

钝化层及 P 型基底结构优化对电子轰击型有源传感器电荷收集效率影响的研究

宋园园, 宋德*, 李野, 陈卫军, 刘春阳**

长春理工大学物理学院, 吉林 长春 130022

摘要 为获得高增益的电子轰击型有源传感器(EBAPS),对 EBAPS 成像器件中电子倍增层的电荷收集效率的影响因素进行了研究。基于载流子输运理论,采用蒙特卡罗方法研究了钝化层种类、厚度、入射电子能量、P 型基底厚度和掺杂浓度对二次电子分布及收集的影响。结果表明:为提高入射电子的入射深度进而提高电荷收集效率,宜采用密度小的 SiO₂ 作为钝化层;为了减少钝化层对倍增电子的复合进而提高电荷收集效率,宜降低钝化层厚度和提高入射电子能量;为了降低倍增电子扩散过程中载流子的复合进而提高电荷收集效率,宜降低 P 型基底的厚度和掺杂浓度。

关键词 材料; 传感器; 电子轰击有源像素传感器; 均匀掺杂; 电子倍增层; 钝化层; 电荷收集效率

中图分类号 TN223 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221159

1 引言

电子轰击型有源传感器(EBAPS)又称为电子轰击互补金属氧化物半导体(EBCMOS),是一种可在 10⁻⁴ lx 照度以下对目标进行光电转换、增强、处理的数字化成像器件^[1-2]。该器件具有高增益、高分辨率、低噪声以及超低照度下无须制冷等优点,主要用于便携式和机载军用夜视设备中,是数字化微光成像器件的一个重要发展方向^[3],在单光子探测、天文探测和生物成像等领域具有广阔的应用前景^[4]。

2009 年, Dominjon 等^[5]以 X 光作为入射光源,测得 EBAPS 在均匀掺杂下的电荷收集效率为 32%,在梯度掺杂下的电荷收集效率为 60%。2011 年, Barbier 等^[6]通过实验对比证实了 EBCMOS 在均匀掺杂下的电荷收集效率最高可达 32%,在梯度掺杂下的电荷收集效率最高可达 66%。2016 年, Hirvonen 等^[7]研究了电子空穴对在器件内的产生过程以及加速电压与倍增电子数量之间的关系。2017 年,本课题组^[8]率先通过实验证实了倍增电子的存在。2018 年,刘虎林等^[9]采用 100 nm 厚氧化铝钝化层背减薄 CMOS 芯片制备了紫外光响应 EBCMOS,实现 0.04 lx 光照度下的探测。同年,本课题组对 65 μm 厚电子倍增层进行了增益测试实验,结果显示:随着入射电子能量的增加,电子倍增层的增益逐渐增大。2020 年,乔凯等^[10]建立了局部

电子运动轨迹模型,并通过实验对该模型进行了验证。

笔者基于载流子输运理论,采用蒙特卡罗模拟算法,建立了 EBAPS 中钝化层和电子倍增层内倍增电子输运过程的计算模型,分析了结构参数对二次电子分布的影响,并研究了钝化层种类、厚度、入射电子能量、P 型基底厚度和掺杂浓度对电荷收集效率的影响。本文模拟结果可为器件制备提供理论依据。

2 物理模型

2.1 基本原理

EBAPS 采用近贴聚焦结构,其阴极为光电阴极,阳极为背面轰击型 APS 阵列传感器(BSB-APS)^[11]。BSB-APS 取代 ICCD 中的微通道板、荧光屏和纤维光学耦合器件作为阳极。光电阴极发射的光电子经近贴聚焦系统直接入射到 BSB-APS,如图 1(a)所示。图 1(b)是 BSB-APS 背面电子轰击一侧的电子倍增及电荷收集过程示意图。EBAPS 的基本工作原理是:光电阴极产生的光电子经高压电场加速后轰击背部减薄有源像素传感器表面,通过电子轰击半导体获得电子增益,最后通过读出电路放大并读出相应电信号。

电荷收集效率是器件性能优劣的一个重要评价指标,并且对器件中电子倍增层增益的影响很大。电子倍增层增益倍数的计算公式为

收稿日期: 2022-08-16; 修回日期: 2022-10-13; 录用日期: 2022-11-21; 网络首发日期: 2022-12-03

基金项目: 国家自然科学基金联合“叶企孙”科学基金(U2141239)、吉林省教育厅 2021 年度科学技术研究规划重点项目(JJ-KH20210800KJ)、吉林省产业创新专项资金项目(2019C043-6)

通信作者: *songde_cust@163.com; **liucy169@nenu.edu.cn

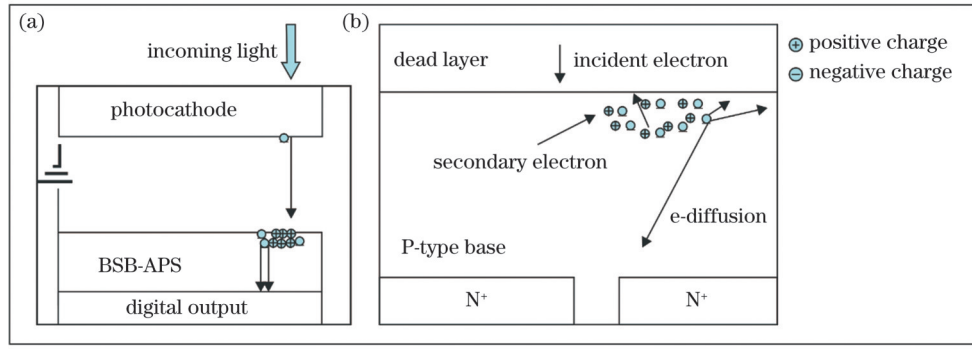


图 1 EBAPS 结构以及电子倍增和电荷收集过程。(a)EBAPS 结构;(b)电子倍增及电荷收集过程

Fig. 1 EBAPS structure and electrons' multiplication and charge collection process. (a) EBAPS structure; (b) electrons' multiplication and charge collection process

$$G = \epsilon \times \frac{E_0 - E_{\text{dead}}}{W}, \quad (1)$$

式中: E_0 为入射光电子能量; E_{dead} 为电子经过钝化层损失的能量; W 为入射电子产生一个电子-空穴对所消耗的能量, Si 材料对应的 W 为 3.6 eV; ϵ 为电荷收集效率。由式(1)可见, 增益值与电荷收集效率成正比, 因此有必要研究电荷收集效率的影响因素。

2.2 入射电子倍增过程

低能电子入射到背减薄有源像素传感器后透过钝化层在电子倍增层处发生电子倍增, 倍增过程中入射电子伴随着散射。散射主要包括弹性散射和非弹性散射。电子发生弹性散射时, 一般只改变电子运动的方向, 而能量损失较少, 损失的能量远远小于其自身的能量。在非弹性散射情况下, 电子相继碰撞时能量是连续减少的, 能量损失符合修正的 Bethe 失能定律。当入射电子入射到背减薄有源像素传感器并在钝化层和电子倍增层中运动时, 不能预知某一个电子是如何运动的, 这是由于其运动规律具有随机性。笔者选用蒙特卡罗模拟的方法, 对大量入射电子在电子倍增层中的运动轨迹进行模拟。由于入射电子的能量低于 20 keV, 而且能量随着其在倍增层中散射而减少, 因此电子与原子散射截面(σ_T)需采用修正的卢瑟福散射截面公式进行计算。该公式为

$$\sigma_T = \frac{3.0 \times 10^{-18} Z^{1.7}}{(E + 0.005Z^{1.7}E^{0.5} + 0.0007Z^2/E^{0.5})}, \quad (2)$$

式中: Z 为原子序数; E 为电子能量。该公式适用于 0.1~30 keV 范围的低能入射电子^[12]。

考虑到电子倍增层中硼(B)原子掺杂浓度低于 10^{19} cm^{-3} 时, 掺杂原子与硅原子的数密度之比小于 1:5000^[13], 模拟入射电子在背减薄有源像素传感器中的运动轨迹时只考虑硅原子对电子散射的影响^[14]。同时, 假定厚度在 20 nm 以上的钝化层可以完全消除表面陷阱, 则死层厚度为钝化层厚度。为了方便计算, 假设钝化层中也形成了二次电子, 并全部被内部陷阱复合。根据电子运动轨迹的模拟结果以及光电子在散射过程中因能量损失而转变为二次

电子(电子倍增), 可以确定倍增区域内倍增电子的分布情况。

2.3 P型基底上二次电子电荷的收集过程

倍增出来的电子存在一定的浓度梯度, 电子的无规则热运动使其从浓度高的地方向浓度低的地方扩散, 也就是从 P 型基底向 N 阱一侧运动, 并最终被 N 阱收集^[15]。电子的扩散方向是各向同性的, 所以散射角公式满足 $\theta = \arccos(2R - 1)$, 方位角公式满足 $\phi = 2\pi R$, 其中 R 为 (0, 1) 内均匀分布的随机数。倍增电子的扩散过程可视为稳态非平衡载流子的注入, 可以通过稳态扩散方程获得电子的扩散速度^[16], 即

$$v_{d(r)} = -\left[\frac{D_n}{r} + \frac{D_n}{L_n}\right], \quad (3)$$

式中: $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$ 为扩散长度; D_n 为电子扩散系数; r 为电子到扩散中心的长度; τ_n 为少数寿命。x、y、z 方向上的电子运动速度可以分别表示为

$$\begin{cases} v_x = v_d \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi \\ v_y = v_d \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi \\ v_z = v_d \cdot \cos \theta \end{cases} \quad (4)$$

电子经过耗尽区后, 最终会落在像素区内。这里假设 5×5 像素区为电子的有效收集区域, 是像素边长为 $10 \mu\text{m}$ 的正方形。那么电荷收集效率就可以用像素区内收集到的电子数目除以倍增出来的所有电子的数目表示, 即

$$\eta_{\text{CCE}} = \frac{N_{\text{collect}}}{N_{\text{SEY}}}, \quad (5)$$

式中: N_{collect} 为收集到的电子数目; N_{SEY} 为倍增电子数目。电子在扩散过程中会发生复合, 需要在收集到的电子中除去复合的电子, 所以实际收集到的总电子数目为

$$N_{\text{total}} = N_{\text{collect}} \cdot \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_1}\right) \cdot \exp\left(-\frac{t_i}{\tau_i}\right) \cdot \exp\left(-\frac{t_m}{\tau_m}\right), \quad (6)$$

式中: N_{total} 为总电子数目; τ_1 、 τ_i 、 τ_m 为分别表示第 1 个、第 i 个、第 m 个少数载流子的寿命; t_1 、 t_i 、 t_m 为分别表示第 1 个、第 i 个、第 m 个电子在扩散过程中所经历的时间。

3 结果与讨论

3.1 钝化层种类对电荷收集效率的影响

模拟条件如下:入射电子能量为 6 keV,入射电子束直径为 10 nm,钝化层厚度为 25 nm(可以消除表面缺陷态),P型基底厚度为 5 μm ,钝化层材料分别为 Al_2O_3 和 SiO_2 。其中 Al_2O_3 钝化层的密度为 3.7 g/cm^3 ,基底掺杂浓度为 10^{15} cm^{-3} 。图 2(a)~(c)给出了钝化层材料为 Al_2O_3 时 5×5 像素区内的电荷收集效率分布图、入射电子在 X-Z 面上的运动轨迹图以及二次电子的分布概率,其中计算二次电子分布概率的方法是将入射深度(Z)分成 60 份,将不同区间的入射深度除以总的二次电子数目。入射电子在电子倍增层中的散射过程如图 2(b)所示,最大入射深度为 470 nm,散

射半径为 400 nm。由图 2(c)可见,随着入射深度增加,二次电子的分布概率先增大后减小。图 3(a)~(c)给出了当钝化层为 SiO_2 材料时 5×5 像素区内的电荷收集效率分布图、入射电子在 X-Z 面上的运动轨迹图以及二次电子的分布概率。由图 3 可见,入射电子的最大入射深度为 450 nm,散射半径为 380 nm。图 2(c)与图 3(c)所示二次电子分布概率的趋势是相同的,但最大概率对应的深度不同。采用 SiO_2 材料作为钝化层时,二次电子在钝化层中的分布较少,其原因是 Al_2O_3 的密度大,导致散射步长小。对比二者的电荷收集效率可以发现,将相同厚度的 SiO_2 作为钝化层时,电子轰击 CMOS 器件具有更高的电荷收集效率。其原因是 Al_2O_3 密度大,导致二次电子更多地分布在钝化层。

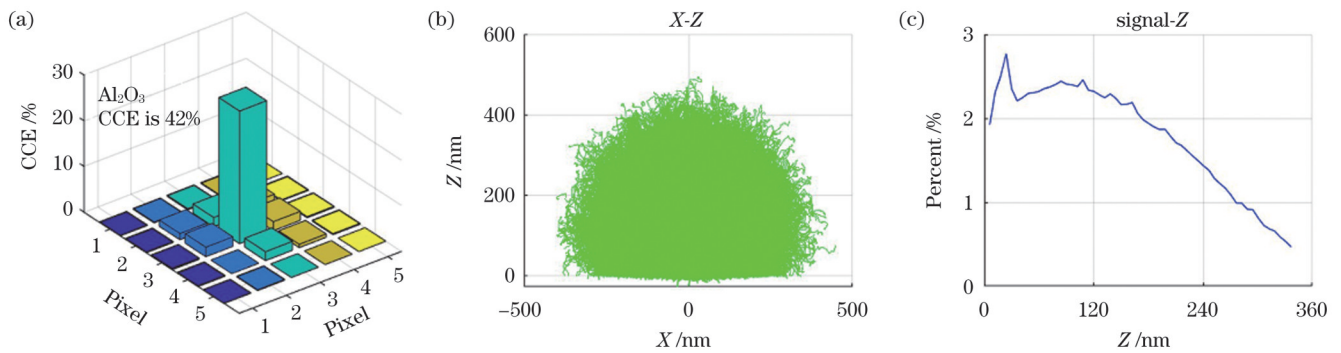


图 2 钝化层材料为 Al_2O_3 时的模拟结果。(a) 5×5 像素区内的电荷收集效率分布图;(b)入射电子在 X-Z 面上的运动轨迹;(c)二次电子的分布概率

Fig. 2 Simulation results when passivation layer material is Al_2O_3 . (a) Charge collection efficiency (CCE) distribution map in 5×5 pixel area; (b) motion trace of incident electron on X-Z plane; (c) distribution probability of secondary electrons

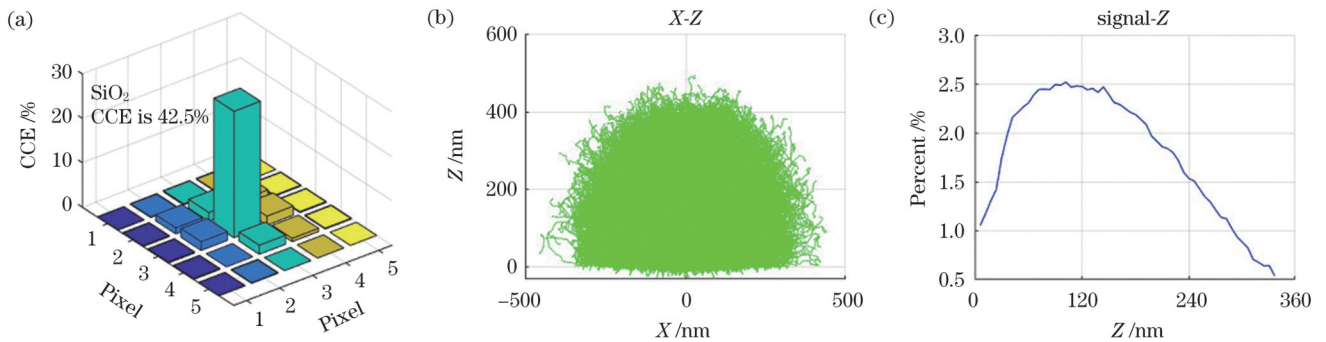


图 3 钝化层材料为 SiO_2 时的模拟结果。(a) 5×5 像素区内的电荷收集效率分布图;(b)入射电子在 X-Z 面上的运动轨迹;(c)二次电子的分布概率

Fig. 3 Simulation results when passivation layer material is SiO_2 . (a) Charge collection efficiency (CCE) distribution map in 5×5 pixel area; (b) motion trace of incident electron on X-Z plane; (c) distribution probability of secondary electrons

3.2 钝化层厚度对电荷收集效率的影响

模拟条件如下:入射电子能量为 6 keV,入射电子束直径为 10 nm,P型基底厚度为 5 μm ,钝化层材料为 SiO_2 ,基底掺杂浓度为 10^{15} cm^{-3} ,钝化层厚度分别为 25、50、75、100 nm。图 4(a)~(d)给出了钝化层厚度分别为 25、50、75、100 nm 时 5×5 像素区内的电荷

收集效率分布图,可以看出:随着钝化层厚度从 25 nm 增加到 100 nm,电荷收集效率不断降低,从 42.5% 降低到 32%。由图 5(a)~(d)可以看出,随着入射深度增加,二次电子的分布概率先增大后减小。在不同的钝化层厚度下,二次电子的分布概率具有相同的变化趋势,但随着钝化层厚度增加,钝化层中的二次电子

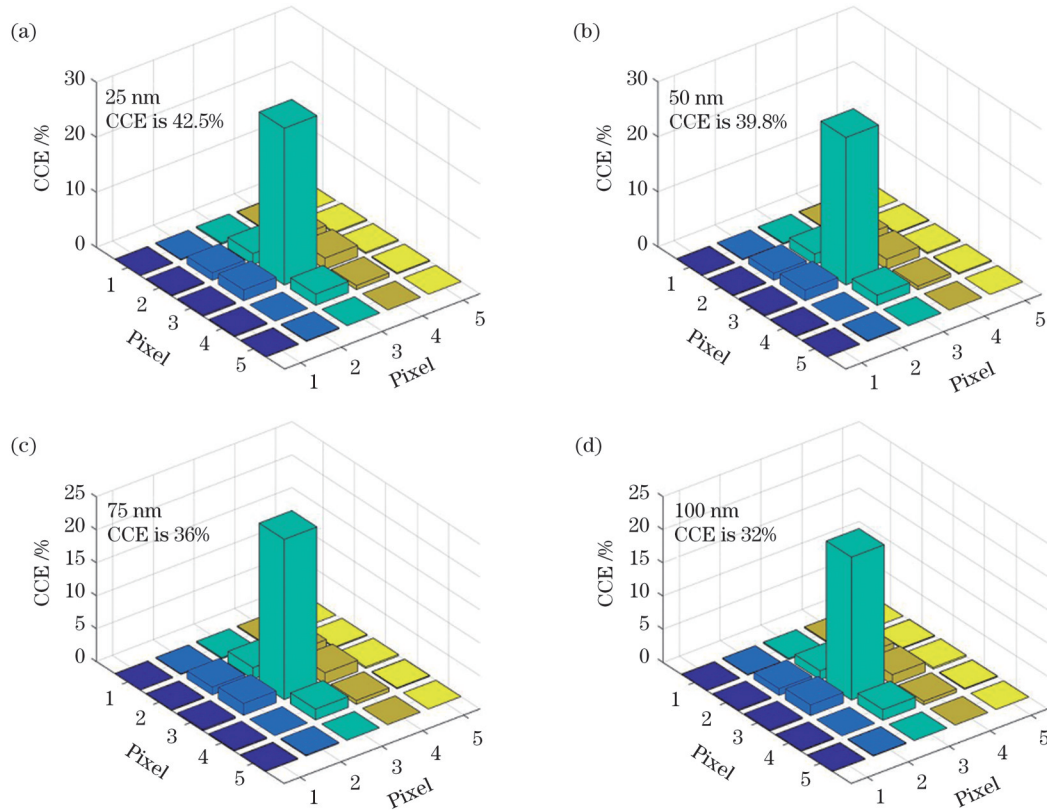


图 4 不同钝化层厚度下的电荷收集效率。(a)钝化层厚度为 25 nm;(b)钝化层厚度为 50 nm;(c)钝化层厚度为 75 nm;(d)钝化层厚度为 100 nm

Fig. 4 CCE under different passivation layer thicknesses. (a) Passivation layer thickness is 25 nm; (b) passivation layer thickness is 50 nm; (c) passivation layer thickness is 75 nm; (d) passivation layer thickness is 100 nm

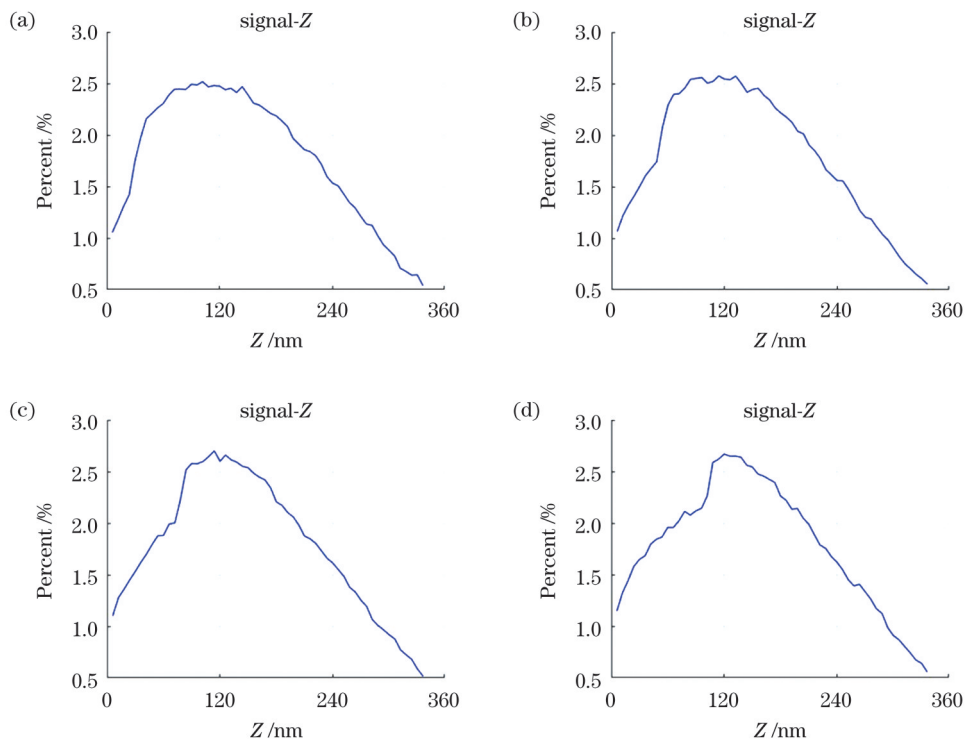


图 5 不同钝化层厚度下二次电子的分布概率。(a)钝化层厚度为 25 nm;(b)钝化层厚度为 50 nm;(c)钝化层厚度为 75 nm;(d)钝化层厚度为 100 nm

Fig. 5 Distribution probability of secondary electrons under different passivation layer thicknesses. (a) Passivation layer thickness is 25 nm; (b) passivation layer thickness is 50 nm; (c) passivation layer thickness is 75 nm; (d) passivation layer thickness is 100 nm

在总倍增电子中的占比增加,进而降低了电荷收集效率。可见,钝化层厚度越小,越有利于提高电荷收集效率。

3.3 入射电子能量对电荷收集效率的影响

模拟条件如下:入射电子束直径为 10 nm, P 型基底厚度为 5 μm , 钝化层材料为 SiO_2 , 钝化层厚度为 25 nm, 基底掺杂浓度为 10^{15} cm^{-3} , 入射电子能量分别

为 2、4、6 keV。由图 6(a)~(c)可以看出,随着入射电子能量从 2 keV 提高到 6 keV, 电荷收集效率从 29.9% 提高到 42.5%。由图 7(a)~(c)可以看出,随着入射深度增加,二次电子的分布概率先增大后减小,而且入射电子的能量越大,入射深度越大。入射深度越大,钝化层中二次电子在总的二次电子中的占比越小,这是电荷收集效率随入射能量提高而增大的重要原因。

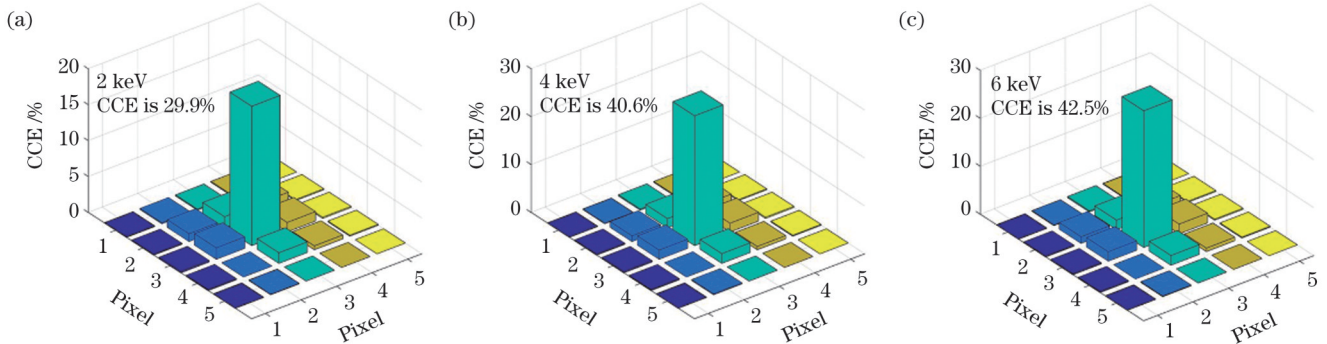


图 6 不同入射电子能量下的电荷收集效率。(a) $E_0=2 \text{ keV}$; (b) $E_0=4 \text{ keV}$; (c) $E_0=6 \text{ keV}$
Fig. 6 CCE at different incident electron energies. (a) $E_0=2 \text{ keV}$; (b) $E_0=4 \text{ keV}$; (c) $E_0=6 \text{ keV}$

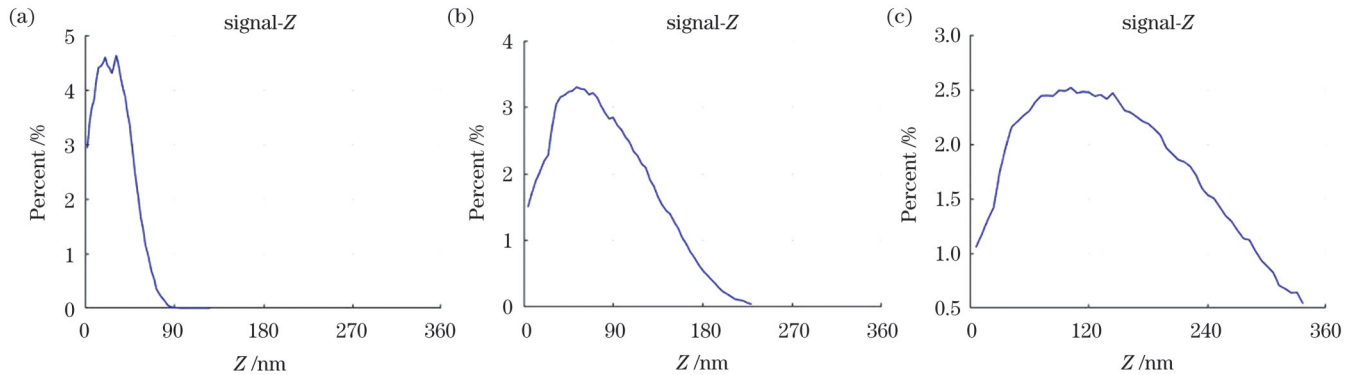


图 7 不同入射电子能量下二次电子的分布概率。(a) $E_0=2 \text{ keV}$; (b) $E_0=4 \text{ keV}$; (c) $E_0=6 \text{ keV}$
Fig. 7 Distribution probability of secondary electrons under different incident electron energies. (a) $E_0=2 \text{ keV}$; (b) $E_0=4 \text{ keV}$; (c) $E_0=6 \text{ keV}$

3.4 P 型基底厚度对电荷收集效率的影响

模拟条件如下:入射电子能量为 6 keV, 入射电子束直径为 10 nm, 钝化层材料为 SiO_2 , 钝化层厚度为 25 nm, 基底掺杂浓度为 10^{15} cm^{-3} , P 型基底厚度分别为 5、10、15、20 μm 。图 8 为不同 P 型基底厚度下电荷收集效率的模拟计算结果。由图 8(a)~(d)可以看出,随着 P 型基底厚度从 5 μm 增加到 20 μm , 电荷收集效率从 42.5% 降低到 27.8%。随着 P 型基底厚度增加,中心像素的收集效率降低,即倍增电子在收集区内的扩散半径增大,不利于获得高分辨率的成像器件。由图 9(a)~(d)可以看出,不同 P 型基底厚度下二次电子的分布概率图是基本相同的,二次电子分布不是电荷收集效率变化的主要原因。由式(6)可以推知,引起总电荷收集效率下降的原因是基底厚度增加导致扩散总时间延长,大量倍增电子在运动到 N 阱过程中被复合

掉。因此,降低 P 型基底厚度有利于缩短扩散时间,进而提高器件的增益。

3.5 P 型基底掺杂浓度对电荷收集效率的影响

模拟条件如下:入射电子能量为 6 keV, 入射电子直径为 10 nm, 钝化层材料为 SiO_2 , 钝化层厚度为 25 nm, P 型基底厚度为 5 μm , P 型基底掺杂浓度为 $10^{15} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。由图 10(a)~(f)可以看出,电荷收集效率随着掺杂浓度的增加而降低,当掺杂浓度达到 10^{18} cm^{-3} 后,电荷收集效率的降低趋势更加明显。由式(6)可知, P 型基底掺杂浓度的增加将会降低少数载流子的寿命,从而导致电荷收集效率降低。

4 结 论

基于低能电子与固体间相互作用的原理以及载流子输运理论,研究了钝化层种类、厚度、入射电子能量、

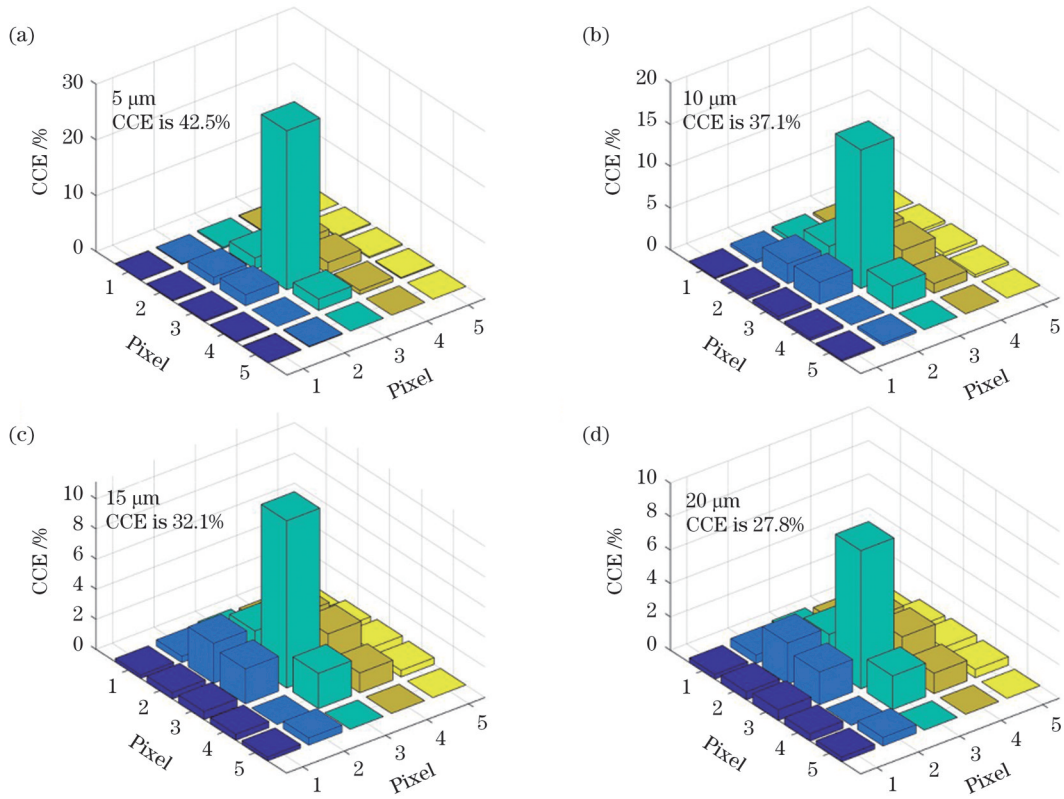


图 8 不同 P 型基底厚度下的电荷收集效率。(a) 基底厚度为 $5\ \mu\text{m}$; (b) 基底厚度为 $10\ \mu\text{m}$; (c) 基底厚度为 $15\ \mu\text{m}$; (d) 基底厚度为 $20\ \mu\text{m}$
 Fig. 8 Charge collection efficiency under different P-type base thicknesses. (a) Base thickness is $5\ \mu\text{m}$; (b) base thickness is $10\ \mu\text{m}$; (c) base thickness is $15\ \mu\text{m}$; (d) base thickness is $20\ \mu\text{m}$

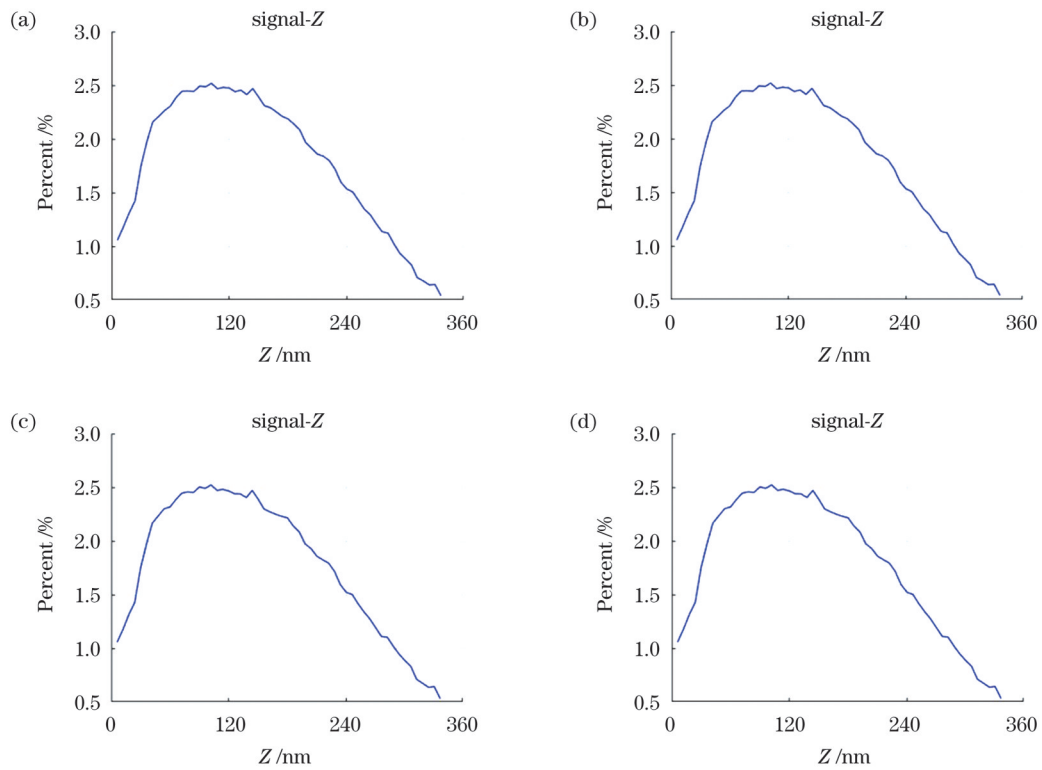


图 9 不同 P 型基底厚度下二次电子的分布概率。(a) 基底厚度为 $5\ \mu\text{m}$; (b) 基底厚度为 $10\ \mu\text{m}$; (c) 基底厚度为 $15\ \mu\text{m}$; (d) 基底厚度为 $20\ \mu\text{m}$
 Fig. 9 Distribution probability of secondary electrons under different P-type base thicknesses. (a) Base thickness is $5\ \mu\text{m}$; (b) base thickness is $10\ \mu\text{m}$; (c) base thickness is $15\ \mu\text{m}$; (d) base thickness is $20\ \mu\text{m}$

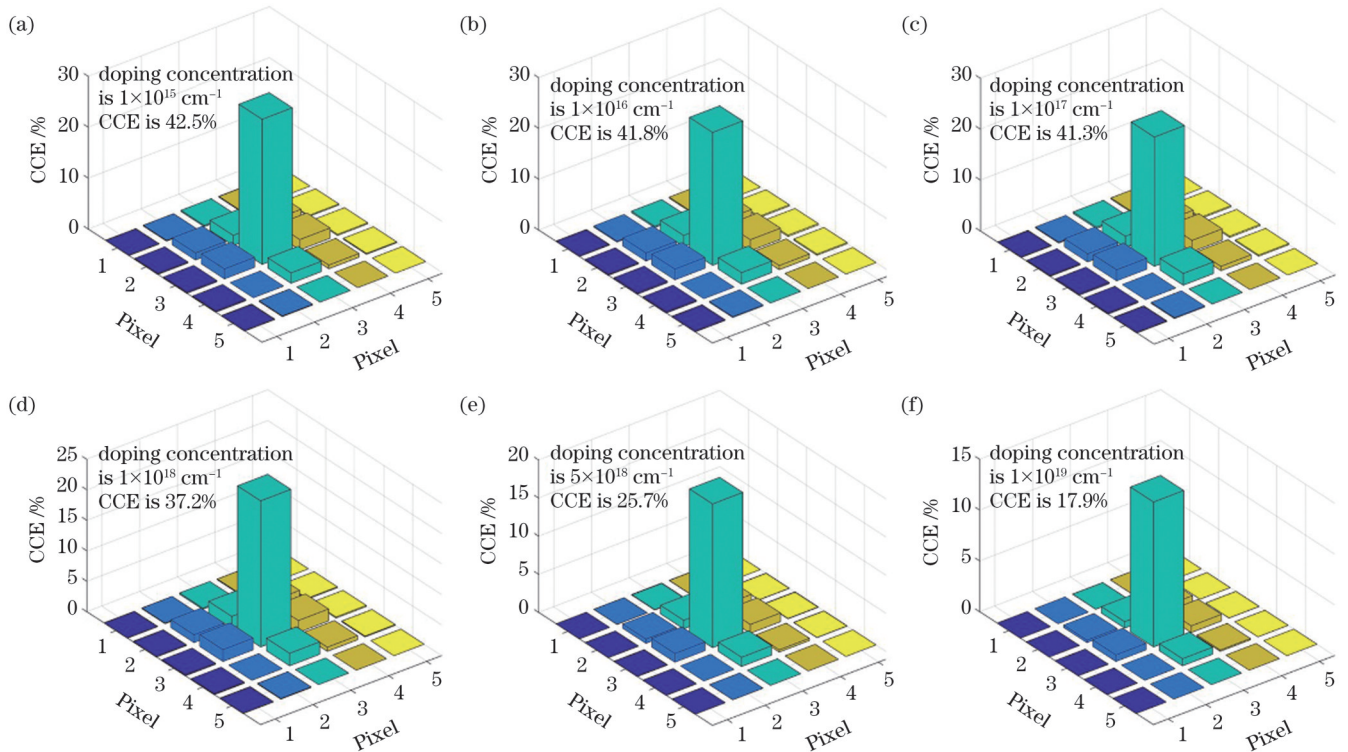


图 10 不同掺杂浓度下 5×5 像素区内的电荷收集效率。(a) 掺杂浓度为 10^{15} cm^{-3} ; (b) 掺杂浓度为 10^{16} cm^{-3} ; (c) 掺杂浓度为 10^{17} cm^{-3} ; (d) 掺杂浓度为 10^{18} cm^{-3} ; (e) 掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; (f) 掺杂浓度为 10^{19} cm^{-3}

Fig. 10 Charge collection efficiency of 5×5 pixels area at different doping concentrations. (a) at different doping concentrations is 10^{15} cm^{-3} ; (b) at different doping concentrations is 10^{16} cm^{-3} ; (c) at different doping concentrations is 10^{17} cm^{-3} ; (d) at different doping concentrations is 10^{18} cm^{-3} ; (e) at different doping concentrations is $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; (f) at different doping concentrations is 10^{19} cm^{-3}

P型基底厚度和掺杂浓度对二次电子分布概率及电荷收集效率的影响。结果表明:1) 将钝化层密度小的 SiO_2 作为钝化层有利于提高入射电子的入射深度, 进而提高电荷收集效率; 2) 减小钝化层厚度和提高入射电子能量有利于减少钝化层内二次电子的复合, 进而提高电荷收集效率; 3) 降低P型基底的厚度和掺杂浓度有利于降低倍增电子扩散过程中载流子的复合, 进而提高电荷收集效率。仿真优化后器件的电荷收集效率最高可以达到 42.5%, 为国产 EBCMOS 器件的研制提供了理论支撑。

参 考 文 献

- [1] Wang W, Li Y, Chen W J, et al. Simulation of the electrostatic distribution in the proximity focusing structure of an EBCMOS[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(3): 6901210.
- [2] Aebi V W, Costello K A, Arcuni P W, et al. EBAPS: next generation, low power, digital night vision[C//OL]//OPTRO 2005 International Symposium, Paris, France. [2022-08-14]. <https://musetransfer.com/s/y2wdvqqxm>.
- [3] Barbier R, Depasse P, Baudot J, et al. First results from the development of a new generation of hybrid photon detector: EBCMOS[C//Astroparticle, Particle and Space Physics, Detectors and Medical Physics Applications, October 8-12, 2007, Villa Olmo, Como, Italy. Singapore: World Scientific, 2008: 23-27.
- [4] Aebi V W, Boyle J J. Electron bombarded active pixel sensor: US6285018B1[P]. 2001-09-4.
- [5] Dominjon A, Chabanat E, Depasse P, et al. LUSIPHER large-scale ultra-fast single photo-electron tracker[C//2009 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, October 24-November 1, 2009, Orlando, FL, USA. New York: IEEE Press, 2009: 1527-1531.
- [6] Barbier R, Cajfinger T, Calabria P, et al. A single-photon sensitive EBCMOS camera: the LUSIPHER prototype[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2011, 648(1): 266-274.
- [7] Hirvonen L M, Suhling K. Photon counting imaging with an electron-bombarded pixel image sensor[J]. Sensors, 2016, 16(5): 617.
- [8] 张海舟, 母一宁, 王连错, 等. EBCMOS 微光成像器件的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2017, 37(10): 991-996.
Zhang H Z, Mu Y N, Wang L K, et al. Impact of passivation layer on photoelectron energy loss in EBCMOS low-light-level imaging device: a simulation and experimental study[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2017, 37(10): 991-996.
- [9] 刘虎林, 王兴, 田进寿, 等. 高分辨紫外电子轰击互补金属氧化物半导体器件的实验研究[J]. 物理学报, 2018, 67(1): 014209.
Liu H L, Wang X, Tian J S, et al. High resolution electron bombarded complementary metal oxide semiconductor sensor for ultraviolet detection[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(1): 014209.
- [10] 乔凯, 王生凯, 程宏昌, 等. 表面钝化膜对 BCMOS 传感器电子敏感特性影响的实验研究[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(4): 0418002.
Qiao K, Wang S K, Cheng H C, et al. Experimental study on the electron sensitivity of BCMOS sensor influenced by surface passivation film[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(4): 0418002.
- [11] 马仁, 梁晓春, 吴自勤. 热处理对 GaAs 单晶上的 AuGeNi 膜和 AuGe 膜的影响[J]. 电子显微学报, 1983, 2(2): 49-53.
Ma R, Liang X C, Wu Z Q. The morphology of AuGeNi and AuGe films on GaAs during heating[J]. Journal of Chinese Electron

- Microscopy Society, 1983, 2(2): 49-53.
- [12] Browning R, Li T Z, Chui B, et al. Empirical forms for the electron/atom elastic scattering cross sections from 0.1 to 30 keV [J]. Journal of Applied Physics, 1994, 76(4): 2016-2022.
- [13] Joy D C, Luo S. An empirical stopping power relationship for low-energy electrons[J]. Scanning, 1989, 11(4): 176-180.
- [14] Fiebigler J R, Muller R S. Pair-production energies in silicon and germanium bombarded with low-energy electrons[J]. Journal of Applied Physics, 1972, 43(7): 3202-3207.
- [15] Hirvonen L M, Jiggins S, Sergeant N, et al. Photon counting imaging with an electron-bombarded CCD: towards wide-field time-correlated single photon counting (TCSPC) [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, 787: 323-327.
- [16] 宋德, 石峰, 李野. 基底均匀掺杂下 EBAPS 电荷收集效率的模拟研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(2): 0203002.
Song D, Shi F, Li Y. Simulation of charge collection efficiency for EBAPS with uniformly doped substrate[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(2): 0203002.
- [17] 严毅赞, 钱芸生, 张景智, 等. 电子轰击有源像素传感器光谱响应测试系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(13): 1304001.
Yan Y Y, Qian Y S, Zhang J Z, et al. Design of spectral response test system for electron bombardment active pixel sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(13): 1304001.
- [18] 徐子皓. EBCMOS 电荷收集效率模拟研究[J]. 传感器技术与应用, 2022, 10(2): 187-192.
Xu Z H. Simulation study of EBCMOS charge collection efficiency [J]. Journal of Sensor Technology and Application, 2022, 10(2): 187-192.
- [19] 田佳峰, 宋德, 陈卫军, 等. 电子倍增层表层掺杂分布对 EBCMOS 电荷收集效率的影响[J]. 半导体光电, 2021, 42(1): 45-51, 105.
Tian J F, Song D, Chen W J, et al. Influence of doping distribution in electron multiplier surface layer on charge collection efficiency of EBCMOS[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(1): 45-51, 105.
- [20] 王巍, 李野, 陈卫军, 等. EBCMOS 近贴聚焦结构及电场分布对电子运动轨迹的影响[J]. 中国光学, 2020, 13(4): 713-721.
Wang W, Li Y, Chen W J, et al. Influence of proximity focusing structure and electric field distribution on electron trajectory in the EBCMOS[J]. Chinese Optics, 2020, 13(4): 713-721.

Influence of Passivation Layer and P-Type Base Structure Optimization on Charge Collection Efficiency of Electron Bombardment Active Pixel Sensor

Song Yuanyuan, Song De*, Li Ye, Chen Weijun, Liu Chunyang**

College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract

Objective Currently, in the information age, the realization of low light level digital night vision technology that can satisfy the remote transmission requirements of image information is urgently needed. The electron bombardment-type low light level imaging devices, namely, electron bombarded charge-coupled devices (EBCCDs) and electron bombarded complementary metal-oxide semiconductors (EBCMOSs), are used to package the back thinned charge-coupled devices (CCDs) and complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) devices into an electric vacuum device. Accordingly, the chip replaces the microchannel plate and fluorescent screen to form a close proximity focusing system with the photocathode. Photoelectrons generated by the photocathode are accelerated by a high-voltage electric field and bombarded on the surface of the imaging device for direct imaging, which has many advantages, such as small size, high sensitivity, and ultra-low illumination. The processing steps in such imaging devices can be described as core making, back support, thinning, back processing, and tube sealing. Compared with EBCCDs, EBCMOSs, which are low light level imaging devices based on electron bombarded active pixel sensors (EBAPSs), have smaller size, faster imaging speed, low power consumption, and strong radiation resistance. Therefore, EBCMOS-based low light level night vision technology has become a popular research topic in the industry. Obtaining a high-gain EBCMOS electron multiplier layer is one of the key challenges in the development of EBCMOS low-light-level imaging devices. However, few relevant theoretical studies have been conducted to date. Therefore, this study focuses on the factors affecting the charge collection efficiency of electron multipliers in EBAPS imaging devices and builds a theoretical and technical foundation for constructing a high-gain EBCMOS electron multiplier.

Methods Based on the carrier transport theory and Monte Carlo simulation algorithm, a calculation model of the electron transport process in the passivation and electron multiplication layers of EBAPSs is established; moreover, the influence of structural parameters on the distribution and collection of secondary electrons is analyzed. First, the influences of SiO_2 and Al_2O_3 passivation layers on the distribution and collection of secondary electrons are compared. Second, when the passivation layer material is SiO_2 , the influence of changing passivation layer thickness, incident electron energy, and P-type base thickness on the distribution and collection of secondary electrons is analyzed. Finally, the influence of changing doping concentration of the P-type base on the distribution and collection of secondary electrons is discussed. The simulation results provide a theoretical basis for device fabrication.

Results and Discussions When the passivity layer material is SiO_2 , the charge collection efficiency is 42.5%, and the maximum incident depth and scattering radius of the incident electrons in the electron multiplication layer are 450 nm and 380 nm, respectively. With an increase in the incident depth, the distribution probability of the secondary electrons first increases and then decreases (Figs. 1 and 2). As the dead-layer thickness increases from 25 nm to 100 nm, the charge collection efficiency decreases. With an increase in the incident depth, the distribution probability of the secondary electrons first increases and then decreases. The probability trend of

the secondary electron distribution with incident depth remains the same (Figs. 3 and 4). An increase in the incident photoelectron energy can improve the charge collection efficiency to some extent. With an increase in the incident depth, the probability of the secondary electron distribution first increases and then decreases. The greater the energy level, the greater the incident depth (Figs. 5 and 6). When the thickness of the P-type base increases from 5 μm to 20 μm , the charge collection efficiency decreases from 42.5% to 27.8% and collection efficiency of the center pixel decreases. In other words, the diffusion radius of the multiplier electron in the collection area increases, which is not conducive to constructing high-resolution imaging devices. With an increase in the incident depth, the distribution probability of the secondary electrons first increases and then decreases. The probability trend of the secondary electron distribution with depth remains the same (Figs. 7 and 8). The charge collection efficiency at different doping concentrations, ranging from 10^{15} cm^{-3} to 10^{19} cm^{-3} , is simulated. It can be observed that the charge collection efficiency decreases as the doping concentration increases (Fig. 9).

Conclusions In this study, the factors affecting the charge collection efficiency of the electron multiplier in EBAPS imaging devices are studied. When silicon dioxide with a low passivation layer density is used as the passivation layer, the incident depth of the incident photoelectrons improves; subsequently, the charge collection efficiency improves. Reducing the passivation layer thickness and increasing the energy of the incident electrons are beneficial for reducing the recombination of the secondary electrons in the dead layer, which improves the charge collection efficiency. Reducing the thickness and doping concentration of the P-type base is conducive to reducing the recombination of carriers while multiplying electron diffusion, thus improving the charge collection efficiency. The charge collection efficiency of the device after simulation optimization can reach 42.5%, which can provide theoretical support for the development of domestic EBCMOS devices.

Key words materials; sensor; electron bombardment active pixel sensor; uniform doping; electron multiplying layer; passivation layer; charge collection efficiency