷杂质; 高温退火后, 再进行一次 P 型外延和 N+ 离子注入; 在顶层生长  $2 \mu\text{m}$  厚的二氧化硅, 通过第二层掩膜版, 将 N 阱引出作为 MAPS 像素的阴极, P 阱用来形成后续的 NMOS 晶体管. 图 3 给出了 DEI-MAPS 的 3D 工艺步骤示意图.

## 3 模拟研究结果

在对比模拟计算中, 采用准静态模型评估 MAPS 特性. 图 4 (a) 和 (b) 分别给出了在 2 V 反向偏压下, 中心剖面 (图 2) 中  $x = 37 \mu\text{m}$  位置处 DEI-MAPS 和标准 MAPS 的电势和电场分布趋势. 在标准 MAPS 中, 除了收集电极位置, 外延层中电势基本为常量. 而 DEI-MAPS 中高浓度的双 N 阱结构改善了外延层中的电势及电场分布, P 外延层中产生的电子向邻近的 N 阱方向扩散, 而空穴则逐渐扩散到 MAPS 的背部电极.

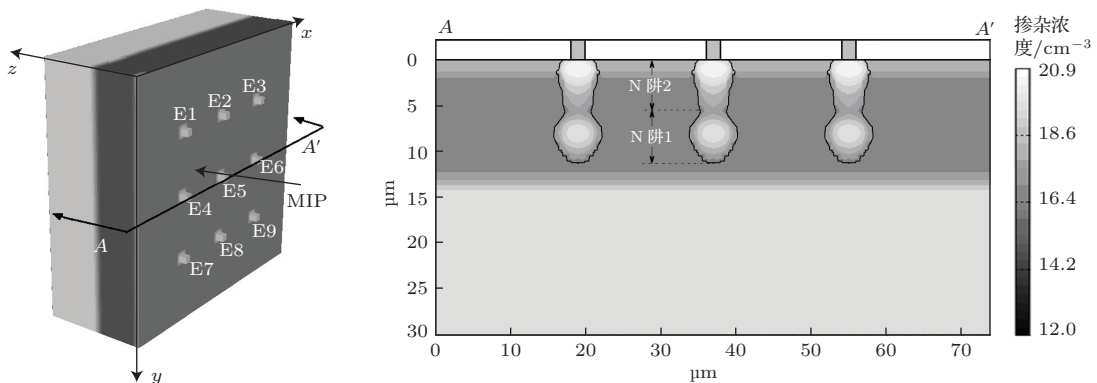


图2 DEI-MAPS 的  $3 \times 3$  矩阵结构示意图及其横截面示意图

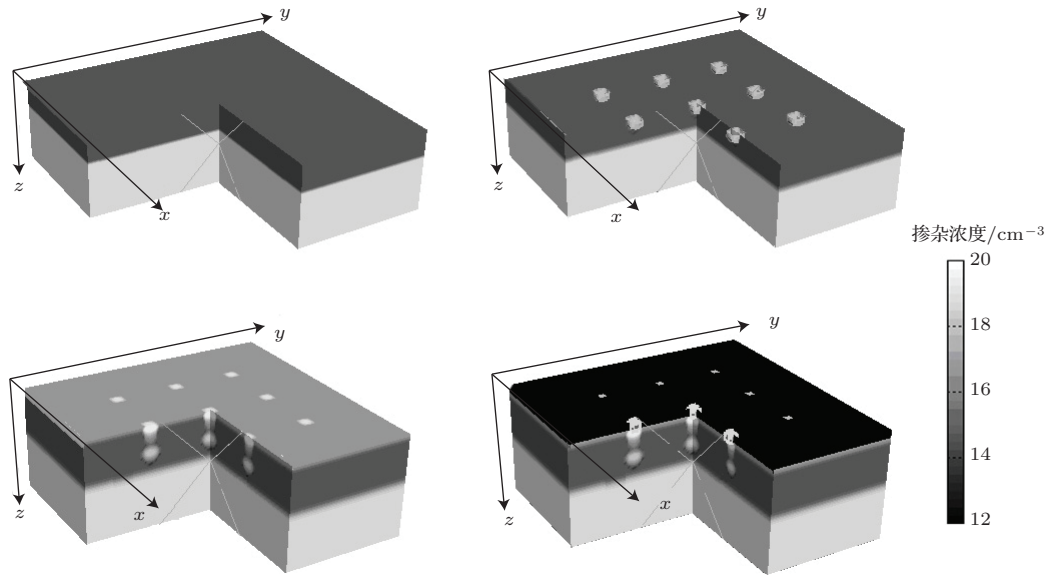


图3 VPC 模拟 DEI-MAPS 工艺步骤

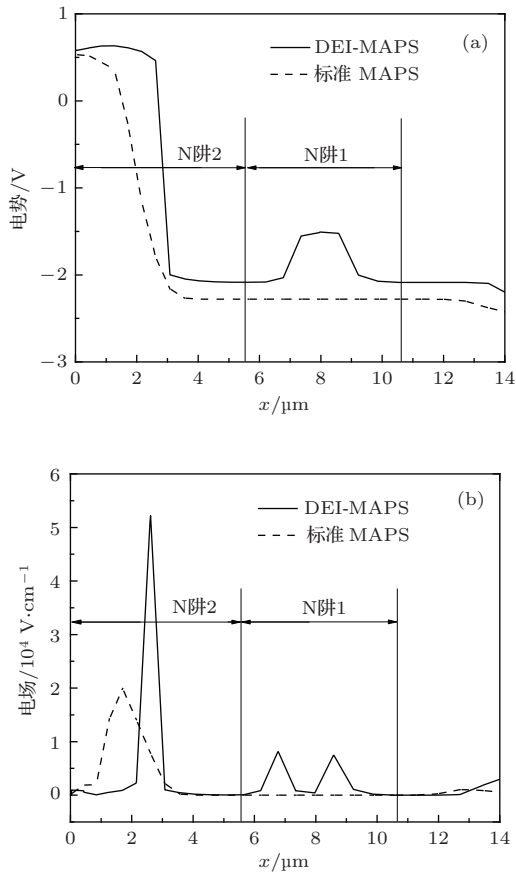


图4 中心剖面中  $x = 37 \mu\text{m}$  位置处, DEI-MAPS 和标准 MAPS 外延层的电势及电场分布趋势的对比,  $0 \mu\text{m}$  为 MAPS 顶部表面位置 (a) 电势分布; (b) 电场分布

在 MAPS 中, 电离粒子主要从器件表面打入, 而粒子产生的电子的收集时间主要由打入位置决定. 打入位置距离电极越近, 信号响应越快. 相反, 当粒子注入到零电场区域时, 电子的移动主要靠热

扩散, 因此信号反应要慢很多. 为了评估电子收集数量以及收集时间, 采用 ATLAS3D 模块对 MAPS 模型进行 MIP 动态模拟计算, 该计算可用单事件翻转过程实现 [21]. 粒子打入并穿通矩阵的中间像素, 具体打入位置为像素对角线的 1/4 位置 (图 2). 沿着粒子入射轨迹, MIP 产生每微米 80 个电子空穴对, 因此对于厚度为  $30 \mu\text{m}$  的 MAPS, 一共产生约 2400 个电子空穴对. 在此情况下, DEI-MAPS 的目标像素电极 (E5) 在 50 ns 时间内收集约 1702 个电子, 而标准 MAPS 收集 1002 个电子. 因此相对于标准 MAPS, DEI-MAPS 电荷收集效率提高了约 70%, 从而提高了像素级信噪比. 图 5 给出了两种 MAPS 目标像素电极 E5 的输出电流.

电荷在邻近像素间串扰会降低目标电极对电荷的收集, 从而降低信噪比, 对 MAPS 的数字输出产生负面效应. 图 6 给出了矩阵 MAPS 各个电极收集电荷的百分比. 相比于标准 MAPS, DEI-MAPS 的目标像素电极 E5 收集电荷由 39% 提高到 73%. 根据粒子打入位置和电极距离的不同, DEI-MAPS 其他非种子电极收集电荷百分比提高约 6%. 很明显, 多数电荷都被目标像素电极所收集, 邻近扩散得到了很好的抑制, 且误击概率和空间分辨率也得到了极大地改善.

DEI-MAPS 和标准 MAPS 的电荷收集时间区别较大, DEI-MAPS 用 19 ns 收集了 90% 的电荷, 而标准 MAPS 则需要 53 ns. 具体电荷收集时间如图 7 所示. 由于电荷的收集时间更依赖于粒子的入射位置 [22], 因此像素间的电荷收集时间也有所不

同. 在 DEI-MAPS 中, 带电粒子激发的电荷会快速地被双 N+ 阱电极收集, 相对于标准 MAPS, 其极大地降低了电荷的漂移距离.

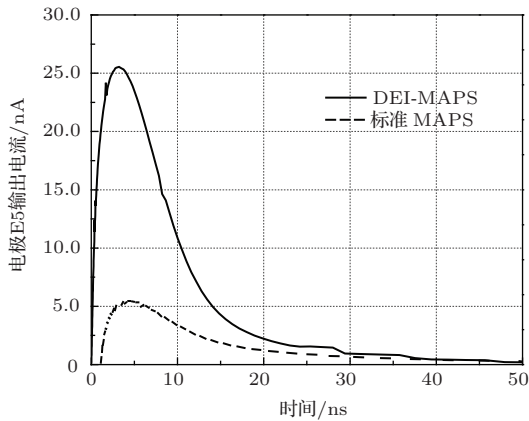


图5 目标像素电极 E5 的输出电流

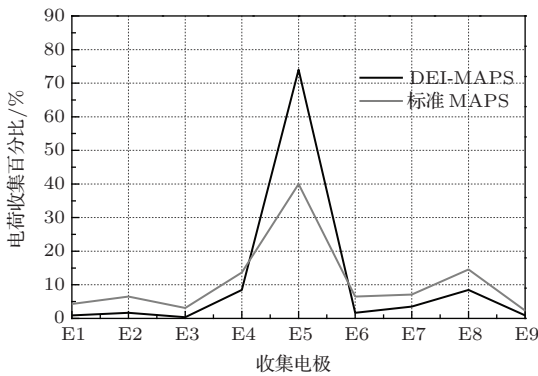


图6 各个电极收集电子的百分比

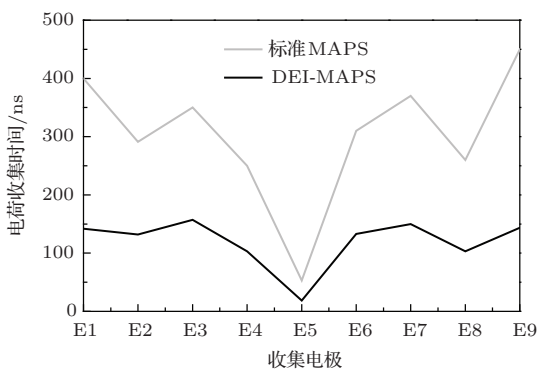


图7 各个电极收集电荷的时间

图8和图9分别给出了 DEI-MAPS 和标准 MAPS 单个像素的电荷收集量和电荷收集时间, 仿真数据由不同位置入射 MIP 时的电荷收集时间获得. 结果表明, 收集时间与 MIP 的入射位置有关, DEI-MAPS 中 P 外延层的双 N+ 阱结构提高了整个像素的电荷收集效率. 若定义电荷收集能力为各个 MIP 打入点的电荷收集个数或收集时间的总

和, 则其表达式:

$$Q_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, l), \quad (1)$$

$$T_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n T_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, l). \quad (2)$$

这里  $Q_i$  为第  $i$  个打入点的电极收集电荷量,  $Q_{\text{tot}}$  为所有打入点的电极收集电荷的总量,  $T_i$  为第  $i$  个打入点的电极收集电荷时间,  $T_{\text{tot}}$  为所有打入点的电极收集电荷的总时间. 相比于标准 MAPS, DEI-MAPS 的电荷收集个数提高约 127.5%, 电荷收集时间降低约 67.9%.

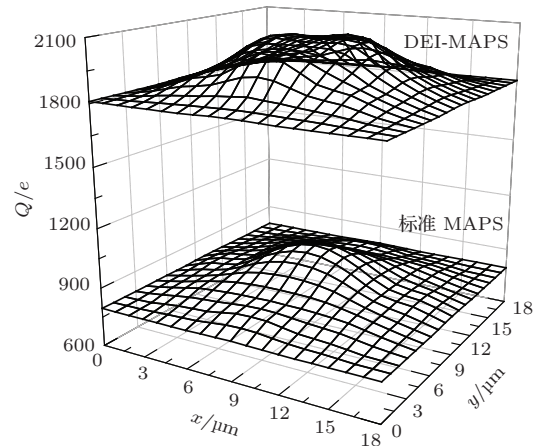


图8 DEI-MAPS 和标准 MAPS 的单像素 MIP 打入位置与电荷收集量关系的对比

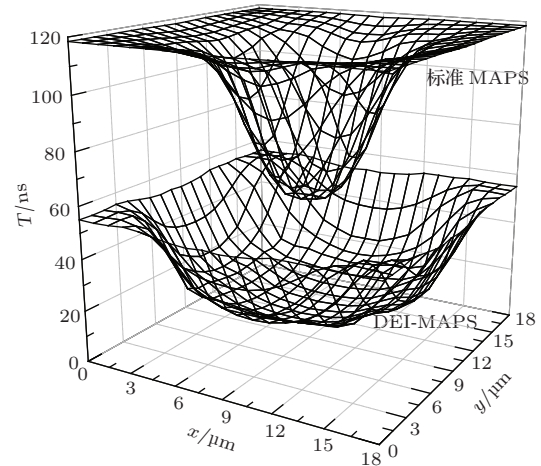


图9 DEI-MAPS 和标准 MAPS 的单像素 MIP 打入位置与电荷收集时间关系的对比

辐射加固对当前和未来的硅辐射探测器都是关键的设计考虑点, 并被期望可以承受较大的辐射流通量 (等效中子的能量为 1 MeV 时,  $\Phi_{\text{eq}} \geq 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ). 在模拟计算体辐射损伤对 MAPS 电荷收集特性的影响时, 引入了三级 P 型硅

缺陷模型, 模型参数列于表 1. 这里  $E$  为能级,  $E_c$  表示导带,  $E_v$  表示价带,  $\sigma_p$  为空穴俘获截面密度,  $\sigma_n$  为电子俘获截面密度,  $\eta$  为引入率,  $V_2^{0/-}$  表示双空位缺陷,  $V_2O^{0/}$  表示含氧双空位缺陷,  $CO^{+/0}$  表示施主缺陷复合体,  $0/-$  表示可俘获电子的受主型,  $+/0$  表示可俘获空穴的施主型. 而辐射后器件表面氧化物中电荷量由  $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  增长到饱和值  $1.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ [23-25].

表 1 Silvaco 公司研发的 TCAD 仿真器中 P 型硅的辐射损伤模型参数

参数	$V_2^{0/-}$	$V_2O^{0/}$	$CO^{+/0}$
$E/E_v$	$E_c - 0.42$	$E_c - 0.50$	$E_v + 0.36$
$\sigma_p/\text{cm}^2$	$8 \times 10^{-15}$	$10^{-15}$	$10^{-16}$
$\sigma_n/\text{cm}^2$	$10^{-16}$	$10^{-16}$	$10^{-15}$
$\eta/\text{cm}^{-1}$	26.00	0.08	1.00

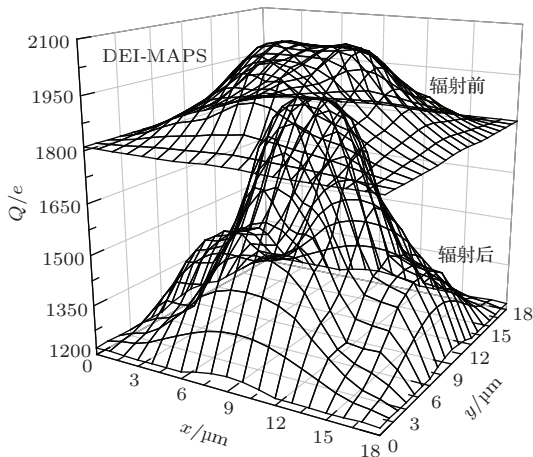


图 10 辐射前后 DEI-MAPS 单像素结构的电荷收集个数的对比, 辐射前  $\Phi_{eq} = 0$ , 辐射后  $\Phi_{eq} = 10^{14} \text{ cm}^{-2}$

图 10 和图 11 分别给出了在辐射条件下 DEI-MAPS 和标准 MAPS 的单像素结构的电荷收集性能. 从图 10 和图 11 可以看出, 经过辐射后, DEI-MAPS 和标准 MAPS 的电荷收集效率都有所退化, 但深 N+ 阱结构增加了所产生的电子的横向漂移. 在辐射前 DEI-MAPS 收集 683238 个电子, 辐射后其收集 511668 个电子; 而标准 MAPS 在辐射前收集 305786 个电子, 辐射后收集 161343 个电子. 由此可知, 经过辐射后 DEI-MAPS 的电荷收集效率从 52.8% 增加到 74.8%. 图 12 给出了两种 MAPS 结构的单像素归一化平均电荷收集效率的对比, 可知当  $10^{12} \text{ cm}^{-2} \leq \Phi_{eq} \leq 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  时, DEI-MAPS 比标准 MAPS 器件有更好的抗辐射效应.

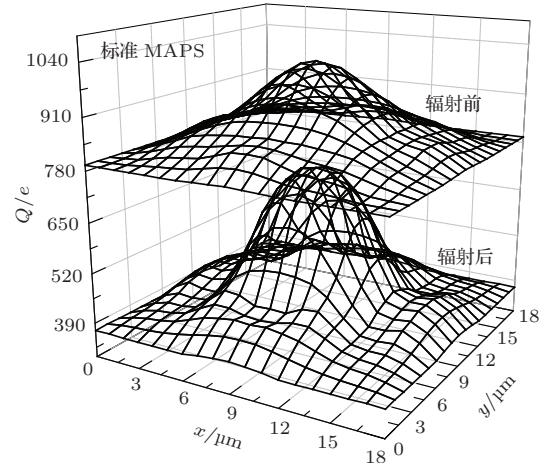


图 11 辐射前后标准 MAPS 单像素结构的电荷收集个数的对比, 辐射前  $\Phi_{eq} = 0$ , 辐射后  $\Phi_{eq} = 10^{14} \text{ cm}^{-2}$

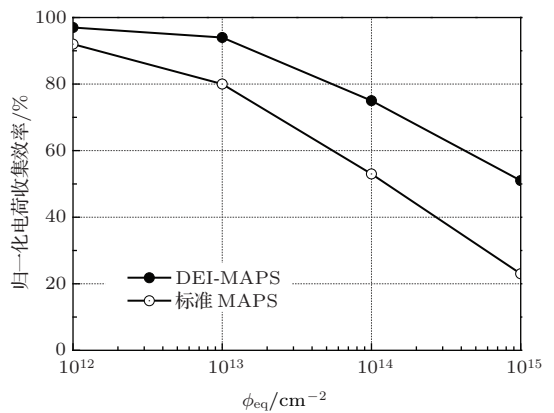


图 12 DEI-MAPS 和标准 MAPS 的单像素归一化平均电荷收集效率的对比

## 4 结 论

为改善电离粒子辐射探测器的电荷收集效率和辐射加固, 本文提出了 DEI-MAPS 结构. 讨论了 DEI-MAPS 工艺的可行性, 并进行了 3D 工艺模拟和物理级器件仿真计算. 结果表明, 所提出的 DEI-MAPS 有效地改善了体内电势、电场分布, 目标像素电极的电荷收集效率提高约 70%, 电荷收集时间降低约 64%. 同时, 在辐射条件下, DEI-MAPS 相比于标准 MAPS 有更高的电荷收集效率. 虽然 DEI-MAPS 有效改善了像素间的电荷串扰, 但没有完全消除, 下一步工作将研究如何根本性屏蔽像素间电荷串扰.

## 参考文献

- [1] Fossum E R 1997 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **44** 1689
- [2] Fossum E R 1993 *Proc. SPIE* **1900** 2

- [3] Wang B, Li Y D, Guo Q, Liu C J, Wen L, Ma L Y, Sun J, Wang H J, Cong Z C, Ma W Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 056102 (in Chinese) [汪波, 李豫东, 郭旗, 刘昌举, 文林, 玛丽娅, 孙静, 王海娇, 丛忠超, 马武英 2014 物理学报 **63** 056102]
- [4] Turchetta R, Berst J D, Casadei B, Claus G, Colledani C, Dulinski W, Hu Y, Husson D, Le Normand J P, Riester J L, Deptuch G, Goerlach U, Higuieret S, Winter M 2001 *Nucl. Instrum. Meth. A* **458** 677
- [5] Ma X Y, Guo Y M, Rao C H, Wei K, Tian Y, Rao X J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 242902 (in Chinese) [马晓燮, 郭友明, 饶长辉, 魏凯, 田雨, 饶学军 2012 物理学报 **61** 242902]
- [6] Ma X Y, Mu J, Rao C H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 072903 (in Chinese) [马晓燮, 郭友明, 饶长辉 2012 物理学报 **61** 072903]
- [7] Claus G, Colledani C, Deptuch G, Dulinski W, Gornushkin Y, Hu Y, Husson D, Orazi G, Turchetta R, Riester J L, Winter M 2001 *Nucl. Instrum. Meth. A* **473** 83
- [8] Noschis E, Eremin V, Ruggiero G 2007 *Nucl. Instrum. Meth. A* **574** 420
- [9] Dulinski W, Berst J D, Besson A, Claus G, Colledani C, Deptuch G, Deveaux M, Gay A, Grandjean D, Gornushkin Y, Himmi A, Hu C, Riester J L, Valin I, Winter M 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 1613
- [10] Deptuch G, Winter M, Dulinski W, Husson D, Turchetta R, Riester J L 2001 *Nucl. Instrum. Meth. A* **465** 92
- [11] Moses W W, Derenzo S E, Melcher C L, Manente R A 1995 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **42** 1085
- [12] Niraula M, Yasuda K, Agata Y, Nakamura A, Aoki T, Hatanaka Y 2003 *IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec.* **5** 3320
- [13] Dorokhov A, Bertolone G, Baudot J, Brogna A S, Colledani C, Claus G, De Masi R, Deveaux M, Dozière G, Dulinski W, Fontaine J C, Goffe M, Himmi A, Hu-Guo Ch, Jaaskelainen K, Koziel M, Morel F, Santos C, Specht M, Valin I, Voutsinas G, Wagner F M, Winter M 2010 *Nucl. Instrum. Meth. A* **624** 432
- [14] Fu M, Tang Z 2011 *Nucl. Instrum. Meth. A* **646** 153
- [15] Parkera S I, Kenneya C J, Segalb J 1997 *Nucl. Instrum. Meth. A* **395** 328
- [16] Piemonte C, Boscardin M, Dalla Betta G F, Ronchin S, Zorzi N 2005 *Nucl. Instrum. Meth. A* **541** 441
- [17] Silvaco International 2012 *Atlas3D User's Manual-Device Simulation Software*
- [18] Silvaco International 2012 *Victory Process Cell User's Manual-Device Simulation Software*
- [19] Silvaco International 2012 *Tonyplot3D User's Manual-Device Simulation Software*
- [20] Silvaco International 2012 *Maskviews User's Manual-Device Simulation Software*
- [21] Claus G, Colledani C, Dulinski W, Husson D, Turchetta R, Riester J L, Deptuch G, Orazi G, Winter M 2001 *Nucl. Instrum. Meth. A* **465** 120
- [22] Deptuch G 2005 *Nucl. Instrum. Meth. A* **543** 537
- [23] Sadrozinski H F W, Betancourt C, Heffern R, Henderson I, Pixley J, Polyakov A, Wilder M, Boscardin M, Piemonte C, Pozza A, Zorzi N, Dalla Betta G F, Resta G, Bruzzi M, Macchiolo A, Borrello L, Messineo A, Creanza D, Manna N 2007 *Nucl. Instrum. Meth. A* **579** 769
- [24] Gao B, Yu X F, Ren D Y, Li Y D, Cui J W, Li M S, Li M, Wang Y Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 036106 (in Chinese) [高博, 余学峰, 任迪远, 李豫东, 崔江维, 李茂顺, 李明, 王义元 2011 物理学报 **60** 036106]
- [25] Zheng Z S, Liu Z L, Yu F, Li N 2012 *Chin. Phys. B* **21** 116104

# Full three-dimensional simulations of optimized active pixel detector for ionizing particle detection\*

Hu Hai-Fan<sup>1)</sup> Wang Ying<sup>1)†</sup> Chen Jie<sup>2)</sup> Zhao Shi-Bin<sup>2)</sup>

1) (*College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

2) (*Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

( Received 25 January 2014; revised manuscript received 6 March 2014 )

## Abstract

In this paper, a double epitaxial and high energy implant (DEI) is proposed to improve the performance of charge collection and radiation hardness. Three-dimensional process procedure and physical level simulation are presented. The results show that the internal distributions of electric potential and electric field are improved; the seed point pixel collected charge increases about 70% and reduces the collected time to 64%. In addition, the DEI structure increases the collecting efficiency in a radiation range from  $10^{12}$  to  $10^{15}$  cm<sup>-2</sup> as compared with the standard monolithic active pixel sensors.

**Keywords:** monolithic active pixel sensors, detector, charge collection, high energy implant

**PACS:** 07.07.Df, 29.40.Gx, 81.15.-z

**DOI:** [10.7498/aps.63.100702](https://doi.org/10.7498/aps.63.100702)

---

\* Project supported by the Foundation for Key Program of the Ministry of Education, China (Grant No. 313017), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20122304110016), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (Grant Nos. HEUCF130818, HEUCF140814).

† Corresponding author. E-mail: [wangying7711@yahoo.com](mailto:wangying7711@yahoo.com)