

基底均匀掺杂下 EBAPS 电荷收集效率的模拟研究

宋 德^{1,2}, 石 峰¹, 李 野²

(1. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065; 2. 长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 对 P 型基底均匀掺杂的情况下电子轰击有源像素传感器(EBAPS)的电荷收集效率进行了理论模拟研究, 依据低能电子与固体的相互作用模型结合 Monte-Carlo 计算方法模拟了光电子入射到死层和倍增层中的运动轨迹, 并分析了经过死层后的能量损失率所受影响因素; 依据半导体理论研究了 P 型基底掺杂浓度、膜厚、入射电子能量对电荷收集效率的影响因素。最终获得的电荷收集效率理论模拟结果与已报道的(4 keV, 均匀掺杂的 EPAPS)实测的结果较为相符, 表明此文的模拟结果可以为高增益的 EBAPS 的制作提供理论指导。

关键词: 电子轰击有源像素传感器; 能量损失率; 电荷收集效率; 死层

中图分类号: TN223 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0203002

Simulation of charge collection efficiency for EBAPS with uniformly doped substrate

Song De^{1,2}, Shi Feng¹, Li Ye²

(1. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China;

2. School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The charge collection efficiency of electron bombarded active pixel sensor (EBAPS) was simulated while the EBAPS with uniformly doped P type substrate. The photoelectron scattering trajectories in dead layer and electron multiplier layer were simulated based on the low-energy electron-solid interaction model and Monte Carlo method. Meanwhile the influence factors how affecting the energy loss rate were studied. According to semiconductor theory, the influence factors(B atoms doping concentration, film thickness and the incident electron energy) how affecting the charge collection efficiency were studied. The final charge collection efficiency's simulation results are consistent with the reported (4 keV, uniformly doping) measured results, which means the simulation result can provide theoretical guidance for the fabrication of high gain EBAPS.

Key words: EBAPS; energy loss rate; charge collection efficiency; dead layer

收稿日期: 2015-11-05; 修订日期: 2015-12-14

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20112216120008); 吉林省科技厅重大科技攻关项目(2014020318GX)

作者简介: 宋德(1981-), 男, 博士, 主要从事微光成像技术方面的研究。Email: songde614@163.com

0 引言

微光图像数字化是微光夜视技术的发展趋势,目前实现微光数字化主要有 ICCD、EBCCD、EMCCD、EBCMOS 等途径^[1-4]。EBAPS(图 1(a))采用近贴聚焦结构,光电阴极做阴极,背面轰击型 APS 阵列传感器(BSB-APS)作为阳极。BSB-APS 作为阳极取代了 ICCD 中微通道板、荧光屏和纤维光学耦合器件。光电阴极发射的光电子经近贴聚焦系统被高压加速轰击入射到 BSB-APS^[5]。图 1(b)给出了 BSB-APS 结构和入射光电子轰击 BSB-APS 背部衬底时电子倍增及电荷收集过程的示意图。从图中可见入射的光电子进入到 P 硅基底后入射电子能量被硅原子吸收而产生电子空穴对,每个电子空穴对的产生大概消耗 3.6 eV 能量。由于倍增电子浓度梯度引起的倍增电子扩散运动使电子在 P 型硅基底中向图像传感器中的 N 阱一侧运动并被收集,最后被读出电路读出而实现微弱信号的放大。电子轰击半导体的电子增益可用公式(1)计算得出^[4],

$$G = \varepsilon(E_0 - E_{\text{Dead}}) \quad (1)$$

式中: G 为增益倍数; E_0 为入射光电子能量; E_{Dead} 为经过死层(电子与空穴完全复合区)损耗的能量; ε 为电荷收集效率。目前国外对电荷收集效率的研究主要是通过实验测量的方式完成,电荷收集效率的大小主要受入射光电子能量、死层厚度和 P 型基底结构影响,但相关理论模型的建立未见报道。

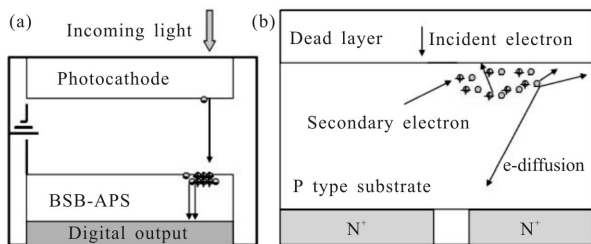


图 1 EBAPS 结构和 BSB-APS 中电子倍增及电荷收集过程

Fig.1 Structure of EBAPS and electrons' multiplication and collection in the BSB-APS

文中对 P 型基底均匀掺杂的情况下 EBAPS 的电荷收集效率的影响因素进行了理论模拟研究。首先依据低能电子与固体间相互作用模型结合蒙特卡罗方法模拟了大量光电子入射到 P 型基底中的电子

运动轨迹,并分析了经过死层后的能量损失率所受影响因素。然后依据半导体理论研究了 P 型基底掺杂浓度、膜厚、入射电子能量对电荷收集效率的影响。最终获得的电荷收集效率理论模拟结果与已报道的(4 keV, 均匀掺杂的 EPAPS)实测的结果较为相符,表明文中的模拟结果可以为高增益的 EBAPS 的制作提供理论指导。

1 入射光电子在电子倍增层处的运动轨迹模拟

低能电子入射到 BSB-APS 时,透过死层后在电子倍增层处发生电子倍增,倍增过程中入射光电子伴随着散射。散射主要包括弹性散射和非弹性散射。在电子发生弹性散射时,一般只改变了电子运动的方向,而能量损失的较少,损失的能量远远小于其自身的能量。在非弹性散射的情况下,相继碰撞时能量是连续减少的,能量损失符合修正的 Bethe 的失能定律。当入射电子入射到 BSB-APS 并在死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。选用 Monte Carlo 模拟的方法,对大量入射光电子在电子倍增层中的运动轨迹进行模拟^[6]。由于入射光电子能量低于 20 keV 且随着其在倍增层散射而能量减少,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(2)^[7]。整个公式适用 0.1~30 keV 范围的低能入射电子的散射,其中 Z 为原子序数, E 为电子能量。

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

同时考虑到电子倍增层中硼(B)原子掺杂浓度低于 10^{19} 个/cm³ 时,掺杂原子浓度相对硅原子浓度比低于 1:5 000,所以入射光电子在 BSB-APS 中运动轨迹模拟只考虑硅原子对电子散射的影响。对不同入射光电子能量、死层厚度和入射电子束直径对电子运动轨迹和能量损失率的影响进行了模拟。根据电子运动轨迹模拟结果结合光电子在散射过程中能量损失转变为二次电子(电子倍增),可以确定倍增区域内倍增电子的分布情况。图 2 给出了入射光电子能量 4 keV 时,大量入射光电子在 BSB-APS 衬底中运动轨迹和能量损失的模拟结果(内图)。可见倍增区的大量电子运动轨迹形成的区域近似球形且入射深度在 150 nm 左右。

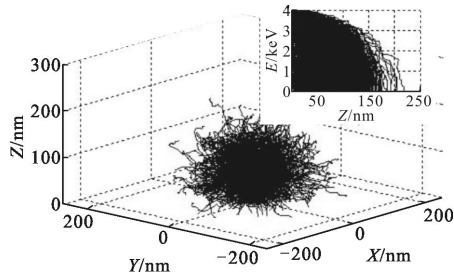


图 2 入射光电子能量 4 keV 时,大量入射光电子在 BSB-APS 中散射轨迹模拟(内图:入射光电子能量随深度变化)

Fig.2 Simulation of electron scattering trajectories in the BSB-APS for a large number of photoelectrons when incident photoelectron energy is 4 keV (insert figure: photoelectrons' energies varied depending on the photoelectron incident depth)

1.1 入射光电子能量与能量损失率的关系

图 3 给出了入射光电子能量和能量损失率的关系图。模拟条件:死层厚度 60 nm,入射电子束直径 20 nm,P 型基底厚度 10 μm,B 掺杂浓度 10¹⁵ 个/cm³。从图可见:当入射电子能量小于 2 keV 时,光电子能量在死层全部损耗,只有能量高于 2 keV 时才能透过死层进行电子倍增。当入射能量为 4 keV 时,透过死层的能量损失率在 46.5%,当入射电子能量高于 8 keV 后,透过死层的能量损失率小于 10%,可见入射光电子能量的增加对提高电子增益作用明显。但过高的入射光电子能量也会引起暗电流的增加,因此有必要进一步研究死层厚度对能量损失率的影响。

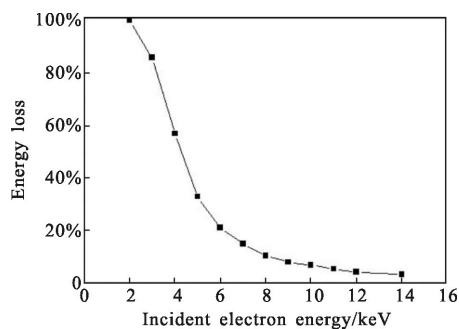


图 3 入射光电子能量损失率随入射光电子能量变化的曲线
Fig.3 Curve of the incident photoelectron energy loss varied depending on the incident photoelectron energy

1.2 死层厚度与能量损失率的关系

图 4 给出了死层厚度和能量损失率的关系。模拟条件为入射光电子能量 8 keV,入射电子束直径

20 nm,P 型基底厚度 10 μm,B 掺杂浓度 10¹⁵ 个/cm³。从图中可见:能量损失率随入射深度增加呈线性增加,之后能量损失慢慢减小至全部损耗。由于电子与固体碰撞产生的电子空穴对在死层区会完全复合而不发生电子倍增,可见死层对 EBAPS 的增益影响较大。因此尽量降低死层厚度对在相同入射光电子能量的情况下提高 BSB-APS 的增益具有重要意义。

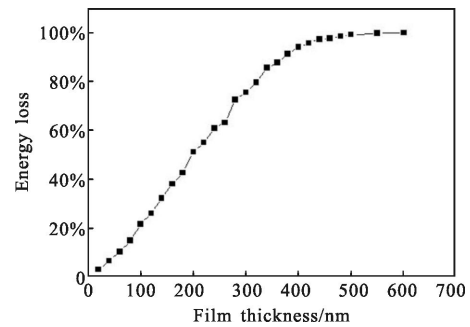


图 4 入射光电子能量损失率随死层厚度变化的曲线
Fig.4 Curve of the incident photoelectron energy loss varied depending on the thickness of dead layer

1.3 入射光电子束直径与能量损失率的关系

图 5 给出了入射光电子束直径和能量损失率的关系。模拟条件为入射光电子能量 8 keV,死层厚度 60 nm,P 型基底厚度 10 μm,B 掺杂浓度 10¹⁵ 个/cm³。从图中入射光电子束直径对能量损失率没有影响。

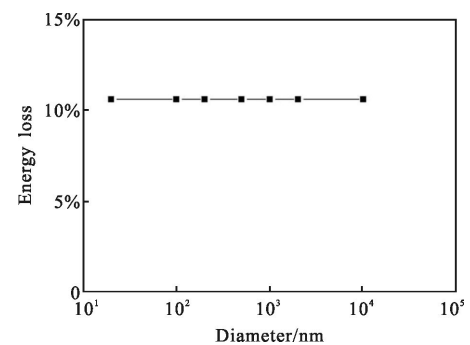


图 5 入射光电子能量损失率随入射光电子束直径变化曲线
Fig.5 Curve of the incident photoelectron energy loss varied depending on the photoelectron beam diameter

2 均匀掺杂下电荷收集效率的模拟

根据图 2 入射光电子运动轨迹的模拟结果可见入射光电子束直径 20 nm 且能量为 4 keV 时,大量入射光电子在倍增区内形成的倍增电子主要集中在直径为 200 nm 左右的球形区域(图 6 中半球形区域)。倍

增区内倍增电子的坐标分布满足下式:

$$\begin{cases} x = \frac{D}{2} \sqrt{-\ln R_1} \cos(2\pi R_2) \\ y = \frac{D}{2} \sqrt{-\ln R_1} \sin(2\pi R_2) \\ z = L \cdot R_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中: D 为倍增电子在 XOY 面上分布直径; L 为入射光电子深度; R_1, R_2 和 R_3 为 $(0, 1)$ 内均匀分布的随机数。

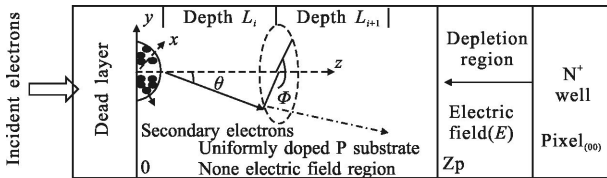


图 6 基底均匀掺杂时倍增电子运输模型

Fig.6 Secondary electrons transport model for uniformly doped substrate

图 6 为 BSBAPS 基底均匀掺杂时倍增电子的运输模型。假定入射光电子束的电子密度保持恒定, 则其在倍增区域形成倍增电子(大量二次电子)可视为稳态的非平衡载流子的注入。当倍增区域内二次电子的浓度为 Δn_0 , 边界条件 r 无穷大时二次电子浓度为 $\Delta n=0$, 则根据载流子扩散方程可知稳态无电场时电子的扩散速度方程为:

$$v_{d(r)} = - \left[\frac{D_n}{r} + \frac{D_n}{L_n} \right] \quad (4)$$

式中: D_n 为电子扩散系数; $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$ 为扩散长度; μ_n 为非平衡少数载流子的迁移率; $v_{d(r)}$ 为距中心 r 处电子扩散速度。

则任意一段深度 L_i 处二次电子运动轨迹满足:

$$\begin{cases} t_{(i)} = L_i / v_{(z)} \\ x_{(i)} = v_{(x)} \cdot t + x_{(i-1)} \\ y_{(i)} = v_{(y)} \cdot t + y_{(i-1)} \end{cases} \quad (5)$$

其中, xyz 方向上的电子运动速度分别为:

$$\begin{cases} v_{(x)} = v_{d(r)} \cdot \sin \theta_i \cdot \cos \phi \\ v_{(y)} = v_{d(r)} \cdot \sin \theta_i \cdot \sin \phi \\ v_{(z)} = v_{d(r)} \cdot \cos \theta_i \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\theta = \pi \cdot R_1$ 和 $\phi = 2\pi \cdot R_2$, R_1, R_2 为 $(0, 1)$ 内均匀分布的随机数。

耗尽区对应的电子扩散速度方程为:

$$v_{d(r)} = - \left[\frac{D_n}{r} + \frac{D_n}{2L_n} \cdot \left(\sqrt{L_n^2(E) + 4L_n^2} - L_n(E) \right) \right] \quad (7)$$

其中, $L_n(E) = \frac{\mu_n E \tau}{\cos \theta_i}$ 。

耗尽区的二次电子的运动轨迹与公式(5)一致, 但 z 方向由于有内建电场作用使电子多出漂移速度 ($v_{E(z)}$)。则其中 xyz 方向上的电子运动速度分别为:

$$\begin{cases} v_{(x)} = v_{d(r)} \cdot \sin \theta_i \cdot \cos \phi \\ v_{(y)} = v_{d(r)} \cdot \sin \theta_i \cdot \sin \phi \\ v_{(z)} = v_{d(r)} \cdot \cos \theta_i + v_{E(z)} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $v_{E(z)} = \mu_n \cdot E$ 。若在 PN 结耗尽区处二次电子漂移速度 ($v_{E(z)}$) 远远大于此处二次电子扩散速度 ($v_{d(r)}$), 则此处 xy 方向上 $v_{(x)}$ 和 $v_{(y)}$ 相对 z 方向上的 $v_{(z)}$ 可以忽略, 否则不可忽略。

根据二次电子运动轨迹的模拟, 计算出单位时间内到达像素(第 i, j N 阱)内的电子数 $N(i, j)$, 并考虑到少数载流子运动过程中复合引起收集电子的减少, 可以计算出到任意像素单位时间内的接收的电荷收集数目(公式(9)), 其中 τ_i 为任意一点的少数寿命。

$$N_{\text{收集}} = (N_{ij}) \cdot [\exp(-t_1/\tau_1) \cdots \exp(-t_l/\tau_l) \cdots \exp(-t_m/\tau_m)] \quad (9)$$

则电荷收集效率(CCE)满足公式:

$$\text{CCE} = N_{\text{收集}} / N_{\text{总}} \quad (10)$$

图 7 给出了入射光电子能量为 4 keV、电子束直径为 20 nm、死层厚度为 60 nm、P 型外延层厚度为 10 μm 、B 掺杂浓度为 10^{15} 个/ cm^3 , 整体为均匀掺杂时对应的 5x5 像素区域内的电荷收集效率。由半导体理论可知耗尽区厚度、非平衡电子迁移率、扩散系数、少数载流子寿命等参数, 最终获得的 5x5 像素区域内的电荷收集效率为 40.4%。

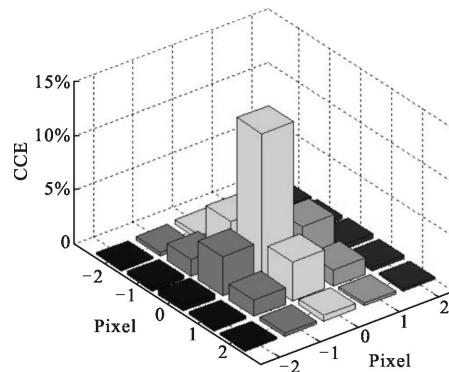


图 7 5x5 像素区域内的电荷收集效率

Fig.7 CCE of 5x5 pixel region

2.1 掺杂浓度与电荷收集效率的关系

表 1 给出了 P 型基底掺杂浓度与电荷收集效率 (5x5 像素区域内) 的关系。模拟条件为入射光电子能量 4 keV, 死层厚度 60 nm, P 型基底厚度 10 μm 。数据表明随着掺杂浓度的提高电荷收集效率降低, 这

主要是由于少数载流子寿命降低引起的像素 N 阱收集电子数目降低(公式(9))。

表 1 掺杂浓度与电荷收集效率的关系

Tab.1 Relationship between the doping concentration and CCE

Doping concentration / 10^{15} cm^{-3}	1	10	100	500	10^3	10^4
CCE	40.4	39.3	37.9	31.5	25.9	2.3

2.2 基底厚度与电荷收集效率关系

表 2 给出了 P 型基底厚度与电荷收集效率(5×5 像素区域内)的关系。模拟条件为入射电子能量 4 keV, B 掺杂浓度 10^{15} 个/ cm^3 , 死层厚度为 60 nm。数据表明随着基底厚度的增加电荷收集效率降低, 原因是随着厚度的增加, 大量的倍增电子被 5×5 像素外的收集阱吸收, 可见厚度的增加会降低图像的分辨力。

表 2 基底厚度与电荷收集效率的关系

Tab.2 Relationship between the substrate thickness and CCE

P substrate thickness	5	7	9	11	13	15	20
CCE	46.5	44.4	42.8	39.9	36.2	33.3	26.2

2.3 入射电子能量与电荷收集效率关系

对不同入射电子能量的电荷收集效率进行模拟, 入射电子能量分别为 4 keV 和 8 keV, 入射电子束直径为 20 nm, P 型基底厚度为 $10 \mu\text{m}$, 掺杂浓度 10^{15} 个/ cm^3 。通过图 8 可知随着入射电子能量从 4 keV 增加到 8 keV, 入射深度从 120 nm 而增大到 430 nm, 进而引

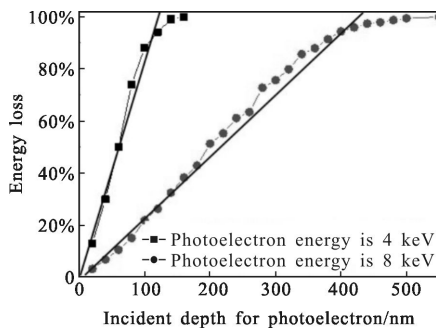


图 8 入射光电子能量损失率随入射深度变化的曲线

Fig.8 Curve of the incident photoelectron energy loss varied depending on the incident depth

起公式(3)中的 L 发生变化。模拟计算获得 5×5 像素区域内的电荷收集效率从 40.4% 增加到 41.0%。因此入射电子能量的增加能一定程度提高电荷收集效率。

3 结论

文中依据低能电子与固体间相互作用原理并结合 Monte-Carlo 计算方法对入射光电子在 EBS-APS 电子倍增层中的电子轨迹进行了理论模拟, 根据模拟结果确定了电子倍增层中二次电子的分布情况。然后结合半导体理论中非平衡载流子输运机理建立了基底均匀掺杂时 EBAPS 的电荷收集效率模型, 并对不同的 EBAPS 电荷收集效率的进行了模拟研究。模拟结果表明:(1) 入射光电子透过死层的能量损失受入射光电子能量、死层厚度影响而与入射光电子束直径无关;(2) EBAPS 的电荷收集效率随基底掺杂浓度和基底厚度的降低而提高, 随入射光电子能量增加而提高。

参考文献:

- [1] Mackay C D, Tubbs R N, Bell R, et al. Sub-electron read noise at MHz pixel rates(A)[C]//Proceedings of SPIE, 2001, 4306:289-298
- [2] Xin Fuxue. Optical fiber coupling technique of ICCD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(3): 210-213. (in Chinese)
- [3] Benussi L, Fanti V, Frekers D, et al. A multichannel single-photon sensitive detector for high-energy physics: the megapixel EBCCD[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2000(442): 154-158.
- [4] Barbier R, Cajgfinger T, Calabria P, et al. A single-photon sensitive ebCMOS camera: The LUSIPHER prototype [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2011, 648(1): 266-274.
- [5] Song De, Piao Xue, Bai Xiaofeng, et al. Simulation research of electrostatic field of MCP input in proximity image intensifier [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 2981-2986. (in Chinese)
- [6] Wang Yi, Yang Pingli, Zhu Weijie, et al. Study of parallel computing of a Monte Carlo programs [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2001, 21(1): 31-33.(in Chinese)
- [7] Browning R, Li T Z, Chui B, et al. Empirical forms for the electron/atom elastic scattering cross sections from 0.1 to 30 LeV [J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 76: 2016-2022.