

文章编号: 2095-4980(2024)12-1414-07

电子轰击引起 CMOS 图像传感器增益衰减研究

闫磊^{1,2}, 石峰^{1,2}, 程宏昌^{1,2}, 苗壮^{1,2}, 杨晔², 樊海波², 韩剑², 焦岗成^{1,2}

(1.微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065; 2.昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 为探究氧化铝钝化层结构的 CMOS 图像传感器在较高电流密度的电子轰击后电子倍增系数减小问题, 本文模拟氧化铝钝化层 CMOS 图像传感器制备工艺方法。在晶向为(100), 掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 P 型硅表面制备氧化铝钝化层, 模拟电子束轰击 CMOS 图像传感器的条件, 对制备 P 型硅样品表面进行轰击, 并利用高频 C-U 测试装置对该样品轰击前、后的高频 C-U 曲线进行测试。根据测试数据及 SRH 理论和少数载流子输运方程分析, 得出电子轰击引起该型图像传感器钝化层内部正电荷沉积, 以及硅界面缺陷态密度增加, 是引起其电子倍增系数减小的内在原因。

关键词: 电子轰击(EBCMOS); 氧化铝钝化层; 暗电流; 电子倍增系数; 图像传感器

中图分类号: TN914

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023131

Gain attenuation of CMOS image sensor caused by electron bombardment

YAN Lei^{1,2}, SHI Feng^{1,2}, CHENG Hongchang^{1,2}, MIAO Zhuang^{1,2}, YANG Ye², FAN Haibo²,
HAN Jian², JIAO Gangcheng^{1,2}

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

2.Kunming Institute of Physics, Kunming Yunnan 650223, China)

Abstract: To investigate the issue of reduced electron multiplication factor in Complementary Metal Oxide Semiconductor(CMOS) image sensors with an aluminum oxide passivation layer structure after being bombarded with high current density electrons, this paper simulates the fabrication process of CMOS image sensors with an aluminum oxide passivation layer. An aluminum oxide passivation layer is prepared on the surface of P-type silicon with a crystal orientation of (100) and a doping concentration of $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. The conditions for electron beam bombardment of CMOS image sensors are simulated, and the prepared P-type silicon samples are bombarded. A high-frequency C-U testing device is employed to test the high-frequency C-U curves of the samples before and after bombardment. Based on the test data and analysis using the Shockley-Read-Hall(SRH) theory and minority carrier transport equations, it is concluded that the internal positive charge deposition in the passivation layer and the increase in defect state density at the silicon interface caused by electron bombardment are the intrinsic reasons for the reduction in the electron multiplication factor of this type of image sensor.

Keywords: electron bombardment CMOS; aluminum oxide passivation layer; dark current; electron multiplication factor; image sensor

微光图像数字化是微光夜视技术的发展趋势^[1-4], 电子轰击互补金属氧化物半导体(Electron Bombardment Complementary Metal Oxide Semiconductor, EBCMOS)器件探测器是将真空光电器件与 CMOS 图像传感器相结合的一种新型的光电探测器, 兼具真空像增强器和 CMOS 图像传感器的优点, 代表了真空器件未来的发展方向, 在国外已广泛用于军事、天文及生物细胞研究等领域^[5-6]。具有电子倍增特性的 CMOS 图像传感器是 EBCMOS 器件的核心部件, 直接影响电子轰击有源像素传感器(Electrons Bombard Active Pixel Sensor, EBAPS)探测器的成像质量^[7]。

受国外技术封锁, 国内关于电子倍增特性的 CMOS 图像传感器研究尚处于起步阶段。昆明物理研究所前期研

究发现，具有氧化铝钝化层的背照式 CMOS 图像传感器具有较好的电子倍增特性^[8-9]，但该型样品在较大电流密度电子长时间轰击后，会出现暗电流增加，电子倍增特性衰减等问题，影响其在微光环境中的探测性能。高能射线或离子在轰击氧化层时会产生氧化物正电荷^[10-11]，但轰击能量在 1.5 keV 内，轰击电流密度在 $2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 内的电子轰击后氧化层的损伤机制尚不清楚。为探究电子轰击后引起暗电流、电子倍增特性衰减现象的内在原因，本文模拟氧化铝钝化层 CMOS 图像传感器制备工艺方法，在晶向为(100)，掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 P 型硅表面制备氧化铝钝化层，模拟其电子轰击条件对制备样品进行电子轰击和测试分析，并基于 SRH 理论和少数载流子输运方程分析得出，界面缺陷态及固定沉积电荷增加是造成暗电流、电子倍增特性发生变化的内在原因。

1 电子轰击对氧化铝钝化层 CMOS 图像传感器倍增性能影响实验

1.1 实验装置

采用的实验装置为自主研制的低能电子轰击 CMOS 图像传感器测试设备，如图 1 所示。实验选用的 CMOS 图像传感器为前期研发的具有电子倍增特性的 CMOS 图像传感器^[8]，其钝化层为氧化铝。

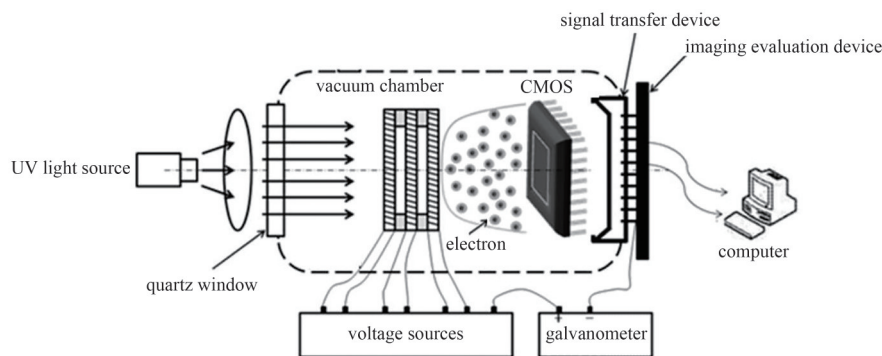


Fig.1 Low energy electron bombardment CMOS image sensor testing equipment

图1 低能电子轰击 CMOS 图像传感器测试设备

测量原理为：将待测试的 CMOS 图像传感器安装在真空腔室内部，通过真空除气处理将真空腔室内部真空度提高至 $5 \times 10^{-8} \text{ Pa}$ 以上，使 CMOS 图像传感器所处状态尽可能接近其在 EBCMOS 内部工作的状态；待真空腔室内部真空度达到设定要求后，按图 1 连接所示，开启紫外灯光，使紫外光经过石英玻璃观察窗进入真空腔室内部，紫外光可在微通道板(Microchannel Plate, MCP)表面激发产生自由电子，其激发的光电子在多级联 MCP 倍增后形成轰击电子束源，通过调节多级连 MCP 倍增电压和输出电压参数，可实时调控入射到 CMOS 图像传感器表面的电子束密度和轰击能量；在电子束轰击 CMOS 图像传感器时，通过成像测试板监测 CMOS 图像传感器的轰击电子数量和输出视频图像灰度值，并根据灰度值确定电子倍增系数，轰击停止后，按照 CMOS 暗电流测试方法，获得暗电流参数。

1.2 电子轰击引起 CMOS 图像传感器电子倍增性能变化

本次轰击实验的电子束密度和轰击能量均模拟 EBCMOS 的常规工作条件：a) 模拟 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ lx}$ 夜天光照度，等效电子密度为 $0.2 \sim 20 \text{ nA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ；b) 模拟夜天光条件下强光光源，点光源等效照度为 $10^{-1} \sim 10^0 \text{ lx}$ ，等效电子密度为 $200 \sim 2000 \text{ nA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，工作电压在 1.5 kV 以内。图 2 为低能电子轰击 CMOS 图像传感器测试设备在电子轰击过程中测得的视频输出图像。

根据图 2 视频图像灰度值，依据入射到 CMOS 图像传感器表面电子束密度，以及 CMOS 图像传感器电子与输出灰度之间的转换系数，可求得电子轰击后电子倍增系数、暗电流参数与轰击电子间的变化关系。根据测试数据，当电流密度较小时，其倍增特性成线性变化；当电流密度较大时，其倍增系数在极短时间内大幅度下降。本文统计了 15 只 EBCMOS，以对应变化率最大值作为统计数据，其变化如表 1 所示。

表 1 中，变化率为正，表示其相对于初始值增加；变化率为负，表示其相对于初始值减小。根据表 1，在 $1 \times 10^{-2} \text{ lx}$ 照度等效条件下，



Fig.2 Output image of electronic bombardment video

图2 电子轰击视频输出图像

随着电子轰击时间增加，CMOS 图像传感器电子倍增系数减小，暗电流增加；当出现强点光源时，电子倍增系数急剧下降，暗电流也减小。

表1 电子轰击后 CMOS 图像传感器电子倍增系数及暗电流

S/N	bombard electrons/(nA·cm ⁻²)	bombardment duration/h	change rate of multiplication factor/%	dark current change rate/%
1	0.2	1	-0.3	0.6
2	2	1	-13.1	4.3
3	20	1	-18.5	10.4
4	200	0.5	-23.3	11.7
5	2000	0.005	-85.7	-40.0

1.3 电子轰击引起倍增系数衰减影响因素分析

为分析电子轰击引起 CMOS 图像传感器倍增系数和暗电流变化的内在原因，特利用 CASINO 软件对入射电子在钝化层内部的运动轨迹进行仿真研究，设置入射电子数量为 10 000 个，仿真结果如图 3 所示。

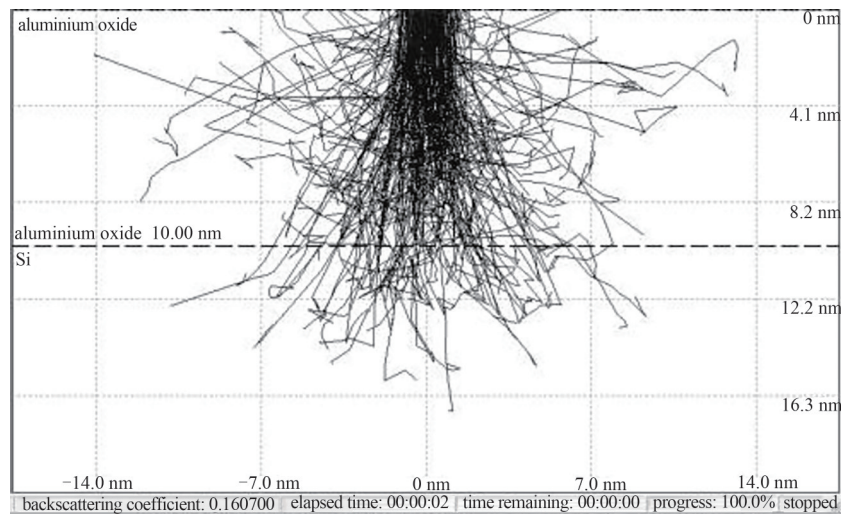


Fig.3 Simulation of electronic trajectory

图3 电子轨迹仿真

根据仿真结果，入射电子作用范围为氧化铝钝化层，以及 10 nm 的硅衬底。另外，高能电子轰击入射可能会产生 X 射线，其也是潜在的影响因素。通过理论分析，电子轰击硅衬底，以及潜在的 X 射线发射不是引起电子倍增系数和暗电流变化的主要因素，其核心因素为电子轰击引起钝化层变化。分析过程如下：

1) 电子轰击诱发 X 射线分析

高能电子轰击硅材料时，会产生软 X 射线，N E Howard 给出了电子轰击硅基材料时 X 射线发生率^[9]：

$$\eta_{x-ray} = 1.31 \times 10^{-5} (E_{beam} - 1.839)^{1.602} \quad (1)$$

式中： η_{x-ray} 为 X 射线产生几率； E_{beam} 为入射电子能量；

根据式(1)，只有入射电子能量超过 1.8 keV 时，才会产生软 X 射线。对于能量为 1.5 keV 左右的低能入射电子，非弹性散射中等离子体激发和单电子激发中的导带电子激发为主要机制^[12]。本实验设计入射电子能量为 1.5 keV 以内，小于 X 射线产生阈值，电子轰击主要是引起等离子体和单电子激发。

2) 电子轰击引起硅衬底变化

硅材料内部缺陷增加主要是由于位移损伤效应^[12]。在入射电子的轰击下，半导体晶格中的原子可能会因为受到撞击而离开晶格位置，在衬底中形成缺陷。晶格原子的位移阈值能量 E_d 描述晶体受辐照损伤的难易程度， E_d 取决于晶体结构/掺杂等情况。对于硅和锗等四面键合结构，Baierlein 和 Sigmund 给出了 $E_d=6\sim 16$ eV 的结果， E_d 的取值范围在 6~16 eV 之间^[13]。

入射电子能量为 1 keV 时，根据动量守恒，电子与硅原子碰撞后，向硅原子传递能量约为 0.1 eV，该值远小于晶格原子位移损伤的阈值能量。

2 电子轰击等效测试样品及实验测试

2.1 等效测试样品制备

为探究钝化层界面具体变化，模拟 APS 图像传感器钝化层制备工艺，基于 P 型硅完成测试样品制备。为保证测试样品结果对实际器件具有较好的指导价值，在进行样品制备时，选定 P 型硅掺杂浓度与 CMOS 图像传感器衬底浓度一致，为 10^{18} cm^{-3} 硼掺杂，钝化层选取氧化铝膜，厚度设计为 10 nm，样品结构示意图如图 4 所示。

2.2 样品测试分析

选用 KEYSIGHT B1505A 型半导体作为测试设备，频率为 3 MHz，测量结果如图 5 所示。其中 1# 样品对应未电子轰击样品，2# 样品为等效 5 lx 照度条件轰击后样品，3# 样品对应 10^{-3} lx 照度条件轰击 72 h 样品。由图 5 可见，2# 样品相对于 1# 样品曲线畸变，且左移；3# 样品相对于 1# 样品发生明显畸变，根据高频 $C-U$ 曲线位置和形状与钝化层电荷、界面缺陷对应关系，可估算出 3# 样品钝化层沉积正电荷，且界面态密度增加，2# 样品主要为界面缺陷增加。

为获得电子轰击引起钝化层内部变化的详细数据，本文基于理想高频 $C-U$ 曲线计算方法以及 Terman 法对界面缺陷和沉积电荷情况进行分析。

对于理想硅衬底的金属氧化物半导体(Metal Oxide Semiconductor, MOS)结构，硅衬底的电容为^[13]：

$$C_s = \frac{\epsilon_s}{L_D} \times \frac{\left\{ \left[-\exp\left(-\frac{qU_s}{kT}\right) + 1 \right] + \frac{n_0}{p_0} \left[-\exp\left(\frac{qU_s}{kT}\right) - 1 \right] \right\}}{F\left(\frac{qU_s}{kT}, \frac{n_0}{p_0}\right)} \quad (2)$$

式中： ϵ_s 为 P 型硅的介电常数； L_D 为德拜长度； U_s 为表面电势； k 为玻兹曼常数； T 为绝对温度； q 为电子电量； n_0 为少子浓度； p_0 为多子浓度。

$$F\left(\frac{qU_s}{kT}, \frac{n_0}{p_0}\right) = \left[\left(e^{-\frac{qU_s}{kT}} + \frac{qU_s}{kT} - 1 \right) + \frac{n_0}{p_0} \left(e^{\frac{qU_s}{kT}} - \frac{qU_s}{kT} - 1 \right) \right]^{1/2} \quad (3)$$

MOS 结构器件总的电容为：

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_s}} \quad (4)$$

式中 C_0 为钝化层电容。

根据式(2)~(4)，可求得样品理想高频 $C-U$ 曲线，如图 6 所示。

通过求解平带电压，获得 2# 样品平带电压为 -0.01 V ，3# 样品平带电压为 -0.07 V 。

根据 Term 法^[14]，对理想器件， C_s 随表面势的变化已知。从理想的 MOS 高频 $C-U$ 曲线，找出给定 C 下的 U_s ，然后从实验曲线上找出相应相同 C 的 U_s ，给出 U_s-U_G 曲线的一个点。对其他点重复此操作，直到形成满意的 U_s-U_G 曲线。从这个曲线确定界面陷阱密度：

$$D_{it} = \frac{C_0}{q} \left(\frac{dU_G}{dU_s} - 1 \right) - \frac{C_s}{q} = \frac{C_0}{q} \times \frac{d\Delta U_G}{dU_s} \quad (5)$$

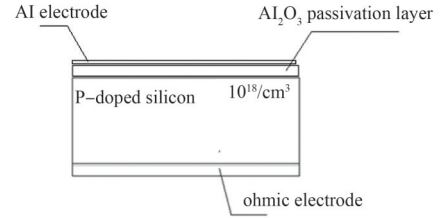


Fig.4 Schematic diagram of test samples
图4 测试样品示意图

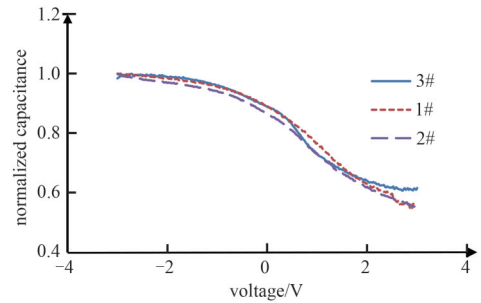


Fig.5 Measured $C-U$ curve and theoretical $C-U$ curve
图5 测试 $C-U$ 曲线与理论 $C-U$ 曲线

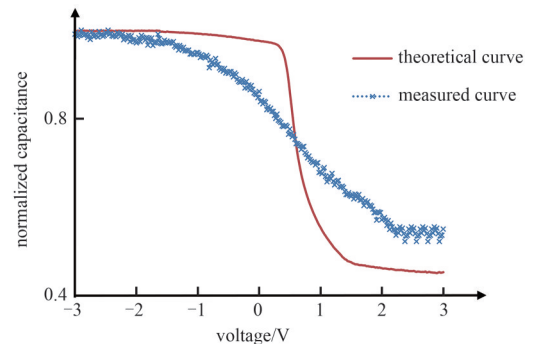


Fig.6 Measured $C-U$ curve and theoretical CV curve
图6 实测 $C-U$ 曲线与理论 $C-U$ 曲线

式中 U_G 为栅电压。

根据式(5), 得出 2 个样品界面缺陷密度分布趋势一致, 如图 7 所示。

2.3 界面缺陷及电荷沉积对 CMOS 图像传感器电子倍增特性影响

根据半导体载流子扩散、漂移模型, 电子的电流密度为^[13]:

$$J_n = J_{np} + J_{nk} = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx} \quad (6)$$

式中: J_{np} 为漂移电流; J_{nk} 为扩散电流; n 为载流子浓度; μ_n 为电子迁移速率; D_n 为电子扩散系数。

根据爱因斯坦关系式, μ_n 和 D_n 满足式(7)^[13-14]:

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{k_0 T}{q} \quad (7)$$

少子迁移率模型包含了晶格散射(Lattice Scattering)、杂质散射(Impurity Scattering)以及载流子之间的散射(Carrier-Carrier Scattering)的作用, 表达式为^[15]:

$$\mu_n = \mu_n^L \left[\frac{1.025}{1 + (S_{n,p}/1.68)^{1.43}} - 0.025 \right] \quad (8)$$

式中:

$$S_{n,p} = \sqrt{\frac{6\mu_{n,p}^L (\mu_n^L + \mu_n^{\text{CCS}})}{\mu_n^L \mu_n^{\text{CCS}}}} \quad (9)$$

晶格散射对迁移率的影响可以表示为:

$$\mu_n^L = \mu_n^0 (T/300)^{-a_n} \quad (10)$$

对于硅材料, $a_n=2.2$, $\mu_n^0=1\ 430\ \text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 。

杂质散射对迁移率的影响则为:

$$\mu_n^L = \frac{A_n T^{3/2}}{N} \left[\ln \left(1 + \frac{B_n^2}{N} \right) - \frac{B_n^2}{N + B_n^2} \right]^{-1} \quad (11)$$

式中: $A_n=4.61 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-1}/(\text{k}^{3/2} \cdot \text{V} \cdot \text{s})$; $B_n=1.52 \times 10^{15}\ \text{cm}^{-3/2}$; N 为有效掺杂浓度。

载流子之间的散射对迁移率的影响为:

$$\mu_n^{\text{CCS}} = \frac{2 \times 10^{17}}{\sqrt{pn}} T^{3/2} \left[\ln \left(1 + \frac{8.28 \times 10^8}{\sqrt[3]{pn}} T^2 \right) \right]^{-1} \quad (12)$$

将式(7)~(12)代入式(6), 可求得, 当表面势为正(即存在正电荷沉积), 且 $U_s \geq 0.04\ \text{V}$ 时, 对于表面掺杂浓度为 $10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ P 型硅, 势垒区宽度约为 6 nm。势垒区内部, 漂移大于扩散, 即势垒区电子无法输运至 P 型硅内部, 该结果与 5 lx 等效强点光源轰击后实验结果一致。

当表面势较小时($U_s < 0.04\ \text{V}$), 表层扩散大于漂移, 根据 Shockley-Read-Hall 理论, 因缺陷态引起的载流子产生率为:

$$U_i = n_i^2 \times v_{\text{th}} \sigma_n \sigma_p \times \left\{ \int_{E_v}^{E_c} \frac{D_A(E)}{\sigma_n(n+n_1) + \sigma_p(p+p_1)} dE + \int_{E_v}^{E_c} \frac{D_D(E)}{\sigma_p(n+n_1) + \sigma_n(p+p_1)} dE \right\} \quad (13)$$

式中: σ_n 为电子俘获截面; σ_p 为空穴俘获截面; v_{th} 为电子或空穴的热速度(假设这 2 个参数数值相同); $D_A(E)$ 、

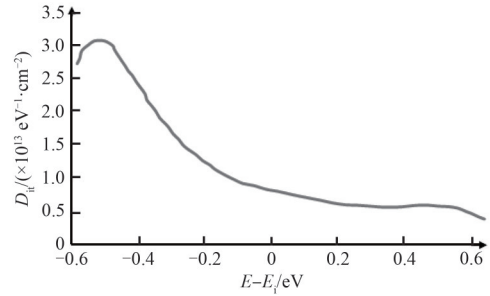


Fig.7 Interface defect increase curve caused by electron bombardment
图 7 电子轰击引起界面缺陷增加曲线

$D_D(E)$ 为施主和受主缺陷态密度； n_i 为本征载流子浓度； E_c 为导带能级； E_v 为价带能级。根据文献[15]，硅的(100)面， $\sigma_p=4.3\times 10^{-16}$ cm²， $\sigma_n=8.1\times 10^{-16}$ cm²， $v_{th}=10^7$ cm/s；硅的(111)面， $\sigma_p=2.2\times 10^{-16}$ cm²， $\sigma_n=5.9\times 10^{-16}$ cm²。本实验硅衬底为(100)面，故选择 $\sigma_p=4.3\times 10^{-16}$ cm²， $\sigma_n=8.1\times 10^{-16}$ cm²，初始缺陷态密度设置为 1×10^{12} cm⁻²。

表2 缺陷态密度对倍增系数和暗电流影响关系

Table2 Effect of defect density of states on multiplication coefficient and dark current

	defect density/($\times 10^{12}$ cm ⁻²)	change rate of multiplication factor/%	change rate of dark current/%
1	5	-0.5	1.0
2	10	-9.5	6.5
3	15	-21.5	15.1

表2为缺陷态密度对倍增系数和暗电流的影响关系。从表2可知，表面势垒较小(0.01 V)时，缺陷态密度增加，电子倍增系数减小，暗电流增加，该结果与表1趋势一致。根据上述计算，进一步验证了电子轰击引起界面缺陷态增加，以及电荷沉积是造成氧化铝钝化层先进摄影系统(Advanced Photo System, APS)图像传感器电子倍增系数、暗电流变化的内在原因。

3 结论

根据本文研究结果，对于氧化铝钝化层 CMOS 图像传感器，在能量为 1.5 keV 以内，电流为 4 nA 电子束长时间轰击后，钝化层与硅衬底界面缺陷态密度会增加。当电流增加至 2 μ A 时，不仅会使钝化层与硅衬底界面缺陷态密度增加，还会诱导产生正电荷积累，进而严重影响 APS 图像传感器的电子倍增特性。为保证氧化铝钝化层 APS 图像传感器具有较为稳定的电子倍增特性，需控制轰击 CMOS 图像传感器表面的电流值。

参考文献：

- [1] 姚立斌. 低照度 CMOS 图像传感器技术[J]. 红外技术, 2013,35(3):125-132. (YAO Libin. Low illuminance CMOS image sensor technology[J]. Infrared Technology, 2013,35(3):125-132.)
- [2] 田金生. 微光像传感器技术的最新进展[J]. 红外技术, 2013,35(9):527-534. (TIAN Jinsheng. The latest progress in extremely weak light image sensor technology[J]. Infrared Technology, 2013,35(9):527-534.)
- [3] SONG De,SHI Feng,LI Ye. Simulation of charge collection efficiency for EBAPS with uniformly doped substrate[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016,45(2):0203002. doi:10.3788/m0001820164502.203002.
- [4] ROBBINS M S,HADWEN B J. The noise performance of electron multiplying charge-coupled devices[J]. IEEE Transactions on electron Device, 2003,50(5):1227-1232. doi:10.1109/TED.2003.813462.
- [5] HIRVONEN L M,SUHLING K. Photon counting imaging with an electron-bombarded pixel image sensor[J]. Sensors, 2016, 16(5):617. doi:10.3390/s16050617.
- [6] NIKZAD S,YU Q M,AIME'E L S,et al. Direct detection and imaging of low-energy electrons with delta-doped charge-coupled devices[J]. Applied Physics Letters, 1998,73(23):3417-3419. doi:10.1063/1.122783.
- [7] 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):168-174. (LIU Hulin,WANG Xing,TIAN Jinshou,et al. High resolution electron bombarded complementary metal oxide semiconductor sensor for ultraviolet detection[J]. Acta Physica Sinica, 2018,67(1):168-174.) doi:10.7498/aps.67.20171729.
- [8] 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): 225-230. (QIAO Kai,WANG Shengkai,CHENG Hongchang,et al. Experimental study on the electron sensitivity of BCMOS sensor influenced by surface passivation film[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(4): 225-230.) doi: 10.3788/IRLA 202049.0418002.)
- [9] HOWARD N E. Development of techniques to characterize electron-bombarded charge-coupled devices[D]. Arizona: The University of Arizona, 2002.
- [10] 许蔚,杨杰,刘珉强. MEMS 加速度计微敏感结构的伽马辐照退化效应[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(10):1101-1106. (XU Wei,YANG Jie,LIU Minqiang. Gamma radiation induced degradation effect of MEMS capacitive accelerometer's micro-sensing part[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022,20(10):1101-1106.) doi: 10.11805/TKYDA2020548.
- [11] 朱小锋,许献国,刘珉强. 典型电子器件中子和总剂量辐照协同损伤研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(4):728-732. (ZHU Xiaofeng,XU Xianguo,LIU Minqiang. Neutron and γ -ray synergic radiation effect of typical electronic components[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(4):728-732.) doi:10.11805/TKYDA2019403.

- [12] SROUR R J, PALKO J W. Displacement damage effects in irradiated semiconductor devices[J]. Transactions on Nuclear Science, 2013,60(3):1740–1766. doi:10.1109/TNS.2013.2261316.
- [13] 赖祖武. 抗辐射电子学:辐射效应及加固原理[M]. 北京:国防工业出版社, 1998. (LAI Zuwu. Anti radiation electronics: radiation effects and reinforcement principles[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 1998.)
- [14] TERMAN L M. An investigation of surface states at a silicon/silicon oxide interface employing metal-oxide-silicon diodes[J]. Solid State Electronics, 1962(5):285–299. doi:10.1016/0038-1101(62)90111-9.
- [15] 刘恩科,朱秉升,罗晋生. 半导体物理学[M]. 北京:电子工业出版社, 2008. (LIU Enke, ZHU Bingsheng, LUO Jinsheng. Semiconductor physics[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2008.)

作者简介:

闫磊(1986–), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为微光夜视技术 .email:13572495775@163.com.

石峰(1968–), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为微光夜视技术.

程宏昌(1974–), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为微光夜视技术.

(上接第1387页)

- [7] 龚君,王丽,周涛. 基于改进电极敏感场的ECT图像重建算法研究[J]. 电子器件, 2021,44(2):393–398. (GONG Jun, WANG Li, ZHOU Tao. Research on image reconstruction algorithm of ECT based on improved 12-electrode sensitive field[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2021,44(2):393–398.) doi:10.3969/j.issn.1005-9490.2021.02.025.
- [8] 马敏,范广永,王涛. 基于ECT的占空比可调双阵列传感器设计[J]. 计量学报, 2019,40(6):1057–1063. (MA Min, FAN Guangyong, WANG Tao. Design of EGR adjustable dual array sensor based on ECT[J]. Acta Metrologica Sinica, 2019,40(6):1057–1063.) doi:10.3969/j.issn.1000-1158.2019.06.19.
- [9] 郑彩霞,王为叶. 一种基于Sigmoid函数的自动驾驶车辆运动规划方法[J]. 技术与市场, 2022,29(7):44–46. (ZHENG Caixia, WANG Weiye. Motion planning method of autonomous vehicle based on Sigmoid function[J]. Technology and Market, 2022,29(7):44–46.) doi:10.3969/j.issn.1006-8554.2022.07.012.
- [10] 马敏,于洁. 基于改进联合稀疏电容层析成像算法滑油监测研究[J]. 推进技术, 2022,43(4):340–346. (MA Min, YU Jie. Lubricating oil monitoring based on improved joint sparse electrical capacitance tomography algorithm[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022,43(4):340–346.) doi:10.13675/j.cnki.tjjs.201027.

作者简介:

周广明(1995–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为层析成像 .email:1192895834@qq.com.

王伊凡(1979–), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为层析成像检测技术、图像数据处理、数据分析与诊断等.