

# EBCMOS电荷收集效率模拟研究

徐子皓

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2022年3月13日; 录用日期: 2022年4月4日; 发布日期: 2022年4月13日

## 摘要

对P型基底均匀掺杂情况下电子轰击有源像素传感器(EBCMOS)的运动轨迹进行了理论模拟研究, 依据载流子传输理论并结合蒙特卡罗计算方法, 利用数学建模软件MATLAB, 模拟了光电子经过光电阴极、近贴区、死层、扩散区、耗尽区中的运动轨迹, 并根据最终的电子落点分布, 计算出相应的电荷收集效率。通过改变基底掺杂浓度来观察电荷收集效率的变化, 并总结了变化原因。本文可以为高性能的EBCMOS器件的研发提供一定的理论依据。

## 关键词

EBCMOS, 微光成像, 近贴区, 死层, 蒙特卡罗方法

# Simulation Study of EBCMOS Charge Collection Efficiency

Zihao Xu

College of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Mar. 13<sup>th</sup>, 2022; accepted: Apr. 4<sup>th</sup>, 2022; published: Apr. 13<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

The trajectory of electron bombarded CMOS (EBCMOS) with P-type substrate homogeneous doping is simulated theoretically. Based on the carrier transport theory and Monte Carlo calculation method, using mathematical modeling software MATLAB, the trajectory of photoelectron movement through the photocathode, proximity area, dead layer, diffusion area, depletion area is simulated, and the corresponding charge collection efficiency is calculated according to the final electron drop point distribution. The change of charge collection efficiency is observed by changing the base doping concentration, and the reasons for the change are summarized. This paper can provide a theoretical basis for the research and development of high-performance EBCMOS devices.

## Keywords

EBCMOS, Low Light Level Imaging, Proximity Area, Dead Layer, Monte Carlo Method

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

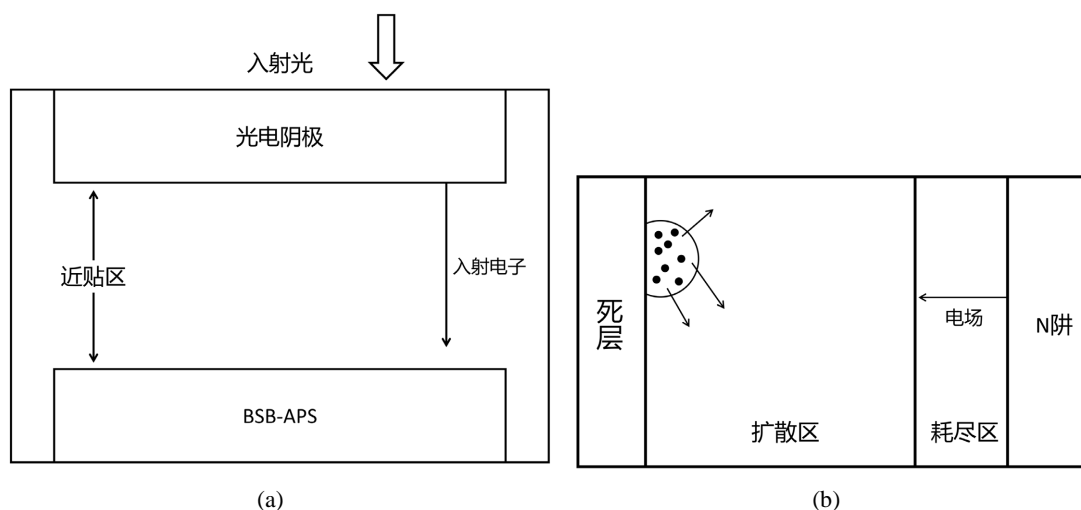
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

EBCMOS 的全称为电子轰击有源像素传感器(Electron Bombarded CMOS), 也被称为 EBAPS, 属于微光成像器件中的真空 - 半导体混合器件[1]。EBCMOS 由光电阴极、近贴区、死层、倍增区、扩散区、像素区构成, 如图 1 所示。其工作过程为首先入射光在光电阴极处产生光电子, 然后电子经过高压电场加速, 轰击到 CMOS 芯片表面, 并在 CMOS 中进行电子倍增, 最后通过扩散作用, 被 N 阱收集。EBCMOS 作为一种微光成像器件, 具有增益高、响应速度快、功耗低、成本低等优点, 融合了真空探测器和固体成像器件两者的优点, 是微光成像器件的一个重要发展方向。极大地提高了兵器装备的信息化水平。由于其增益原理是通过电子轰击半导体, 大幅度地减少了光电子在输运过程中的损耗, 随着半导体工艺的不断成熟, EBCMOS 具有很好的发展前景。然而目前我国在自主 EBCMOS 成像器件的研发方面几乎为空白, 仅仅停留在少量理论模拟研究和国内外综述进展的状况, 这一点极大地限制了器件在微光成像领域中的进一步发展。



**Figure 1.** Structure of EBCMOS. (a) Overall structure of EBCMOS; (b) Structure of BSB-APS

**图 1.** EBCMOS 结构图。(a) EBCMOS 整体结构图; (b) BSB-APS 结构图

超低照度微光成像是基于光电效应, 将微弱的光信号转化成电信号, 再将电信号进行放大, 然后再对信号进行进一步的采集、处理和显示处理。微光成像的最终目标是将光电探测的灵敏度提高至单光子级别, 且具有微米级的分辨能力、超高的成像帧率以及极低的暗噪声。数字化微光成像器件不仅可以实现微弱光信号的图像传输, 还能够利用图像处理技术对图像信息进行优化, 大幅度地扩大了微光夜视技术的应用, 场景。目前常见的微光成像器件主要分为三类[2], 第一类为真空微光器件, 例如像增强型 CCD

(ICCD), 第二类为固体微光器件, 例如电子倍增性 CCD (EMCCD), 第三类为真空-半导体混合微光器件, 例如电子轰击型 CCD/CMOS (EBCCD/EBCMOS)。其中 EBCCD 和 EBCMOS 成像器件的特点是将 CCD 和 CMOS 进行背部减薄, 然后封装于电真空器件中, 来代替 ICCD 中的微通道板和荧光屏, 通过光电阴极的光电子在高压电场加速下可以直接轰击到成像器件表面进行成像。由于其具有相对较高的便携度, 所以近年来逐渐成为业界研究的热点。EBCMOS 将高量子效率的光电阴极和高性能的 CMOS 传感器相结合, 并通过电子轰击半导体产生较高的增益, 具备了高帧率、高灵敏度、低功耗、低成本、低噪声等优点, 是一种极具发展潜力的微光成像器件, 在微光夜视、高能物理、天文观测等领域具有广泛的应用前景。

## 2. 模拟实验

由于建立 EBCMOS 电子运动轨迹的计算量很大, 并且考虑到成像过程的随机性与复杂性, 于是本论文采用蒙特卡罗方法, 并用 MATLAB 软件进行计算机模拟来实现这个过程。蒙特卡罗(Monte Carlo)方法又被称为统计模拟方法或者随机抽样方法, 核心思想是概率论和数理统计, 使用随机数或者计算机模拟出的伪随机数来解决问题, 本质上是一种随机模拟的方法。

蒙特卡罗方法以概率论和统计学为基础, 并且利用计算机模拟来实现, 其核心理论为概率论中的大数定律: 每次随机试验获得结果虽然不尽相同, 但是大量重复试验后所得结果的平均值趋近于一个确定的值, 利用各种类型的随机数进行大量模拟运算, 并将所获得的解进行统计分析, 最终不断逼近所求的结果。实现该方法的基本步骤是: 将研究对象转化为基本概率统计模型, 根据概率模型, 进行大量随机重复试验, 从而获得其抽样值, 利用概率统计的方法, 计算出随机变量的数字特征估计值, 该估计值即为问题的近似解, 从而获得最终的模拟结果。

由已知分布的随机抽样就是指在已知分布的总体中产生简单子样。令  $F(x)$  表示已知分布,  $X_1, X_2, \dots, X_N$  表示由总体  $F(x)$  中产生的容量为  $N$  的简单子样, 并用  $X_F$  表示所产生的简单子样中的个体。针对连续型分布, 总体的已知分布通常用概率密度函数  $f(x)$  来表示。直接抽样方法如下: 首先利用概率密度函数求得分布函数  $F(x)$ , 然后求得反函数  $F^{-1}(y)$ , 接着产生一个服从(0,1)区间均匀分布的随机数  $R$ , 最后, 令  $X_F = F^{-1}(R)$ , 那么  $X_F$  就是服从所需分布的随机数。

EBCMOS 采用 GaAs 光电阴极作为阴极面, 初角度分布采用朗伯余弦分布, 利用数学建模软件 MATLAB 对其模拟仿真, 从而可以获得方位角的随机数:  $\beta = 2\pi R$ ,  $R$  为(0,1)均匀分布的随机数, 方向角的随机数:  $\theta = \arccos\sqrt{1-R}$ ,  $R$  为(0,1)均匀分布的随机数。初能量分布采用较符合实际的 Beta 分布[3], 利用 MATLAB 里的 Beta 分布函数对其初能量分布进行模拟仿真, 就可以获得相应的初能量随机数。

假设近贴区近贴系统为平板电容器模型[4], 所形成的轴向静电场的场强为  $E = U/d$ , 方向为  $z$  轴负向。CMOS 表面有一层死层, 当电子进入 CMOS 时, 首先要经过死层并在死层中损失能量。电子在死层中会发生弹性散射和非弹性散射, 当发生弹性散射时, 能量损失可以忽略不计, 只考虑方向对运动轨迹的影响。因此采用卢瑟福散射截面。当发生非弹性散射是, 由于对电子运动方向的影响很小, 因为非弹性散射的散射角度比弹性散射小 2 个数量级, 所以只考虑非弹性散射的所损失的能量。电子损失的能量可以用 Bethe 能量损失公式来计算[5], 由于是在低能条件下的能量损失, 所以采用 Joy 的修正公式[6]:

$$\frac{dE}{ds} = \frac{7.85 \times 10^4}{E} \rho \sum_i \frac{C_i Z_i}{A_i} \ln \left( 1.166 \frac{E + kJ_i}{J_i} \right) \quad (\text{keV/cm}) \quad (1)$$

式中,  $A$  为原子量,  $Z$  为原子序数,  $J$  为电离能,  $C$  为原子浓度,  $\rho$  为元素的密度,  $k$  为修正系数。

CMOS 传感器首先要经过背减薄, 这一步也是实现电子轰击半导体增益的关键, 背减薄过后的 CMOS

也被称为 BCMOS (Back-thinned CMOS), 入射电子穿过死层后, 与硅原子发生碰撞, 产生大量倍增电子, 硅原子吸收入射电子能量会产生电子 - 空穴对, 大约每产生一个电子 - 空穴对消耗 3.6 eV 的能量, 这里我们可以利用能量损失公式, 计算出电子在每发生一次散射所损失的能量。然后将损失的能量除以 3.6 eV, 即可获得在该次散射所倍增出的电子数目, 从而可以获得所有入射光电子所产生的倍增电子。由于倍增电子存在浓度梯度, 再加上电子本身的无规则热运动, 所以倍增电子会发生扩散运动, 即从高浓度的区域向低浓度的区域运动, 也就是向 N 阱一侧运动, 并最终被 N 阱收集。为了确保 N 阱能够吸收到足够数量的电子, 并且减少电子扩散到其他区域, 基底部分需要进行减薄处理, P 型基底大约需要减薄至 10  $\mu\text{m}$  左右的厚度。在耗尽区内, 由于有电场作用, 电子将会受到一个  $-qE$  的作用力, 也就是在每次运动之间的瞬间, 将沿着电场方向的反向加速, 因此在电子的扩散运动基础上, 会叠加一个额外的速度分量, 称为漂移速度。由泊松方程可以首先获得耗尽区内的空间电荷分布与静电势  $\varphi$  的关系, 然后即可获得 p 区和 n 区之间的电场强度

倍增电子经过耗尽区后, 最终会落在像素区内, 这里假设电子有效收集区域为  $5 \times 5$  的像素区, 电荷收集效率的计算方式则可以用  $5 \times 5$  像素区收集到的电子数除以倍增电子总数来表示, 公式如下:

$$CCE = \frac{N_{\text{收集}}}{N_{\text{倍增电子数目}}} \quad (2)$$

最终通过 MATLAB 进行仿真模拟, 可获得电子在 EBCMOS 中整体的运动轨迹图像, 如图 2 所示:

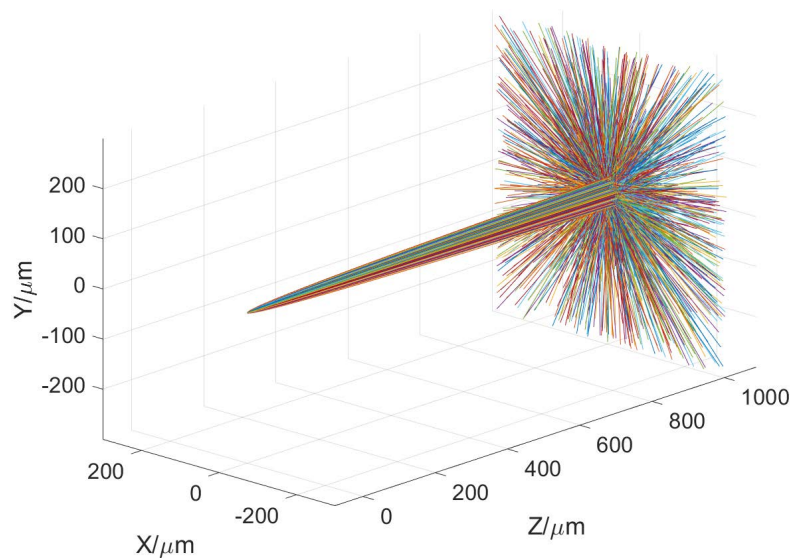


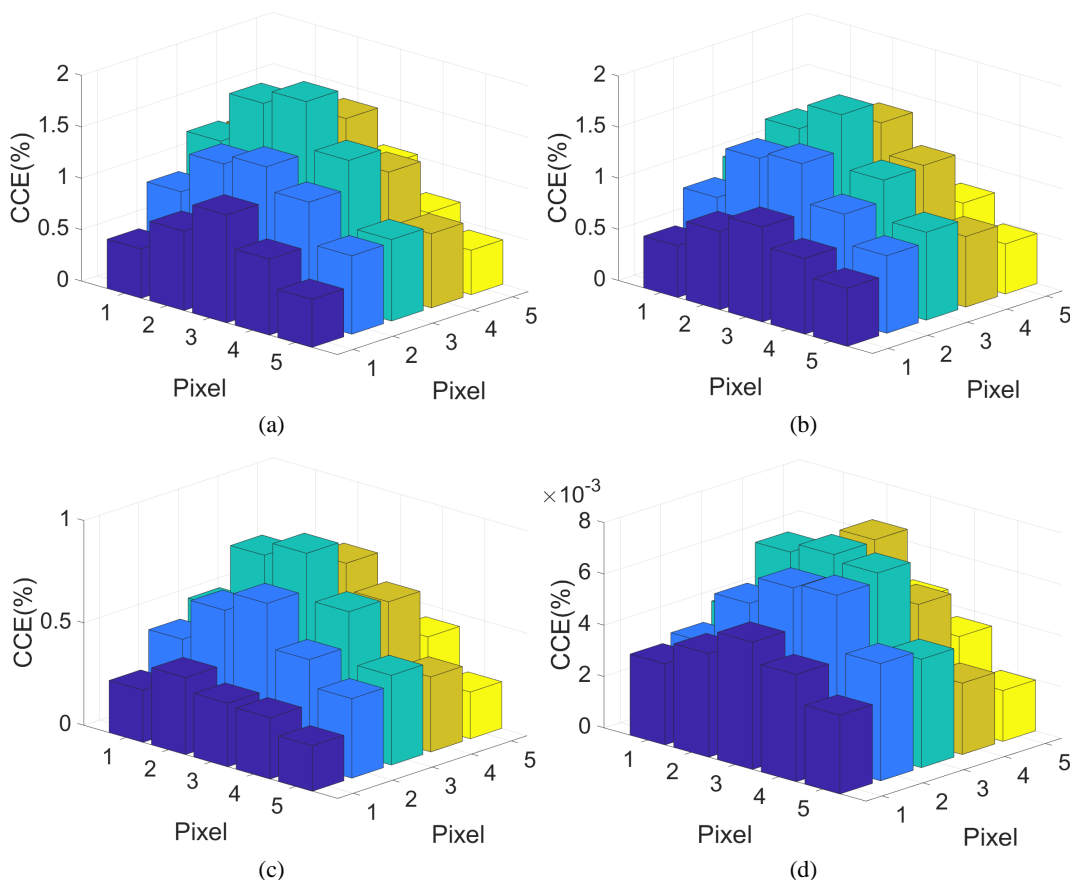
Figure 2. Image of overall electron motion trajectory in EBCMOS

图 2. EBCMOS 中电子整体运动轨迹图像

### 3. 结果与讨论

模拟均匀掺杂下、不同掺杂浓度的电子运动情况, 从而分析掺杂浓度的变化对电荷收集效率的影响。假设初始条件为: 近贴距离 1000  $\mu\text{m}$ , 近贴电压为 3000 V, 入射电子数目 300 个, 死层厚度 100 nm, 基底厚度 15  $\mu\text{m}$ , 通过改变掺杂浓度, 观察电荷收集效率的变化。下图为掺杂浓度分别为  $10^{16}$ 、 $10^{17}$ 、 $10^{18}$ 、 $10^{19}$  个/ $\text{cm}^3$  时,  $5 \times 5$  像素区内的电荷收集效率, 如图 3 所示, 当掺杂浓度为  $10^{16}$  个/ $\text{cm}^3$  时, 电荷收集效率为 26.69%, 当掺杂浓度为  $10^{17}$  个/ $\text{cm}^3$  时, 电荷收集效率为 23.87%, 当掺杂浓度为  $10^{18}$  个/ $\text{cm}^3$  时, 电荷收集效率为 13.08%, 当掺杂浓度为  $10^{19}$  个/ $\text{cm}^3$  时, 电荷收集效率为 0.23%。对比不同掺杂浓度下的电

荷收集效率,发现当掺杂浓度为  $10^{16}$  个/cm<sup>3</sup> 时,器件可以获得最高的电荷收集效率;随着掺杂浓度的增加,电荷收集效率在逐渐降低,说明提高掺杂浓度,会减少载流子寿命,导致  $5 \times 5$  像素区内收集到的电子数目减少。



**Figure 3.** Charge collection efficiency under different doping concentration. (a)  $N^A = 10^{16}$ ; (b)  $N^A = 10^{17}$ ; (c)  $N^A = 10^{18}$ ; (d)  $N^A = 10^{19}$

**图 3.** 不同掺杂浓度下的电荷收集效率。(a)  $N^A = 10^{16}$ ; (b)  $N^A = 10^{17}$ ; (c)  $N^A = 10^{18}$ ; (d)  $N^A = 10^{19}$

## 4. 结论

本文利用蒙特卡罗算法并结合电子输运相关理论,建立了 EBCMOS 电子输运模型,分别建立了近贴区、死层、倍增区、扩散区、像素区模型,利用 MATLAB 数学建模软件仿真模拟出电子在 EBCMOS 中整体的运动轨迹,并获得电子在像素区的落点分布。通过改变基底掺杂浓度,获得了相应的电荷收集效率,并发现当基底掺杂浓度为  $10^{16}$  个/cm<sup>3</sup> 时,器件的电荷收集效率最高;随着掺杂浓度的增加,电荷收集效率在逐渐降低,说明掺杂浓度的增加,会导致载流子寿命的减少,从而使  $5 \times 5$  像素区内收集到的电子数目减少。本文可以为高性能微光成像器件 EBCMOS 提供一定的理论指导。

## 参考文献

- [1] 徐江涛. 微光像增强器的最新发展动向[J]. 应用光学, 2005, 26(2): 21-23.
- [2] 唐小东. EBAPS 电子轰击性能测试技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- [3] 王勇. 微光像增强器的分辨率研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2011.

- [4] 王巍. 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.
- [5] 黄秀荪. 电子与固体相互作用的 Monte\_Carlo 模拟[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.
- [6] 任黎明. Monte\_Carlo 方法模拟低能电子束曝光电子散射轨迹[J]. 半导体学报, 2001, 22(12): 1519-1524.