光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023121801

电离效应对 EBCMOS 中电子倍增层增益的影响研究

陈文娥[1]，陈卫军[1*]，宋　德[1*]，焦岗成[2]，李　野[1]，
赵　鹏[1]，李书涵[1]，王重霄[1]，梁荣轩[1]，岳纪鹏[1]
（1. 长春理工大学 物理学院，长春 130022；2. 微光夜视重点实验室，西安 710065）

摘　要： 采用蒙特卡罗模拟方法研究了电子轰击互补金属氧化物半导体(EBCMOS)成像器件中高能电子轰击半导体时产生的电离效应对电荷收集效率和电子倍增层增益的影响。分析了入射电子能量、p 型衬底层掺杂浓度、电子倍增层和钝化层厚度对电荷收集效率和增益的影响。结果表明，增加入射电子能量(小于 4 keV)、减小电子倍增层和钝化层厚度、降低掺杂浓度等是提高电荷收集效率和电子倍增层增益的有利途径，可为获得高增益的 EBCMOS 器件提供理论支撑。

关键词： 电子轰击互补金属氧化物半导体；电离效应；电荷收集效率；增益

中图分类号： O482　**文章编号：** 1001－5868(2024)02－0222－06

Influence of Ionization Effect on Gain of Electron Multiplying Layer in EBCMOS

CHEN Wene[1], CHEN Weijun[1], SONG De[1], JIAO Gangcheng[2], LI Ye[1],
ZHAO Peng[1], LI Shuhan[1], WANG Chongxiao[1], LIANG Rongxuan[1], YUE Jipeng[1]
(1. College of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, CHN;
2. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xian 710065, CHN)

Abstract: The Monte Carlo simulation method was employed to investigate the influence of ionization effects resulting from high-energy electrons bombarding a semiconductor in electron bombardment complementary metal-oxide-semiconductor (EBCMOS) imaging devices on both the charge collection efficiency and gain of the electron multiplying layer. Further, a theoretical analysis was conducted to examine the effects of incident electron energy, doping concentration in the p-type substrate layer, thickness of the electron multiplying layer, and passivation layer on the charge collection efficiency and gain of the multiplying layer. The analysis revealed that increasing the incident electron energy (up to 4 keV), reducing the thickness of both the electron multiplying and passivation layers, and lowering the doping concentration in the p-type substrate layer are all beneficial approaches to improve the charge collection efficiency and increase the multiplying layer gain to obtain high-gain EBCMOS devices.

Key words: EBCMOS; ionization effect; charge collection efficiency; gain

0　引言

电子轰击互补金属氧化物半导体（简称 EBCMOS)，是一种真空固体混合型的微光成像传感器技术[1]。其主要结构包括光阴极、真空腔体、背减薄 CMOS 器件及读出电路。工作过程是：光子入射 GaAs 光阴极产生的光电子被阴极和 CMOS 阳极之间的真空高压电场加速，光电子获得能量后轰击背部减薄 CMOS 器件，产生倍增，由读出电路直接成像。EBCMOS 不仅具备体积小、重量轻、低功耗和高灵敏度等优点，还兼具真空器件的高增益、

收稿日期：2023－12－18.

* **通信作者：**陈卫军，宋　德

低噪声和快响应以及固体器件的可数字化输出及传输的特点，已成功应用于天文观测、遥感技术、空间探测、高能物理研究等领域[2-6]。

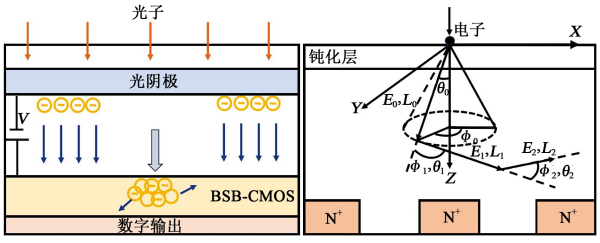
EBCMOS 自 1999 年由 Intevac 公司首次报道以来就受到了广泛关注[1]。2000 年，Kenneth 等[7]研制出一种名为 Night Vista 的电子轰击探测器，其像素尺寸为 12 μm×12 μm，像素阵列为 640×480，帧速率为 30 f/s。2007 年，Barbier 等[8-9]研制出了一款 EBAPS 原型机，其像元尺寸为 17 μm×17 μm，像素阵列大小为 1 024×1 024，最低成像照度达 2×10^{-4} lx。随后，他们又制备了一个大型 EBCMOS 相机原型器件，并提出了一种点扩散函数测量方法。2012 年，美国 Intevac 公司和海军空战中心共同研发基于 EBCMOS 技术的 ISIE4000 系列微光夜视传感器[7]。同年，法国 Photonis 公司研发首款 EBCMOS 器件问世。2013 年，在此基础上，EBNOCTURN 制造了 EBAPS 相机[10]。2017 年，刘虎林等[11]提出了一种在紫外范围工作的 EBCMOS 传感器，将真空光电阴极和背照式 CMOS 技术相结合，实现了在 40 mlx 光照环境下高达 25 lp/mm 的分辨率。近年来，为深入探究 EBCMOS 的机理，研究人员在优化设计、噪声特性和温度特性等领域投入了大量精力[12-15]。本课题组在基于电子与固体相互作用的原理上研究了背部轰击 CMOS(BSB－CMOS)表面附近的背散射电子特性，并展示了钝化层和入射电子能量对背散射电子角分布的影响，背散射电子数与入射电子数之比，以及背散射电子与入射电子之间距离的分布[16]。此外，还设计了背部轰击 CMOS 的结构以及用于聚焦电子的阳极位置结构[17]。

然而，光电子经过高压电场加速后轰击到背部减薄的 CMOS 表面时，电子与靶材碰撞能够使价带中的电子受激发从价带跃迁到导带，并产生电子-空穴，如果能量足够大还会产生次级电子-空穴对，这一过程称为电离效应，会伴随大量的能量损失[18]。因此电子的能量损失对于二次电子的生成及其运动轨迹至关重要，这反过来又会影响 EBCMOS 的电荷收集和增益。

本文旨在通过分析高能电子轰击到 CMOS 表面产生的电离效应而发生能量损失这一过程，从理论上建立 EBCMOS 中电子倍增层增益模型。本文使用的能量损失模型有别于此前常用的 Joy 和 Luo 修正的 Bethe 能量损失方程，它可以描述电子能量在 200～30 keV 的能量损失，并且平均偏差小于 Bethe 能量损失方程[19-20]。基于修正模型详细讨论了入射能量、掺杂浓度、电子倍增层和钝化层的厚度对电荷收集效率(CCE)和电子倍增层增益的影响。

1　理论模型

EBCMOS 的工作原理如图 1(a)所示，入射光子通过光阴极进行光电转换，成为光电子，光电子在高压电场中被加速后轰击到 CMOS 图像传感器芯片表面，发生电离效应。入射电子能量在钝化层和 P 型衬底中损失产生大量二次电子，由于浓度梯度二次电子向 N 阱扩散并被收集，从而获得增益，如图 1(b)所示。二次电子的运动是随机的，可以利用蒙特卡罗方法来预测每个二次电子的运动轨迹。



(a) EBCMOS 原理　　(b) 电子运动轨迹

图 1　EBCMOS 原理和电子运动轨迹示意图

电离效应所产生的能量损失用 ΔE 表示，它与其经过的路程成正比，即有：

$$\Delta E=-\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}s}L \tag{1}$$

式中，$-\mathrm{d}E/\mathrm{d}s$ 表示能量损失率，L 为散射步长。

对于能量损失率 $-\mathrm{d}E/\mathrm{d}s$ 有[19]：

$$-\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}s}=\frac{F(Z)G(E)}{\lambda_{\mathrm{in}}}=\frac{(A_1Z+B)(C\ln E+D)}{\lambda_{\mathrm{in}}}=\frac{c_1(c_2Z+1)\ln(c_3E)}{\lambda_{\mathrm{in}}} \tag{2}$$

它描述了能量损失率与非弹性平均自由程的乘积，是原子序数和电子能量的简单函数。其弥补了 Bethe 能量损失方程在低能区域不适用的缺点，能够描述电子能量在 200 eV～30 keV 之间的阻止本领。其中，Z 是原子数，E 是入射电子能量，$F(Z)=A_1Z+B$，$G(E)=C\ln E+D$，A_1，B，C 和 D 是与能量和原子序数无关的参数，它们是通过绘制 27 种元素的电子能量与阻止本领和非弹性平均自由程的曲线图而得到的。其中，$c_1=BC$，$c_2=A_1/B$，$c_3=\exp(D/C)$。非弹性散射平均自由程 λ_{in} 为[19]：

$$\lambda_{in}=\frac{E}{E_p^2[g\ln(\gamma E)-(M/E)+(N/E^2)]} \tag{3}$$

$$g=-0.10+0.944(E_p^2+E_g^2)^{-1/2}+0.069\rho^{0.1} \tag{4}$$

式中，$\gamma=0.191^{-1/2}$，$M=1.97-0.91u$，$N=53.4-20.8u$，$u=N_v/\rho$，$E_p=28.8(N_v\rho/A)^{1/2}$，$E_p$ 是自由电子激发能，ρ 是密度，N_v 是每个原子(对于元素固体)或分子(对于化合物)的价电子数，A 表示原子量或分子量，E_g 是带隙能量。

散射步长 L 是电子在一次弹性散射后经过的路程，与散射截面有关：$L=A/\sigma N_A\rho$。式中，N_A 为阿伏伽德罗常量，σ 是弹性散射截面，本文采用修正的卢瑟福散射截面公式[21]：

$$\sigma=\frac{3\times10^{-18}Z^{1.7}}{E+0.005Z^{1.7}E^{0.5}+0.0007Z^2/E^{0.5}} \tag{5}$$

电子轰击半导体的增益公式如下[9]：

$$G=\varepsilon\frac{E-E_{dead}}{w} \tag{6}$$

式中，ε 是电荷收集效率，E 是入射电子能量，E_{dead} 是在钝化层(SiO_2)中损失的能量，w 为每产生一个电子-空穴对消耗的能量，硅材料的 w 为 3.6 eV[22]。其中收集效率 ε 需要通过分析电子在 CMOS 图像传感器芯片中的运动轨迹计算得到。

如图 1(b)，当光电子入射到 CMOS 图像传感器芯片中运动时，由于其运动规律有着随机性，在倍增层中的运动状态不能确定。用 Monte Carlo 模拟方法，确定倍增电子的分布情况。假设其呈高斯分布，电子的坐标初值为[16]：

$$\begin{cases}x_0=\dfrac{D}{2}\sqrt{-\ln R_1}\cos(2\pi R_2)\\ y_0=\dfrac{D}{2}\sqrt{-\ln R_1}\sin(2\pi R_2)\\ z_0=0\end{cases} \tag{7}$$

式中，D 为入射电子直径。入射电子穿过钝化层后，产生电离效应，与 Si 原子发生碰撞，Si 原子吸收入射电子能量，产生电子-空穴对，从而实现电子倍增。由于倍增电子存在浓度梯度，以及电子自身有无规则热运动，倍增电子会发生扩散，电子扩散方向是各向同性的，通过直接抽样方法，散射角 $\theta=\arccos(1-2\beta R/(1+\beta-R))$，$R$ 是 (0，1) 间均匀分布的随机数，β 是屏蔽参数为：$\beta=5.43\times10^3(Z^{2/3}/E)$。方位角 η 服从(0，2π)上的均匀分布，$\eta=2\pi R$。

倍增电子的扩散过程属于稳态非平衡载流子的注入过程，根据载流子扩散方程，电子扩散流密度可以表示如下[17]：

$$S_n=-D_n\frac{d\Delta n(r)}{dr} \tag{8}$$

入射电子稳态扩散方程：

$$D_n\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{d\Delta n}{dr}\right)=\frac{\Delta n}{\tau_n} \tag{9}$$

通过稳态扩散方程获得电子的扩散速度：

$$v_d=-\left(\frac{D_n}{r}+\frac{D_n}{L_n}\right) \tag{10}$$

式中，$L_n=(D_n\cdot\tau_n)^{1/2}$ 为扩散长度，D_n 为电子扩散系数，r 为电子距离扩散中心的长度，τ_n 为少子寿命。可以得到 x，y，z 方向上的电子运动速度分别为：

$$\begin{cases}v_x=v_d\cdot\sin\theta\cdot\cos\varphi\\ v_y=v_d\cdot\sin\theta\cdot\sin\varphi\\ v_z=v_d\cdot\cos\theta\end{cases} \tag{11}$$

二次电子经过扩散区后会到达耗尽区，其空间电荷分布与静电势 φ 的关系由泊松方程可得[23]：

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2}=-\frac{dE}{dx}=-\frac{q}{\varepsilon_s}(N_D-N_{Al}+p-n) \tag{12}$$

式中，ε_s 是介电常数，N_{Al} 是受主杂质浓度，N_D 是施主杂质浓度。

耗尽区电子扩散速度方程为：

$$v_{de}=-\left[\frac{D_n}{r}+\frac{D_n}{2L_n^2}\cdot(\sqrt{L_n^2(E)+4L_n^2}-L_n(E))\right] \tag{13}$$

热平衡时，p 区和 n 区之间的静电势差称为内建电势 V_{bi}：

$$V_{bi}=\frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_{Al}N_D}{n_i^2}\right) \tag{14}$$

电子经过耗尽区后，会落在像素区内，可假设 5×5 像素区是电子有效收集区域，像素是边长为 10 μm 的正方形。电荷收集效 ε 则表示为像素区内收集的电子数 $N_{collect}$ 除以倍增出的所有电子数 $N_{multiply}$：

$$\varepsilon=\frac{N_{collect}}{N_{multiply}} \tag{15}$$

且电子在扩散过程中会复合，因而收集的电子中需除去复合电子，故实际收集电子数如下：

$$N_{collect}=N_{ij}\cdot[e^{-\frac{t_1}{\tau_1}}\cdots e^{-\frac{t_i}{\tau_i}}\cdots e^{-\frac{t_m}{\tau_m}}] \tag{16}$$

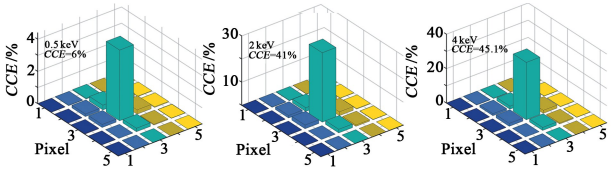
2　结果和讨论

基于 Monte Carlo 方法，从入射电子的能量、电子倍增层的厚度、衬底的掺杂浓度和钝化层厚度等方面讨论电离效应对 EBCMOS 倍增层的收集效率和增益的影响。

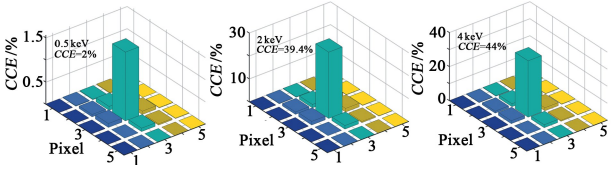
首先，分析分别使用 Bethe 能量损失方程和拟合函数能量损失方程下的电荷收集效率和增益情况。设置入射电子直径 D 为 10 nm，钝化层厚度为 10 nm，电子倍增层厚度为 4 μm，模拟计算了入射电子能量在 0.5，0.7，0.9，1，2，4 keV 时的电荷收集效率和增益，结果如表 1 所示。电荷收集效率条形图如图 2(a)和(b)所示。可以发现，随着入射电子能量的提高，电荷收集效率和增益都随之增大。产生这些现象的原因是入射电子能量的增大使电子在钝化层中的能量损失降低，从而产生更多的倍增电子，导致扩散区浓度增大进而影响电荷收集效率和增益。与 Bethe 能量损失方程相比，拟合函数能量损失方程模拟所得到的电荷收集效率与增益都较低，尤其是在 0.5，0.7，0.9 和 1 keV 等较低能量时的收集效率差距更大，这是因为拟合函数能量损失方程适用范围更广尤其是在低能区域计算结果与实际更为相符。进一步模拟 0.5 keV 时电子的运动轨迹，结果如图 2(c)所示，可以发现 Bethe 能量损失方程相比拟合函数能量损失方程下的分布轨迹更广。

表 1　不同能量下，Bethe 和拟合函数能量损失方程的电荷收集效率和增益

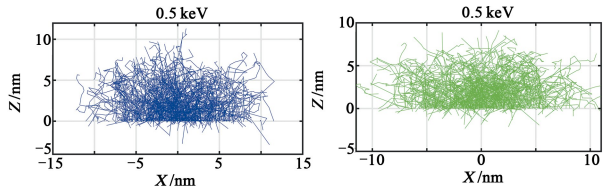
入射电子能量/keV	电荷收集效率/%		增益	
	Bethe	拟合函数	Bethe	拟合函数
0.5	6	2	5	2
0.7	19	15	25	20
0.9	29	23	50	43
1	37	31	69	63
2	41	39.4	164	159
4	45.1	44	379	367



(a) Bethe 能量损失方程下电荷收集效率



(b) 拟合函数能量损失方程下电荷收集效率



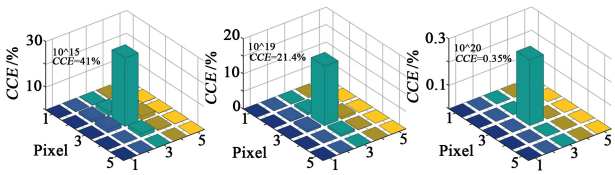
(c) 0.5 keV 下 Bethe(左)和拟合函数(右)能量损失方程下的电子运动轨迹

图 2　不同能量损失方程下的电荷收集效率条形图和电子运动轨迹

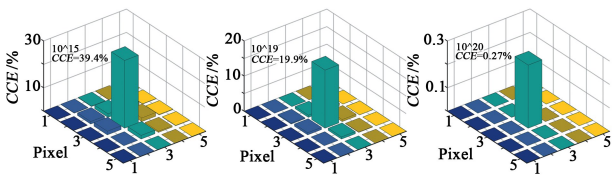
然后，通过改变衬底的掺杂浓度分析在不同能量损失方程下掺杂浓度的变化对电荷收集效率和增益的影响。设入射电子能量为 2 keV，入射电子直径 D 为 10 nm，钝化层厚度为 10 nm 和电子倍增层厚度为 4 μm，模拟计算了掺杂浓度分别在 10^{15}，10^{16}，10^{17}，10^{18}，10^{19} 和 $10^{20}\,cm^{-3}$ 时的电荷收集效率和增益，结果如表 2 所示。图 3(a)和(b)分别为入射电子能量为 2 keV，掺杂浓度分别为 10^{15}，10^{19} 和 $10^{20}\,cm^{-3}$ 时，Bethe 和拟合函数能量损失方程下电荷收集效率条形图。可从表 2 和图 3 中看出，当掺杂浓度增大，电荷收集效率和增益都会减小，尤其是当掺杂浓度达到 $10^{19}\,cm^{-3}$ 时电荷收集效率和增益明显降低，而当掺杂浓度达到 $10^{20}\,cm^{-3}$ 时收集效率和增益几乎为0。且掺杂浓度变化仍使拟合函数能

表 2　不同掺杂浓度下，Bethe 和拟合函数能量损失方程的电荷收集效率和增益

掺杂浓度/cm^{-3}	电荷收集效率/%		增益	
	Bethe	拟合函数	Bethe	拟合函数
10^{15}	41	39.4	164	159
10^{16}	40	39	159	150
10^{17}	39.6	38.9	153	147
10^{18}	36.9	36.3	147	141
10^{19}	21.4	19.9	87	81
10^{20}	0.35	0.27	2	1



(a) Bethe 能量损失方程

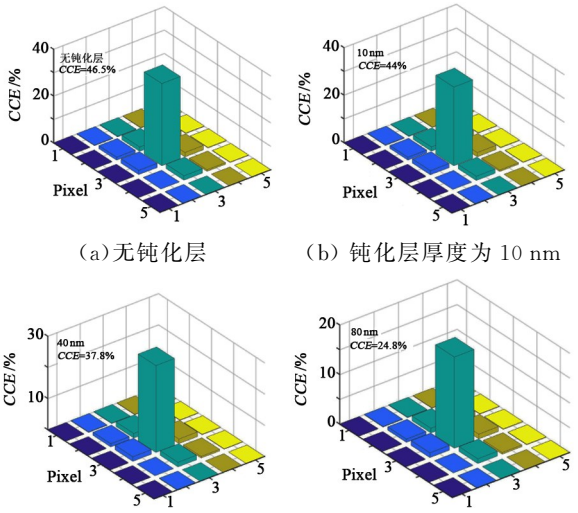


(b) 拟合函数能量损失方程

图 3　入射电子能量为 2 keV 时不同能量损失方程下的电荷收集效率

量损失方程模拟所得到的电荷收集效率与增益和 Bethe 能量损失方程相比较低，产生该现象的原因是掺杂浓度的增加会导致少数载流子寿命降低，进一步导致电荷收集效率的降低。

由于电离效应的产生主要导致能量损失，因此进行钝化层厚度变化对能量损失影响的分析极为重要。设入射电子能量为 4 keV，入射电子直径 D 为 10 nm，倍增层厚度为 4 μm，掺杂浓度为 $10^{15}\,cm^{-3}$，分别模拟了在无钝化层的理想情况下和钝化层厚度分别为 10，40 和 80 nm 时的电荷收集效率，结果如图 4 所示，所对应的增益分别为 395，367，347 和 229。可以发现随着钝化层厚度的增大，电子倍增层的电荷收集效率和增益会随着减小。产生这种现象的原因是钝化层厚度的增厚，发生在钝化层中的电离效应越强烈，能量损失越大，部分倍增的电子在运动到 N 阱过程中就被复合掉，使电荷收集效率和增益降低。且钝化层厚度越小与无钝化层的理想情况下的电荷收集效率越接近，由此可见尽可能地减小钝化层厚度越有利于提高电荷收集效率和增益，使 EBCMOS 器件性能更优。

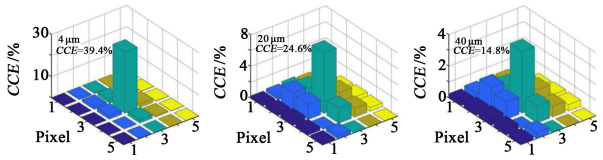


(a)无钝化层　(b) 钝化层厚度为 10 nm

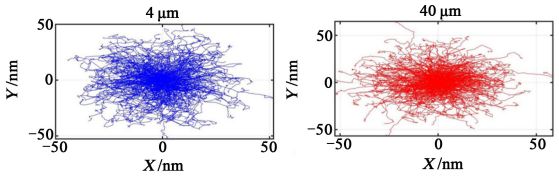
(c) 钝化层厚度为 40 nm　(d) 钝化层厚度为 80 nm

图 4　入射电子能量为 4 keV 时在无钝化层和钝化层厚度分别为 10，40 和 80 nm 时的电荷收集效率条形图

最后，分析电子倍增层厚度变化对电荷收集效率和电子倍增层的增益的影响。设入射电子能量为 2 keV，入射电子直径 D 为 10 nm，钝化层厚度为 10 nm，掺杂浓度为 $10^{15}\,cm^{-3}$，模拟了电子倍增层厚度分别为 4，20 和 40 μm 时的电荷收集效率，结果如图 5(a)所示，所对应的电子倍增层的增益分别为 159，92 和 50。可以看出随着电子倍增层的厚度的增加，电荷收集效率和电子倍增层的增益都越来越小，且电荷收集效率分布会更均匀。这是因为随着电子倍增层厚度的增加，电子扩散的时间会加长，进而导致许多倍增电子在扩散到 N 阱的过程中就被复合，且因为运动的无规则性电子在倍增层内运动的范围更广。由图 5(b)可以看出当入射电子能量为 2 keV 时，电子倍增层厚度为 40 μm 时比厚度为 4 μm 时电子运动轨迹分布更广面积更大。



(a) 电子倍增层厚度分别为 4，20 和 40 μm 时的电荷收集效率条形图



(b) 倍增层厚度分别为 4 和 40 μm 时的电子运动轨迹

图 5　倍增层厚度对电荷收集效率及电子运动轨迹的影响

3　总结

根据高能电子轰击到 CMOS 表面发生电离效应所产生的能量损失，利用拟合函数能量损失方程模型，并结合 Monte Carlo 方法，分析了入射电子能量、电子倍增层掺杂浓度、钝化层厚度和电子倍增层厚度对电荷收集效率和增益的影响。结果表明，拟合函数能量损失方程在低能区域结果更为精确，且增加入射电子能量(小于 4 keV)、降低掺杂浓度、减薄钝化层厚度和电子倍增层厚度是形成高增益 EBCMOS 的有益方法。

参考文献：

[1] Aebi V W, Boyle J J. Electron bombarded active pixel sensor [Z]. US. 6285018B, 2001: 09-04.

[2] Hirvonen L M, Suhling K. Photon counting imaging with an electron-bombarded pixel image sensor[J]. Sensors, 2016, 16 (5): 617-629.

[3] Dominjon A, Ageron M, Barbier R, et al. An EBCMOS camera system for marine bioluminescence observation: The luSEapher prototype[J]. Nucl. Instrum. Meth. A, 2012, 695: 172-178.

[4] Barbier R, Winter M, Laurent N, et al. First results from the development of a new generation of hybrid photon detector: EBCMOS[C]// 10th Inter. Conf. on Advanced Technol. and

Particle Physics，2008，4：23.

[5] Sobottka S B，Meyer T，Kirsch M，et al. Evaluation of the clinical practicability of intraoperative optical imaging comparing three different camera setups[J]. Biomed. Tech.，2013，58(3)：237-248.

[6] Pisecny P，Husekova K，Frohlich K，et al. Growth of lanthanum oxide films for application as a gate dielectric in CMOS technology[J]. Mat. Sci. Semicon. Proc.，2004，7(4/6)：231-236.

[7] Aebi V，Costello K A，Arcuni P W，et al. EBAPS：next generation，low power，digital night vision[C]// OPTRO 2005 Inter. Symp.，2005：14667687.

[8] Barbier R，Baudot J，Chabanat E，et al. Performance study of a mega pixel single photon position sensitive photodetector EBCMOS[J]. Nucl. Instrum. Meth. A，2009，610(1)：54-56.

[9] Barbier R，Cajgfinger T，Calabria P，et al. A single-photon sensitive EBCMOS camera：The LUSIPHER prototype[J]. Nucl. Instrum. Meth. A，2011，648(1)：266-274.

[10] Chrzanowski K. Review of night vision technology[J]. Opto.-electron. Rev.，2013，21(2)：149-164.

[11] 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)：175-180.
Liu Hhulin，Wang Xing，Tian Jinshou，et al. High resolution electron bombareded complementary metal oxide semiconductor sensor for ultraviolet detection[J]. Acta Physica Sinica，2018，67(1)：175-180.

[12] Bai J Z，Wang B，Bai Y L，et al. Optimum design of electron bombarded active pixel sensor for low－level light single photon imaging[C]// Proc. SPIE 10843，9th Inter. Symp. on Adv. Optical Manufacturing and Testing Technologies：Optoelectronic Materials and Devices for Sensing and Imaging，2019：108430V.

[13] Yan L，Shi F，Cheng H C，et al. Research status of dark current in CMOS image sensor[C]// Proc. SPIE 11763，Seventh Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications，2021，1176340.

[14] Li T T，Xiao C，Jiao G C，et al. Research on noise characteristics of EBAPS digital low light level device[C]// Proc. SPIE 12617，Ninth Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications，2023，126176F.

[15] Yang Y，Han K，Yan L，et al. Study on effect of different temperatures on imaging performance of EBAPS devices[J]. Proc. SPIE 11763，Seventh Symp. on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications，2021，11763：117634T.

[16] Wang X N，Song D，Jiao G C，et al. Characterising backscattered electrons in EBCMOS[J]. IEEE Photonics J.，2022，14(6)：6858605.

[17] 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.

[18] Shakoor S M K，Zou Y B，Chao L，et al. Monte Carlo simulation of secondary electron emission from wave type structure[J]. J. of University of Science and Technol. of China，2019，49(1)：79-86.

[19] Jablonski A，Tanuma S，Powell C J. New universal expression for the electron stopping power for energies between 200 eV and 30 keV[J]. Surf. Interface Anal.，2006，38(2)：76-83.

[20] Jablonski A，Tanuma S，Powell C J. Modified predictive formula for the electron stopping power[J]. J. Appl. Phys.，2008，103(6)：063708.

[21] 宋园园，宋　德，李　野，等. 钝化层及 P 型基底结构优化对 EBAPS 电荷收集效率的影响研究[J/OL]. 中国激光，2023，50(18)：1803001.
Song Yuanyuan，Song De，Li Ye，et al. Influence of passivation layer and P-type substrate structure optimization on charge collection efficiency of EBAPS[J/OL]. Chinese J. of Lasers，2023，50(18)：1803001.

[22] Fiebiger J R，Muller R S. Pair production energies in silicon and germanium bombarded with low energy electrons[J]. J. Appl. Phys.，1972，43(7)：3202-3207.

[23] Omotoso E，Meyer W E，Auret F D，et al. The influence of high energy electron irradiation on the Schottky barrier height and the Richardson constant of Ni/4H-SiC Schottky diodes[J]. Mat. Sci. Semicon. Proc.，2015，39：112-118.

作者简介：

陈卫军(1988－)，男，博士，副教授，博士生导师，从事光电成像器件、光场调控等方面的研究；

宋　德(1981－)，男，博士，副教授，硕士生导师，从事光电成像器件方面的研究；

陈文娥(1999－)，女，硕士研究生，主要从事 EBCMOS 增益稳定性的研究。