光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.01.008

电子倍增层表层掺杂分布对EBCMOS电荷收集效率的影响

田佳峰，宋　德*，陈卫军，李　野

（长春理工大学 理学院，长春 130022）

摘　要： 设计了电子倍增层的多种表层结构，并模拟分析了表层掺杂分布对电子轰击型CMOS(EBCMOS)成像器件的电荷收集效率的影响。结合离子注入工艺优化设计电子倍增层表层结构，并利用离子注入模拟软件TRIM模拟分析了不同掩蔽层种类、厚度、离子注入剂量、注入角度和注入能量次数对掺杂分布的影响。再依据载流子传输理论并结合蒙特卡洛模拟方法，模拟分析了相应结构下EBCMOS中电子倍增层的电荷收集效率。模拟研究结果表明：通过选择SiO_2作为掩蔽层、减小掩蔽层厚度、增加注入能量次数等方法可以提高电荷收集效率。在注入剂量选择方面，对电子倍增层表层进行重掺杂，使掺杂浓度下降幅度足够大、下降速度足够缓慢，也可以有效提高电荷收集效率。仿真优化后表层结构所对应器件的电荷收集效率最高可以达到93.61%。

关键词： EBCMOS；梯度掺杂；电场分布；电荷收集效率

中图分类号： TN223　**文章编号：** 1001－5868(2021)01－0045－07

Influence of Doping Distribution in Electron Multiplier Surface Layer on Charge Collection Efficiency of EBCMOS

TIAN Jiafeng, SONG De, CHEN Weijun, LI Ye

(College of Science, Changchun University of Science and Technol., Changchun 130022, CHN)

Abstract: In this paper, various surface structures of electron multiplier layer are designed, and the influence of doping distribution on the charge collection efficiency of electron bombardment CMOS (EBCMOS) imaging device is simulated and analyzed. Combined with ion implantation process, the surface structure of electron multiplier layer was optimized, and the influence of different kinds and thickness of masking layer, ion implantation dose, implantation angle and implantation times on doping distribution was analyzed by using ion implantation simulation software TRIM. According to the carrier transport theory and Monte Carlo simulation method, the charge collection efficiency of electron multiplier layer in EBCMOS is simulated and analyzed. The simulation results show that the charge collection efficiency can be improved by selecting SiO_2 as the masking layer, reducing the thickness of the masking layer and increasing the number of energy injection. In the aspect of injection dose selection, heavily doping the surface layer of the electron multiplication layer can make the doping concentration decrease large enough and slow enough, which can also effectively improve the charge collection efficiency. After optimization, the charge collection efficiency of the device corresponding to the surface structure can reach 93.61%.

Key words: EBCMOS; gradient doping; electric field distribution; charge collection efficiency

收稿日期：2020－10－21.

基金项目：国家自然科学基金项目(11874091)；吉林省教育厅"十三五"科学技术研究项目(JJKH20200733KJ).

* **通信作者：**宋　德 **E-mail:** songde614@163.com

0 引言

数字化微光可以在实现图像信息远距离传输的同时，能够通过图像处理技术对图像信息进行优化，进而极大地拓展微光夜视技术的应用范围[1]。目前比较常见的数字化微光成像器件主要有：像增强型CCD(ICCD)[2]、电子倍增型CCD(EMCCD)[3]、电子轰击型CCD/CMOS(EBCCD/EBCMOS)等[4]。其中，EBCCD和EBCMOS器件的工作原理是将背部减薄的CCD和CMOS器件封装于电真空器件中来取代微通道板和荧光屏，光电阴极所产生的光电子经过高压电场加速后轰击到成像器件表面直接成像。EBCMOS具有体积小、重量轻、功耗低和灵敏度高等优点，因而在便携式微光夜视成像领域里更具优势[5-6]，近年来逐渐成为业界研究的热点。

1999年美国Intevac公司率先提出EBCMOS这一概念并公布了电子轰击有源像素传感器混合型光电器件的发明专利[7]。2000年该公司研制出第一个EBCMOS成像器件，并陆续研发出升级版的电子轰击有源像素传感器芯片[8]。2007年法国里昂大学Barbier等研制的EBCMOS样机实现了2.0×10^{-4} lx照度下的成像[9]。2009年法国核物理研究所研制出了灵敏度更高的EBCMOS器件，其探测水平能够达到单光子级[10]。2012年，法国Photonis公司成功研制出其第一款EBCMOS器件并在2013年又成功研制出EBCMOS相机。当EBCMOS夜视相机用于武装直升机时，它能够在夜间为飞行员提供非常清晰的图像[11]。表层掺杂处理对器件性能影响较大，比如Barbier等[12]通过实验对比证实了梯度掺杂下EBCMOS的电荷收集效率从均匀掺杂的32%提高至66%，相应电子倍增层的增益从230提高到了506，但通过现有工艺进一步优化提升电荷收集效率的工作尚未见报道。

本文结合离子注入工艺研究了电子倍增层表层结构的可行性设计，并模拟分析了相应结构对电荷收集效率的影响。结合离子注入模拟软件TRIM，模拟分析了掩蔽层的材料种类和厚度、离子注入剂量、角度以及多种能量注入模式对电子倍增层表层结构内杂质掺杂分布的影响。同时，依据载流子传输理论并结合蒙特卡洛法，模拟分析了相应表层结构对电子倍增层的电荷收集效率的影响，从而为高增益的电子倍增层的制备提供理论基础。

1 仿真模型

EBCMOS工作时光电阴极产生的光电子经过高压电场加速后入射到CMOS图像传感器背表面，进而产生大量倍增电子(电子轰击半导体增益)。倍增电子与光电子的增益满足以下公式[13-14]：

$$G=\varepsilon(E_0-E_{\mathrm{Dead}})/3.6 \tag{1}$$

其中，G为增益倍数，E_0为入射光电子能量，E_{Dead}为经过死层损耗的能量，ε为电荷收集效率。倍增电子最终由收集n阱收集并被CMOS读出电路读出。图1所示为p外延层梯度掺杂的表面结构。

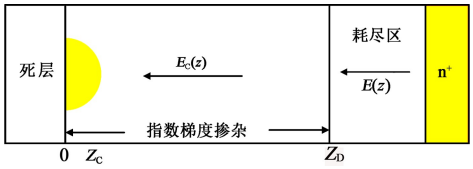


图1 p外延层梯度掺杂模型

在掺杂模型中，$Z_C=0.7$ μm，$Z_D=5$ μm。0～Z_C段是硅表层梯度掺杂区域，掺杂浓度从高到低。在模拟过程中将该段分成等距离的70段，假设每一小段均符合指数掺杂分布，其分布满足公式(2)，其中，N_z为z轴不同位置对应的掺杂浓度。任意一段内参数a_i和b_i与掺杂区域内始末位置坐标和掺杂浓度有关。

$$N_z=a_i\cdot\exp(-b_i\cdot z) \tag{2}$$

为完成上述表层结构的制备，应用离子注入模拟软件TRIM(the Transport of Ions in Matter)模拟不同条件下硼离子的分布，得到不同条件下的平均投影射程值R_p和标准偏差值ΔR_p[15]。单次离子注入原理的掺杂浓度分布用高斯函数可以表示为

$$n(x)=\frac{Q_T}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{(x-R_p)}{(\Delta R_p)}\right)^2\right] \tag{3}$$

其中，Q_T为注入剂量。当$x=R_p$时，峰值浓度$N_{\max}$的表达式为

$$n(R_p)=N_{\max}=\frac{Q_T}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \tag{4}$$

当进行多种离子能量注入时，可根据单次掺杂分布的仿真数据并结合MATLAB软件拟合绘制出硅表层最终的掺杂分布曲线。根据指数掺杂时的电场计算公式(5)模拟计算硅表层处电场分布，进而根据半导体理论可计算出表面至n阱间的电场分布，然后依据载流子扩散和漂移的相关理论(式(6)～(10))并结合蒙特卡洛模拟方法[16]，模拟大量倍增电子时

在不同掺杂条件下的运动轨迹(如图 2)。当倍增电子沿 z 轴方向上的移动速度 $v_{(z)}=v_{d(r)}\cdot\cos\theta_i+v_{E(z)}<0$ 时,电子向死层运动并最终被复合;反之电子向 n 层运动而被收集[17]。

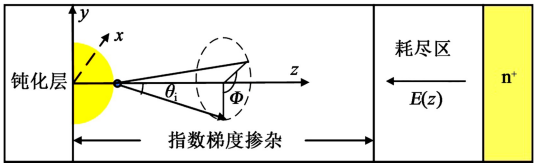


图 2　p 外延层梯度掺杂下的电子运动轨迹图

指数掺杂区域内电场满足公式(5),其中 b_i 值与式(2)相同,k 为玻尔兹曼常量,T 为热力学温度,取 $T=300$ K,q 为电荷量。

$$E_C(z)=\frac{kT}{q}\cdot b_i \tag{5}$$

EBCMOS 电子倍增层中从表面到 n 阱区域内的载流子扩散满足以下公式:

$$D_n\frac{\partial^2(\Delta n)}{\partial r^2}=\frac{-\mu_n E}{\cos\theta_i}\frac{\partial(\Delta n)}{\partial r}+\frac{\Delta n}{\tau_n} \tag{6}$$

其中,θ_i 为扩散速度矢量与 z 轴的角(0°～90°内随机值),r 是由三维坐标 x 转变成的球坐标,τ_n 为非平衡少数载流子的寿命。载流子扩散速度满足以下公式:

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

L_n 为扩散长度,满足以下公式:

$$L_n=\sqrt{D_n\tau_n} \tag{8}$$

$$L_n(E)=\frac{\mu_n E\tau}{\cos\theta_i} \tag{9}$$

其中,D_n 为电子扩散系数,μ_n 为非平衡少数载流子的迁移率。

迁移速度满足以下公式:

$$\begin{cases}v_{(x)}=v_{d(r)}\cdot\sin\theta_i\cdot\cos\varphi\\ v_{(y)}=v_{d(r)}\cdot\sin\theta_i\cdot\sin\varphi\\ v_{(z)}=v_{d(r)}\cdot\cos\theta_i+v_{E(z)}\end{cases} \tag{10}$$

其中,$v_{E(z)}=\mu_n\cdot E$,φ 为 0°～360°内随机值。

根据对倍增电子运动轨迹的分析,可计算出任意像素收集 n 阱处收集的倍增电子数 $N(i,j)$。考虑到掺杂浓度对少数载流子复合率的影响,通过公式(11)计算出相应像素区域内总的收集电子数[18]:

$$N_{收集}=(N_{ij})\cdot\left[\exp\left(-\frac{t_1}{\tau_1}\right)\cdots\exp\left(-\frac{t_i}{\tau_i}\right)\cdots\exp\left(-\frac{t_m}{\tau_m}\right)\right] \tag{11}$$

模拟过程中假定硅表面到 n 阱分为 M 段,t_i 为第 i 段路程内电子运动时间,t_1 和 t_m 分别为第一和最后段的电子运动时间,τ 为对应区域内的少子寿命。最终 n 阱收集电子与总倍增电子之比即为电荷收集效率 ε。

2　结果与讨论

2.1　掩蔽层种类对掺杂浓度分布及电荷收集效率的影响

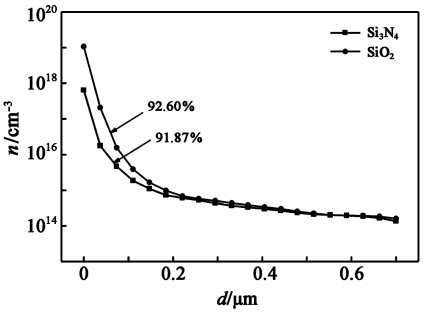
由式(4)可知,离子注入的掺杂浓度符合高斯分布:当 $x<R_p$ 时,硼离子浓度在靠近 R_p 点的过程中逐渐上升;当 $x>R_p$ 时,硼离子浓度在远离 R_p 点的过程时又逐渐下降。由图 1 所示结构可知,掺杂浓度随离子注入深度增加而上升的情况不利于倍增电子的收集。在离子注入过程中可以利用掩蔽层来掩蔽掉这部分,在离子注入后再把掩蔽层去除,只保留掺杂浓度随离子注入深度增加而下降的部分。表 1 给出分别选择二氧化硅(SiO_2)和氮化硅(Si_3N_4)作为掩蔽层,对应每次注入能量的 R_p、ΔR_p 和注入剂量值。其中,掩蔽层厚度为 50 nm,注入角度均为 10°,注入能量次数均为 8 次。

表 1　不同掩蔽层下对应每次注入能量的 R_p、ΔR_p 值和注入剂量值

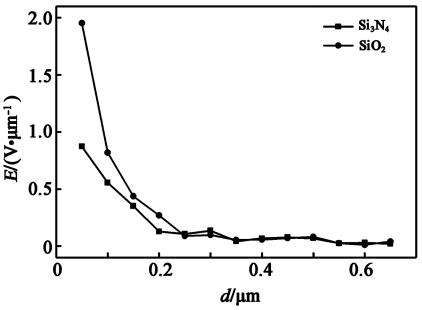
注入能量/keV		5	10	15	25	45	90	150	255
注入剂量/cm^{-2}		10^{15}	10^{13}	10^{12}	9×10^{10}	2×10^{10}	9×10^{9}	6×10^{9}	5.5×10^{9}
R_p/nm	SiO_2	21.4	40.9	60.5	96.7	160.7	288.3	445.1	685.0
	Si_3N_4	13.9	26.5	39.6	72.1	135.2	258.4	420.6	657.6
ΔR_p/nm	SiO_2	10.4	18.7	25.1	36.9	53.3	76.6	90.2	120.3
	Si_3N_4	6.3	11.6	17.7	31.5	48.9	71.4	92.0	121.1

从图 3(a)可以看出,选用 Si_3N_4 作为掩蔽层时硅表层掺杂浓度比选用 SiO_2 时低,掺杂浓度下降的幅度更小。这说明 Si_3N_4 对注入离子的阻挡能力更强。通过图 3(b),观察注入深度 d 为 0.05 μm 处电场强度的变化情况,选用 SiO_2 作为掩蔽层的电场强度为 1.95 V/μm,选用 Si_3N_4 作为掩蔽层的电场强度为 0.87 V/μm。随着注入深度的增加,二者电场强度的差距逐渐减小,在注入深度达 0.3 μm 后电

场强度基本不随掩蔽层种类的变化而变化。依据电荷收集效率的计算模型并通过 MATLAB 软件编程，可以得到不同种类掩蔽层时的电荷收集效率。当掩蔽层为 SiO_2 时，多次仿真的平均值为 92.60%。当掩蔽层为 Si_3N_4 时，多次仿真的平均值为 91.87%。因此，在其他条件相同时，选用SiO_2作为掩蔽层时



(a) 掺杂浓度分布图



(b) 电场分布图

图 3 不同掩蔽层种类时的硅表层梯度掺杂浓度分布曲线和电场分布图

硅表面处的掺杂浓度和电场强度更高、下降幅度更大，更利于提高电子倍增层的电荷收集效率。

2.2 掩蔽层厚度对掺杂浓度分布及电荷收集效率的影响

表 2 给出不同掩蔽层厚度条件下，对应每次注入能量的 R_p、ΔR_p 和注入剂量值。其中选用的 SiO_2 掩蔽层厚度分别为 50，100 和 150 nm，注入角度均为 10°，注入能量均为 8 次。

从图 4(a)可见，当掩蔽层厚度不断增大时，相同注入深度处的掺杂浓度越来越低，掺杂浓度的下降幅度随注入深度的增加也逐渐变小。从图 4(b)可以看出，随着掩蔽层厚度的增加，硅表层的电场强度逐渐变小。随着掩蔽层厚度的不断增大，越靠近硅表层处的电场强度下降得越多，电场强度下降的幅度随深度增加也越来越小。增大掩蔽层厚度使硅表层的电场强度逐渐变小，下降幅度也变小。依据电荷收集效率的计算模型可得到不同条件下的电荷收集效率。当掩蔽层厚度为 50，100 和 150 nm 时，多次仿真的电荷收集效率平均值分别为 92.89%，89.85%和 85.84%。随着掩蔽层厚度的不断增大，电荷收集效率不断降低。因此，在选择掩蔽层厚度时，既要保持一定厚度又要使掩蔽层厚度尽可能小，以保证电子倍增层表面处的掺杂浓度足够高、下降幅度足够大，这有利于提高电子倍增层表层处的电场强度，从而提升电荷收集效率。

表 2 不同掩蔽层厚度下对应每次注入能量的 R_p、ΔR_p 值和注入剂量值

注入能量/keV		5	10	20	35	70	120	180	280
注入剂量/cm^{-2}		1.1×10^{15}	6×10^{12}	3×10^{11}	8×10^{10}	2×10^{10}	8×10^{9}	4×10^{9}	5×10^{9}
R_p/nm	50 nm	21.4	40.9	80.1	131.8	231.6	375.3	521.0	735.8
	100 nm	21.4	40.9	80.0	134.0	236.9	372.2	523.7	741.2
	150 nm	21.4	40.9	78.6	135.9	244.7	378.1	536.5	746.3
ΔR_p/nm	50 nm	10.4	18.7	31.7	44.9	67.5	87.5	101.5	121.0
	100 nm	10.3	17.8	30.8	46.8	64.3	84.2	101.8	123.4
	150 nm	10.3	17.8	30.5	45.5	67.8	91.4	95.9	116.7

2.3 注入剂量对掺杂浓度分布及电荷收集效率的影响

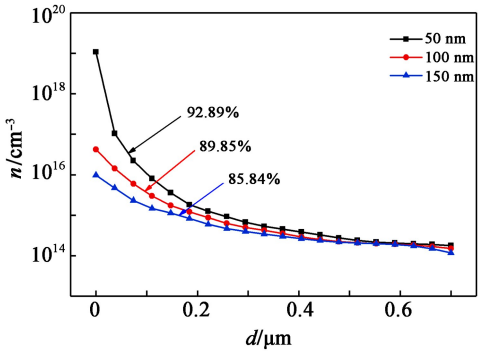
表 3 给出不同注入剂量条件下，对应每次注入能量的 R_p、ΔR_p 和注入剂量值。其中，选用的 SiO_2 掩蔽层厚度为 50 nm，注入角度均为 10°，注入能量次数均为 8 次。选择三组不同的注入剂量，为了保证不同注入剂量条件下掺杂浓度的下降幅度相同，从第 1 组到第 3 组的首次注入剂量逐渐减小。但是，从第二次注入起，每次注入时第 1 组到第 3 组的注入剂量逐渐增大。

由图 5(a)可知，在三种不同剂量组条件下，硅表层的初始掺杂浓度均为 1×10^{19} cm^{-3}。但是第 1 组掺杂浓度下降的速度最快，第 2 组掺杂浓度的下降速度减缓，第 3 组掺杂浓度的下降速度最慢。从图 5(b)中观察注入深度 0.04～0.14 μm 区域内的电场强度变化。可以看出，当选用剂量组 1 时，电场强度从 0.04 μm 处的 2.68 V/μm 下降到 0.14 μm 处的 0.4 V/μm；当选用剂量组 2 时，电场强度从 2.31 V/μm 下降到 0.64 V/μm；当选用剂量组 3 时，从 1.61 V/μm 下降到 0.67 V/μm。从剂量组 1 到剂量组 3，电场强度的下降速度越来越慢。依据电荷收集效率的计算模型可得到不同条件下的电荷收集

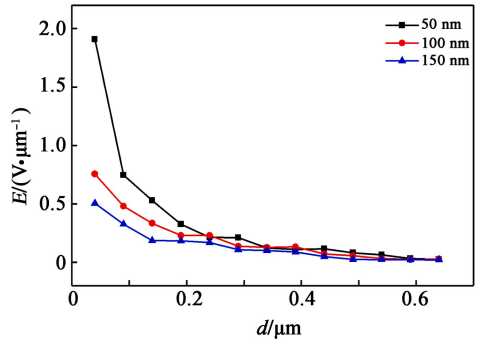
效率。3 组注入剂量下所得多次仿真的电荷收集效率的平均值分别为 91.79%，92.60%和 93.09%。因此，在掺杂浓度的下降幅度相同时，所选注入剂量使掺杂浓度和电场强度下降的速度越慢，越有利于提高电荷收集效率。

表 3　不同注入剂量下对应每次注入能量的 R_p、ΔR_p 值和注入剂量值

注入能量/keV	5	10	20	35	70	120	180	280
R_p/nm	21.4	40.9	80.1	131.8	231.6	375.3	521.0	735.8
ΔR_p/nm	10.4	18.7	31.7	44.9	67.5	87.5	101.5	121.0
剂量组 1 注入剂量/cm^{-2}	1.2×10^{15}	2×10^{12}	4×10^{10}	8×10^{9}	4×10^{9}	3×10^{9}	3×10^{9}	3.5×10^{9}
剂量组 2 注入剂量/cm^{-2}	9.3×10^{14}	1.3×10^{13}	4.5×10^{11}	4×10^{10}	1×10^{10}	6×10^{9}	4×10^{9}	4.5×10^{9}
剂量组 3 注入剂量/cm^{-2}	8×10^{14}	2×10^{13}	1.5×10^{12}	2.5×10^{11}	4×10^{10}	1×10^{10}	6×10^{9}	5.5×10^{9}

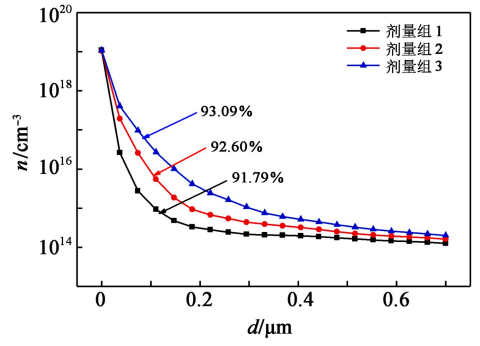


（a）　掺杂浓度分布图

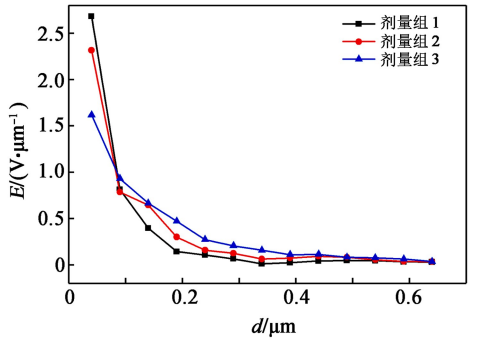


（b）　电场分布图

图 4　不同掩蔽层厚度时的硅表层梯度掺杂浓度分布曲线和电场分布图



（a）　掺杂浓度分布图



（b）　电场分布图

图 5　不同注入剂量时的硅表层梯度掺杂浓度分布曲线和电场分布图

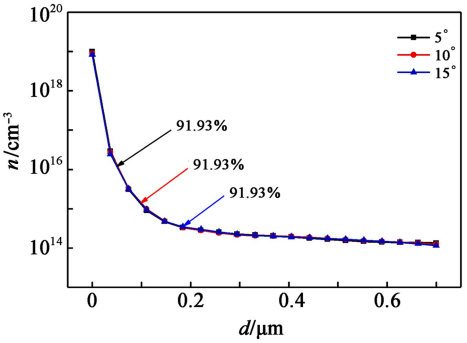
2.4　注入角度对掺杂浓度分布及电荷收集效率的影响

在进行离子注入的时候，为了尽可能避免沟道效应，离子束在注入硅片时必须要偏离沟道方向 7°～10°。本节研究不同注入角度对掺杂浓度分布以及电荷收集效率的影响。选择 SiO_2 为掩蔽层，厚度为 50 nm，注入角度分别选择 5°，10°和 15°，注入能量次数均为 8 次。不同注入角度条件下，对应每次注入能量的 R_p、ΔR_p 和注入剂量值如表 4 所示。

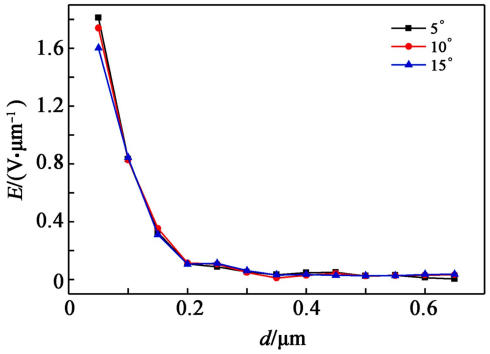
从图 6(a)可知，当注入角度分别为 5°，10°和 15°时，掺杂浓度分布并没有因为注入角度的改变而发生剧烈的变化，3 条曲线基本重合，即改变注入角度对掺杂浓度分布的影响较小。从图 6(b)可见，当注入角度分别为 5°，10°和 15°时，硅表层梯度掺杂区域内的电场分布变化很小。依据电荷收集效率的计算模型，可得到注入角度分别为 5°，10°和 15°时的电荷收集效率均为 91.93%。所以在进行离子注入时，离子束在注入硅片时必须要偏离沟道方向 7°～10°，以减小沟道效应和注入损伤。

表 4 不同注入角度时的 R_p、ΔR_p 值和注入剂量值

注入能量/keV		5	10	20	35	70	120	180	280
注入剂量/cm^{-2}		1×10^{15}	2×10^{12}	5×10^{10}	8×10^{9}	4×10^{9}	3×10^{9}	3×10^{9}	3.5×10^{9}
R_p/nm	5°	21.7	41.7	79.7	130.6	235.0	373.8	524.8	749.2
	10°	21.4	40.9	80.1	131.8	231.6	375.3	521.0	735.8
	15°	21.3	40.1	79.4	127.7	228.5	358.2	511.2	715.4
ΔR_p/nm	5°	10.4	18.5	30.7	47.0	68.7	82.3	98.2	112.9
	10°	10.4	18.7	31.7	44.9	67.5	87.5	101.5	121.0
	15°	10.3	18.5	32.0	46.0	65.1	84.3	100.6	125.3



(a) 掺杂浓度分布图



(b) 电场分布图

图 6 不同注入角度时的硅表层梯度掺杂浓度分布曲线和电场分布图

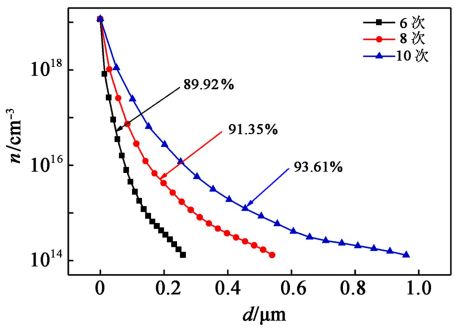
2.5 注入能量次数对掺杂浓度分布及电荷收集效率的影响

表 5 给出不同注入能量次数条件下，所选能量的 R_p 和 ΔR_p 值。其中，选用 SiO_2 为掩蔽层，厚度为 45 nm，注入角度均为 7°，注入能量次数分别选择 6，8 和 10 次。当注入能量次数为 6 次时，所选取的注入能量分别为：5，10，15，25，45 和 70 keV。当注入能量为 8 次时，前 6 次所选能量值相同，后 2 次注入能量为 110 和 170 keV。当注入能量为 10 次时，前 8 次所选取的能量值相同，后 2 次注入能量为 275 和 400 keV。调整每次注入的注入剂量以保证硅表层的初始掺杂浓度均为 1×10^{19} cm^{-3}。

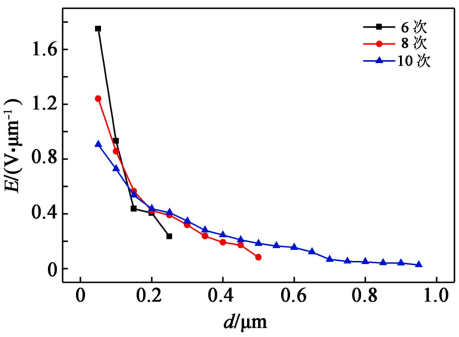
由图 7(a)可见，注入能量次数为 6 次时，掺杂浓度下降的速度最快，梯度掺杂区最短。随着注入能量次数的增加，掺杂浓度下降的速度随着注入深度的变化也越来越慢，梯度掺杂区也越来越长。从图 7(b)观察注入深度 0.05～0.25 μm 区域内电场强度的变化发现，可以看出，在注入能量次数为 6 次时，电场强度从 1.75 V/μm 下降到 0.23 V/μm；注入能量次数为 8 次时，电场强度从 1.24 V/μm 下降到 0.39 V/μm；注入能量次数为 10 次时，电场强度从 0.9 V/μm 下降到 0.41 V/μm。随着注入能量次数的不断增加，电场强度下降的速度逐渐减缓。同时，梯度掺杂区的长度从 0.25 μm 延长到 0.95 μm。可见，增加注入能量次数可以延长梯度掺杂区的长度，减缓电场强度下降的速度。依据电荷收集效率的计算模型可得到不同条件下的电荷收集效率。当

表 5 不同注入能量次数时所选能量的 R_p 和 ΔR_p 值

注入能量/keV	5	10	15	25	45	70	110	170	275	400
R_p/nm	21.9	40.5	60.2	97.2	160.9	235	348.2	496	728.7	963.2
ΔR_p/nm	10.2	18.1	25.8	37.2	53	66	78.1	99.2	117.3	129.3



(a) 掺杂浓度分布图



(b) 电场分布图

图 7 不同注入能量次数时的硅表层梯度掺杂浓度分布曲线和电场分布图

注入能量次数为 6 次，8 次和 10 次时，得到多次仿真的电荷收集效率平均值分别为 89.92%，91.35% 和 93.61%。可见，增加注入能量次数可以延长梯度掺杂区域，使掺杂浓度和电场强度的下降速度逐渐减缓，有利于提高电荷收集效率。

3　结论

依据离子注入分布的基本原理及载流子传输理论，模拟了不同条件下 EBCMOS 电子倍增层的表层梯度掺杂分布及相应结构下的电荷收集效率和电场分布。不同掩蔽层种类的研究表明：当掩蔽层厚度为 50 nm 时，选用 SiO_2 作为掩蔽层时表面处的掺杂浓度和电场强度更高，下降幅度更大，更有利于提高电荷收集效率。不同掩蔽层厚度的研究表明：在保持一定厚度的同时使掩蔽层厚度尽可能小，这有利于提高表层掺杂浓度，进而提升电荷收集效率。不同注入剂量的研究表明：应对电子倍增层表层进行重掺杂，以保证掺杂浓度的下降幅度足够大。在掺杂浓度的下降幅度相同时，掺杂浓度下降的速度越慢，越有利于提升电荷收集效率。不同注入角度的研究表明：不考虑注入损伤时，注入角度对掺杂分布及电荷收集效率基本没有影响。不同注入能量次数的研究表明：注入能量次数越多，梯度掺杂区越长，掺杂浓度下降的速度越慢，越有利于提高电荷收集效率。采用上述优化的注入条件，制备的表层结构所对应的电荷收集效率最高可达 93.61%，这为高性能 EBCMOS 成像器件的制备提供了理论基础。

参考文献：

[1] 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.

[2] 刘　璐，郭明安，严　明，等. 像增强器在高速成像应用中的高重频特性[J]. 光子学报，2017，46(11)：26-30.
Liu Lu，Guo Mingan，Yan Ming，et al. High repetition rate characteristics of image intensifier in high speed imaging applications[J]. Acta Photonica Sinica，2017，46(11)：26-30.

[3] 张闻文，钱月红，陈　钱，等. 电子倍增 CCD 噪声因子模型及测试方法[J]. 光子学报，2013，42(11)：1345-1349.
Zhang Wenwen，Qian Yuehong，Chen Qian，et al. Noise factor model and test method of electron multiplier CCD[J]. Acta Photonica Sinica，2013，42(11)：1345-1349.

[4] 金伟其，陶　禹，石　峰，等. 微光视频器件及其技术的进展[J]. 红外与激光工程，2015，44(11)：3167-3176.
Jin W Q，Tao Y，Shi F，et al. Progress of low level light video technology[J]. Infrared and Laser Engineering，2015，44(11)：3167-3176.

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

[6] 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 bombareded complementary metal oxide semiconductor sensor for ultraviolet detection[J]. Acta Physica Sinica，2018，67(1)：014209.

[7] Aebi V W，Boyle J J. Electron bombarded active pixel sensor：US，6285018B1[P]. 2001：09-04.

[8] Aebi V W，Costello K A，Arcuni P W，et al. EBAPS：Next generation，low power，digital night vision[C]// Presented at the OPTRO 2005 International Symposium，2005：1-10.

[9] Barbier R，Depasse P. First results from the development of a new generation of hybrid photon detector：EBCMOS[C]// 10th Conf. Astroparticle Particle and Space Physics，Detectors and Medical Physics Applications，2007，10：1-5.

[10] Dominjon A，Chabanat E，Depasse P，et al. Large-scale ultrafast single photo electron tracker[C]// IEEE Nuclear Science Symposium Conf. Record，2009，N25-123：1527-1531.

[11] Jeff A. Intevac announces LIVAR digital camera production drders[EB/OL]. http://www.intevac.com. 2013-02-08.

[12] 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，2011，A648(1)：266-274.

[13] Hirvonen L M，Jiggins S，Sergent N，et al. Photon counting imaging with an electron-bombarded CCD：Towards wide-field time-correlated single photon counting (TCSPC)[J]. Nuclar Instruments and Methods in PhysicsResearch Section A：Accelerators，Spectrometers，Detectors and Associated Equipment，2015，787：323-327.

[14] 朱　敏，田进寿，温文龙，等. 基于电子轰击式 CCD 的大动态条纹相机研究[J]. 物理学报，2015，64(9)：098501.
Zhu M，Tian J S，Wen W L，et al. Research on large dynamic range streak camera based on electron bombarded CCD[J]. Acta Physica Sinica，2015，64(9)：098501.

[15] Eckstein W. Backscattering and sputtering with the Monte-Carlo program TRIM. SP[J]. Radiation Effects，2006，130-131(1)：239-250.

（下转第 105 页）

参考文献：

[1] Dong Q, Feng J. Outlier detection and disparity refinement in stereo matching[J]. J. of Visual Communication and Image Representation, 2019, 60: 380-390.

[2] Hadfield S, Lebeda K, Bowden R. Stereo reconstruction using top-down cues [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2017, 157: 206-222.

[3] Yan T, Gan Y, Xia Z, et al. Segment-based disparity refinement with occlusion handling for stereo matching[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2019, 28(8): 3885-3897.

[4] 王云峰，吴　炜，余小亮，等. 基于自适应权重 AD-Census 变换的双目立体匹配[J]. 工程科学与技术，2018，50(4)：153-160.
Wang Y F, Wu W, Yu X L, et al. A stereo matching system with the adaptive weight AD-Census [J]. Adv. Engin. Sciences, 2018, 50(4): 153-160.

[5] Scharstein D, Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms[J]. Inter. J. of Computer Vision, 2002, 47(1/3): 7-42.

[6] Hirschmuller H, Scharstein D. Evaluation of stereo matching costs on images with radiometric differences[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 31(9): 1582-1599.

[7] Ma L, Li J, Ma J, et al. A modified census transform based on the neighborhood information for stereo matching algorithm [C]// Proc. of 2013 Seventh Inter. Conf. on Image and Graphics, 2013: 533-538.

[8] Mei X, Sun X, Zhou M, et al. On building an accurate stereo matching system on graphics hardware[C]// Proc. of 2011 IEEE Inter. Conf. on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2011: 467-474.

[9] Zhu S, Yan L. Local stereo matching algorithm with efficient matching cost and adaptive guided image filter[J]. The Visual Computer, 2017, 33(9): 1087-1102.

[10] Tan P, Monasse P. Stereo disparity through cost aggregation with guided filter[J]. Image Processing on Line, 2014, 4: 252-275.

[11] 彭新俊，韩　军，汤　踊，等. 基于改进 Census 变换和异常值剔除的抗噪立体匹配算法[J]. 光学学报，2017，37(11)：223-231.
Peng X J, Han J, Tang Y, et al. Anti-noise stereo matching algorithm based on improved Census transform and outlier elimination[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 223-231.

[12] Ma Z, He K, Wei Y, et al. Constant time weighted median filtering for stereo matching and beyond[C]// Proc. of the IEEE Inter. Conf. on Computer Vision, 2013: 49-56.

[13] 梁海波，邹佳玲. 改进的非参数 Census 变换立体匹配算法[J]. 吉林大学学报(理学版)，2019，57(5)：1163-1168.
Liang H B, Zou J L. Improved stereo matching algorithm based on nonparametric Census transform [J]. J. of Jilin University(Science Edition), 2019, 57(5): 1163-1168.

[14] 门宇博，马　宁，张国印，等. 非参数变换和改进动态规划的立体匹配算法[J]. 哈尔滨工业大学学报，2015，47(3)：60-65.
Men Y B, Ma N, Zhang G Y, et al. A stereo matching algorithm based on Census transform and improved dynamic programming[J]. J. of Harbin Institute of Technol., 2015, 47(3): 60-65.

[15] Baek E-T, Ho Y-S. Cost aggregation with guided image filter and superpixel for stereo matching[C]// Proc. of 2016 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA), 2016: 1-4.

作者简介：

刘振友(1996－)，男，硕士研究生，主要研究方向为计算机视觉；

郑茜颖(1970－)，女，博士，副教授，主要研究方向为人工智能与计算机视觉。

(上接第 51 页)

[16] 王　岩. Monte Carlo 方法应用研究[J]. 云南大学学报(自然科学版)，2006(S1)：33-36.
Wang Y. Application of Monte Carlo method[J]. J. of Yunnan University: Natural Science Page, 2006(S1): 33-36.

[17] 朴　雪. 电子轰击有源像素传感器电荷收集效率理论模拟研究[D]. 长春：长春理工大学，2016：37-38.
Piao X. Theoretical simulation of charge collection efficiency of electron bombarded active pixel sensor [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016: 37-38.

[18] 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.

作者简介：

田佳峰(1996－)，男，吉林吉林人，硕士研究生，研究方向为光电成像器件与系统；

宋　德(1981－)，男，吉林靖宇人，理学博士，副教授，研究方向为光电成像器件与系统。