光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20241224001

EBCMOS电子倍增层信噪比的理论分析

王重霄，陈卫军*，宋　德*，梁荣轩，岳纪鹏，夏浩然，刘名杉
（长春理工大学 物理学院，长春 130022）

摘　要： 基于光子传输理论和电子与半导体相互作用理论，建立电子轰击互补金属氧化物半导体（EBCMOS）中电子倍增层的二次电子波动性引起的增益噪声形成机制模型。采用蒙特卡罗模拟方法，计算二次电子的信噪比，重点分析入射电子能量、钝化层种类与厚度、电子倍增层厚度与掺杂浓度等系统参数对增益噪声的影响。结果表明，使用Al_2O_3钝化层材料，并通过减薄钝化层厚度、降低掺杂浓度、减少电子倍增层厚度以及降低工作温度等一系列措施，能有效提高电子倍增层的信噪比使其达75.35 dB。本研究成果对EBCMOS电子倍增层的制备具有理论指导意义。

关键词： EBCMOS；信噪比；钝化层；电子倍增层；增益
中图分类号： TN302.5　**文章编号：** 1001－5868(2025)02－0209－07

Theoretical Analysis on Signal-to-Noise Ratio of Multiplication Layer in EBCMOS

WANG Chongxiao, CHEN Weijun, SONG De, LIANG Rongxuan, YUE Jipeng,
XIA Haoran, LIU Mingshan
(**School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, CHN**)

Abstract: Based on photon-transport theory and the theory of electron-semiconductor interactions, a model for the formation mechanism of gain noise caused by secondary electron fluctuations in the electron-multiplying layer of electron-bombarded complementary metal-oxide-semiconductor (EBCMOS) devices is established. By performing a Monte Carlo simulation, the signal-to-noise ratio (SNR) of secondary electrons is calculated to analyze the effect of system parameters, including incident electron energy, passivation-layer type and thickness, electron-multiplying layer thickness, and doping concentration, on gain noise. The results indicate that by using Al_2O_3 as the passivation-layer material and implementing a series of measures such as reducing the passivation-layer thickness, doping concentration, electron-multiplying layer thickness, and operating temperature, the SNR of the electron-multiplying layer can be effectively improved to 75.35 dB. The findings of this study provide theoretical guidance for preparing the electron-multiplying layer in EBCMOS devices.

Key words: EBCMOS; signal-to-noise ratio; passivation layer; electron-multiplication layer; gain

0　引言

在现代电子成像技术领域，电子轰击互补金属氧化物半导体（EBCMOS）作为一种在低光照条件下具有高灵敏度的成像器件，受到了广泛关注。特别是在夜视和低光照条件下的图像获取中，

收稿日期：2024－12－24.
基金项目：国家自然科学基金项目（U2141239）.
* **通信作者：**陈卫军；宋　德

EBCMOS发挥了至关重要的作用，被广泛应用于安防和科研等领域[1-5]。由于其具备体积小、灵敏度高、响应速度快、功耗低、抗辐射能力强等优势[6]，EBCMOS在超低照度成像中具有巨大的发展潜力，是目前微光成像器件研究的前沿方向之一。

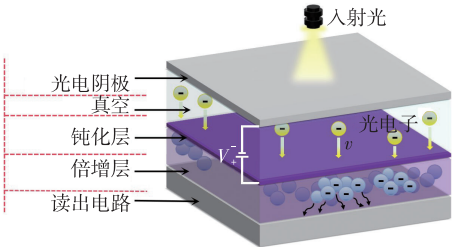
EBCMOS器件的核心工作原理基于高能光电子轰击传感器表面，产生二次电子，从而实现信号放大。然而，此过程不可避免地引入了多种噪声源，这些噪声源会影响成像质量，甚至可能导致信号失真，进而使目标识别困难。因此，如何在器件结构和材料特性方面进行有效优化，以提高信号采集效率、增益和信噪比，已成为提升EBCMOS器件成像性能的关键课题。然而，目前针对EBCMOS噪声特性方面的研究仍显不足。近年来，部分研究者开始针对EBCMOS的噪声特性和增益特性进行研究。2018年，刘虎林等成功研制紫外光响应的EBCMOS器件，实现了在40 mlx光照度下的高分辨率探测，使其在新的光谱范围内得到应用[7]。2019年，王生凯等对BSI-CMOS图像传感器进行了变温热处理实验，结果显示，当温度升高至325 ℃时，BSI-CMOS图像传感器的信噪比显著降低，同时固定模式噪声和随机噪声相较于未经热处理的传感器分别增加了672%和37%，表明信噪比的降低主要来源于固定模式噪声的增大[8]。2022年，严毅赟等设计了EBAPS的光谱响应测试系统，利用该系统获得了EBAPS器件在－800 V工作电压下的光谱响应曲线，器件的积分灵敏度为3.2×10^{8} $(\mathrm{s\cdot lm})^{-1}$，重复度为0.65%[9]。2023年，本课题组基于密度泛函理论研究了EBCMOS器件钝化层表面残气吸附的特性，结果表明Al_2O_3对残气分子表现出很好的抑制作用[10]，并且针对电子倍增层电离效应对增益的影响理论模型进行了修正，构建了电子轰击背减薄CMOS的拟合函数能量损失模型[11]。

综上所述，EBCMOS器件凭借高灵敏度、快速响应和低功耗，已成为微光成像领域的重要研究对象。然而，为满足夜视和安防应用中对高质量成像的需求，进一步研究其信噪比优化机制显得尤为重要。但国内研究在增益噪声的理论研究方面尚有欠缺。本文将基于电子与半导体相互作用理论，对电子倍增层结构进行优化改进，以提高成像质量，优化EBCMOS器件的信噪比。该研究有望为EBCMOS的噪声测试实验和原型器件制备提供理论支撑。

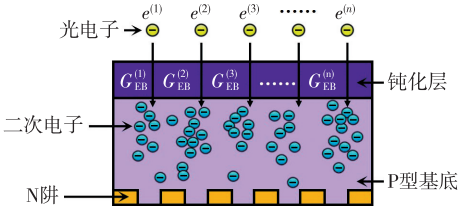
1 理论模型

EBCMOS器件结构如图1(a)所示，入射光子通过光电阴极进行光电转换，产生光电子，光电子在高压电场作用下加速轰击到CMOS图像传感器背面，产生大量倍增电子，形成电子轰击半导体增益，在此过程中会引入大量的增益噪声[12]。

在EBCMOS器件中，电子倍增层的增益噪声主要来源于电子轰击引发的二次电子在产生过程中的统计波动。当高能电子轰击半导体表面时，产生的次级电子具有随机的能量和方向，在扩散过程中，会导致电荷分布的扩散，引起信号模糊。此外，电荷扩散所导致的电荷分布不均匀会引发不同区域的增益波动。高能电子在半导体材料中传输时，由于与晶格原子的相互作用而失去能量，会导致电子能量分布不均匀，使部分区域信号增益降低，器件中的材料也可能存在一定的非均匀性和缺陷，这些因素均可导致增益发生波动从而引入增益噪声。图1(b)为电子轰击电子倍增层的局部放大图。



(a) EBCMOS原理图



(b) 电子轰击电子倍增层局部放大图

图1 EBCMOS原理图和电子轰击电子倍增层局部放大图

由于电子倍增过程具有随机性，任何一个电子都会被一个增益因子G_{EB}^{i}单独放大[13]，所以得到的总电荷增益也是不确定的，但增益的平均值G_{EB}是可以确定的，计算公式可描述为：

$$G_{EB}=\varepsilon\frac{E-E_{dead}}{w} \tag{1}$$

式中，ε为电荷收集效率；E是入射光电子能量；E_{dead}为电子经过钝化层时损失的能量；w为产生入射电

子一个电子空穴对所消耗的能量，Si材料的w为3.6 eV[14-15]。

当入射电子进入到CMOS图像传感器芯片中运动时，其运动规律具有随机性，在倍增层中的运动状态不能确定，需运用Monte Carlo统计学方法[16]模拟电子在CMOS图像传感器芯片中的运动过程。当电子轰击CMOS表面的钝化层时，电子与固体相互作用可能发生弹性散射和非弹性散射，弹性散射需要考虑方向改变对电子运动轨迹的影响，非弹性散射需要考虑碰撞过程中的电子能量损失。钝化层中通常包含两种原子，可利用Monte Carlo中的抽样法来区别与电子发生作用的原子，通过单位体积内总散射截面可以算出电子与各个原子发生碰撞的概率。从而计算出第y次散射结束后电子的剩余能量，即：

$$E_{y+1}=E_y-\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}s}\Big|_{E_y}\cdot\Delta_y \tag{2}$$

式中，Δ_y表示第y次电子散射后的散射步长，E_y是第y次散射后电子剩余的能量，$-\mathrm{d}E/\mathrm{d}s$表示阻止本领（SP），也称能量损失率。对于阻止本领，本课题组使用拟合函数SP方程[17]，即：

$$-\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}s}=\frac{F(Z)G(E)}{\lambda_{\mathrm{in}}} \tag{3}$$

式中，λ_{in}是非弹性散射平均自由程，Z是原子数，E是入射电子能量，$F(Z)=AZ+B$，$G(E)=C\ln E+D$。其中，A，B，C和D是通过绘制27种元素的电子能量与阻止本领和非弹性散射平均自由程的曲线图拟合所得。$c_1=BC$，$c_2=A_1/B$，$c_3=\exp(D/C)$[17]。

假设有n个初始电子入射到CMOS钝化层，每个电子在增益因子$G_{\mathrm{EB}}^{(i)}$的作用下被放大。输出的总信号S_{out}可以表示为所有增益后的电子总数之和，其表达式为：

$$S_{\mathrm{out}}=\sum_{i}^{n}G_{\mathrm{EB}}^{(i)} \tag{4}$$

输出信号的均值可以通过每个电子增益因子的期望值来计算，输出信号的方差则反映了信号的波动情况，输出信号的平均值和方差分别为：

$$\mu_{S_{\mathrm{out}}}=nG_{\mathrm{EB}} \tag{5}$$

$$\sigma_{S_{\mathrm{out}}}^2=G_{\mathrm{EB}}^2n+n\sigma_{G_{\mathrm{EB}}}^2 \tag{6}$$

式中，$\sigma_{G_{\mathrm{EB}}}^2$表示具有平均单光电子增益的EBS增益过程的方差。Aebi和Costello采用Fano因子（F）对EBS增益过程的噪声统计进行表示[18]。具有平均单光电子增益的EBS增益过程的方差$\sigma_{G_{\mathrm{EB}}}^2=FG_{\mathrm{EB}}$，硅的Fano因子为0.119±0.002。

在EBCMOS中，点扩散函数（PSF）对噪声的影响显著[19-20]。当电子轰击CMOS传感器背面时，将产生多个次级电子，这些电子在向像素中的光电二极管扩散时会产生一定的空间分离。电子的这种空间分离会使噪声分散到多个像素上，减少单一像素所承受的噪声。这一效应影响电子倍增阶段的方差，会使得在传感器上测量到的总噪声减小。修正因子β_{EB}考虑了点扩散函数对噪声分布的影响，能够更准确地反映实际的噪声情况。因此，使用因子β_{EB}对输出信号的方差进行修正，对于标准差为σ，像素宽度为p的修正因子β_{EB}可表示为：

$$\beta_{\mathrm{EB}}=\left[\mathrm{erf}\left(\frac{p}{2\sigma}\right)-\frac{1}{\sqrt{\pi}}\frac{2\sigma}{p}\left(1-e^{-\left(\frac{p}{2\sigma}\right)^2}\right)\right]^2 \tag{7}$$

修正后的方差可以表示为：

$$\sigma_{S_{\mathrm{out}}}^2=\beta_{\mathrm{EB}}(G_{\mathrm{EB}}^2n+nFG_{\mathrm{EB}}) \tag{8}$$

最终，EBCMOS电子倍增层的信噪比计算公式可以表示为：

$$SNR=\sqrt{\frac{n}{\beta_{\mathrm{EB}}\left(1+\frac{F}{G_{\mathrm{EB}}}\right)}} \tag{9}$$

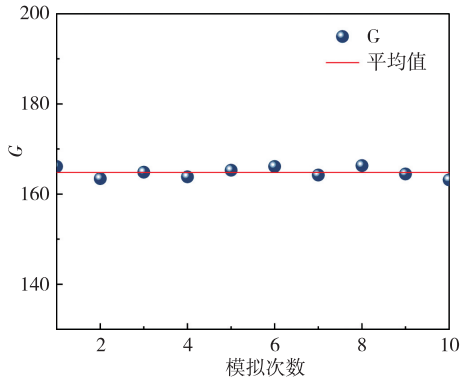
2　结果与讨论

2.1　入射电子能量及温度对*SNR*的影响

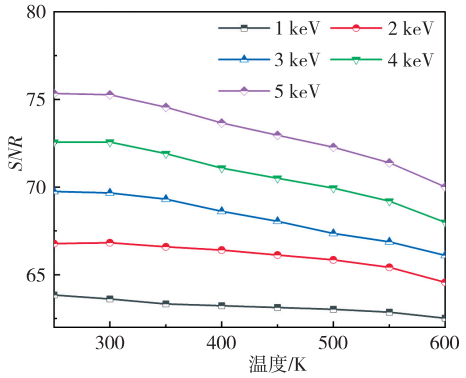
首先，分析入射电子能量及温度对信噪比的影响，设定光照度为0.01 lx，光阴极转换效率为25%，入射电子直径为1 000 nm，像素尺寸为10 μm×10 μm，选取Al_2O_3作为钝化层材料，钝化层厚度为5 nm，P型衬底掺杂浓度为1×10^{15} cm^{-3}，当电子倍增层厚度为5 μm时，对比了不同入射电子能量在温度逐渐升高时对*SNR*的影响。

图2（a）是在入射电子能量为2 keV，温度为300 K，并且其他模拟条件都相同的情况下，经10次模拟所得出的增益值，可以发现增益值存在一定的波动性。图2（b）是当入射电子能量分别为1，2，3，4，5 keV，温度从250 K逐渐升高至600 K时，*SNR*的变化曲线。从图中可明显看出，随着温度的逐渐升高，*SNR*呈现明显下降趋势，且下降速率较快。具体来说，当入射电子能量为1 keV时，250 K温度下所对应的*SNR*为63.84 dB，升高温度至600 K，*SNR*下降为62.52 dB；在入射电子能量为2 keV

时，250 K温度下所对应的*SNR*为66.78 dB，升高温度至600 K，*SNR*降为64.57 dB；当入射电子能量为3 keV时，250 K温度下所对应的*SNR*为69.75 dB，升高温度至600 K，*SNR*下降为66.11 dB；当入射电子能量为4 keV时，250 K温度下对应的*SNR*为72.56 dB，升高温度至600 K，*SNR*下降为67.99 dB；当入射电子能量为5 keV时，250 K温度下所对应的*SNR*为75.35 dB，升高温度至600 K，*SNR*下降为70.01 dB。



（a）增益的波动



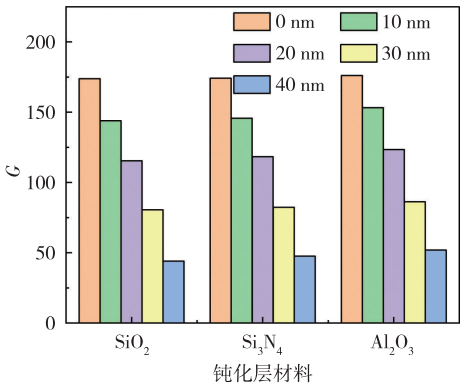
（b）不同入射电子能量的*SNR*随温度的变化

图2 增益波动和不同入射电子能量随温度变化的*SNR*

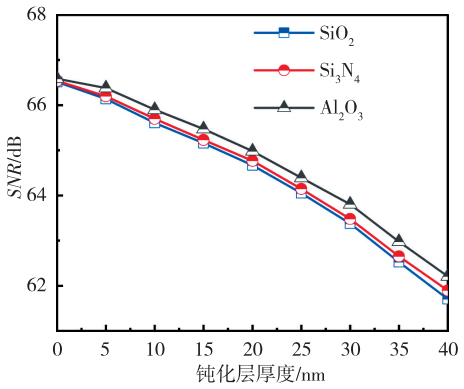
这种下降主要是由于高温环境下电子的迁移率降低，电子在倍增层内的传输效率下降。此外，温度升高会加剧电子和晶格的散射效应，使得电子损失增多，进一步影响器件增益和信号强度。另一方面，图中还显示出随着入射电子能量的增大，*SNR*明显提升，在300 K温度下，当入射电子能量从1 keV增加到5 keV时，*SNR*从63.84 dB升高到75.35 dB，这一趋势表明入射电子能量对*SNR*有着极其显著的影响。更高的入射电子能量增加了入射电子的初始动能，使得在倍增层内发生的电子碰撞更加剧烈，从而产生更多的次级电子，增强了信号强度并提高了*SNR*。特别是在高入射电子能量下，*SNR*降低更加明显，表明温度的增加对器件性能的负面影响不可忽视。因此，在EBCMOS器件的实际应用中，尽可能提高入射电子能量有助于显著增强*SNR*，而控制工作温度在适当范围内能够有效避免高温带来的迁移率下降和信号损失。

2.2 钝化层对*SNR*的影响

分析钝化层的材料及厚度对信噪比的影响，设定光照度为0.01 lx，光阴极转换效率为25%，入射电子能量为2 keV，入射电子直径为1 000 nm，像素尺寸为10 μm×10 μm，P型衬底掺杂浓度为1×10^{15} cm^{-3}，电子倍增层厚度为5 μm，工作温度为300 K。在此条件下，模拟计算了不同的钝化层材料（Al_2O_3，Si_3N_4，SiO_2）在钝化层厚度不断增加时的增益和信噪比，结果如图3（a）和（b）所示。



（a）不同厚度钝化层材料下的增益



（b）不同钝化层材料的*SNR*随钝化层厚度的变化

图3 不同厚度钝化层材料下的增益和*SNR*

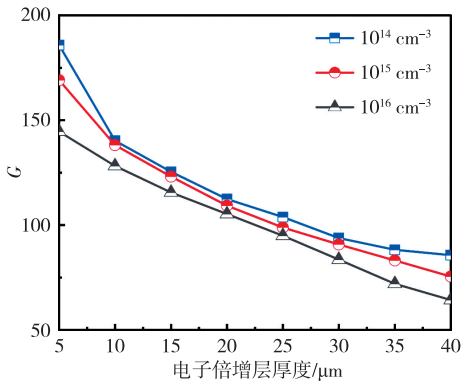
图3（a）展示了在无钝化层以及三种钝化层材料在厚度为10，20，30和40 nm时的增益，图3（b）展示了当钝化层厚度从0 nm逐渐增加至40 nm时，三种材料下的*SNR*变化趋势。可以发现，随着钝化层厚度的增大，不论使用哪种钝化层材料，增益和信噪比都随之降低，这说明钝化层的厚度对*SNR*有显

著的影响。具体来看，当 Al_2O_3 钝化层厚度从 0 nm 增加到 40 nm，*SNR* 从 66.58 dB 减小到 62.21 dB；当 Si_3N_4 钝化层厚度从 0 nm 增加到 40 nm 时，*SNR* 从 66.54 dB 减小到 61.89 dB；当 SiO_2 钝化层厚度从 0 nm 增加到 40 nm，*SNR* 从 66.52 dB 减小到 61.71 dB。*SNR* 随钝化层厚度下降的趋势，主要由于钝化层厚度的增加会使得发生在钝化层中的电离效应增强，电子能量损失加剧，进而降低了器件增益和信噪比。

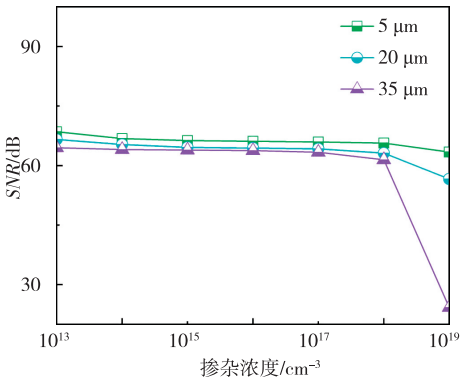
从材料角度分析，在相同的厚度条件下，不同钝化层材料对 *SNR* 的影响也有差异。具体表现为 Al_2O_3 作为钝化层材料对 *SNR* 的提升效果最佳，其次是 Si_3N_4，最后是 SiO_2。从图中也可看出，随着钝化层厚度的增加，Al_2O_3 材料相较于另两种材料的优势逐渐增加。从材料的密度来看，Al_2O_3＞Si_3N_4＞SiO_2，可以推断钝化层的密度可能是影响 *SNR* 的一个重要因素，较高密度的钝化材料（如 Al_2O_3）能够有效抑制电子的散射损失，从而提高 *SNR*。通过这些结果可以推断出，选择 Al_2O_3 作为钝化层材料并尽可能减薄钝化层的厚度有利于提高信噪比，对于提升 EBCMOS 器件的性能至关重要。

2.3　电子倍增层对 *SNR* 的影响

分析电子倍增层的厚度和掺杂浓度对信噪比的影响，设定光照度为 0.01 lx，光阴极转换效率固定在 25%，入射电子能量为 2 keV，入射电子直径为 1 000 nm，像素尺寸为 10 μm×10 μm，选取 Al_2O_3 作为钝化层材料，钝化层厚度为 5 nm，工作温度为 300 K。在此条件下，模拟计算了当掺杂浓度不同时，电子倍增层增益随电子倍增层厚度增加的变化曲线，结果如图 4(a)所示，并且对比了不同的电子倍增层厚度在掺杂浓度逐渐增加时对 *SNR* 的影响，结果如图 4(b)所示。



(a) 不同掺杂浓度的增益随电子倍增层厚度的变化



(b) 不同电子倍增层厚度 *SNR* 随掺杂浓度的变化

图 4　不同电子倍增层厚度及掺杂浓度下的增益和 *SNR*

图 4(a)为当 P 型衬底掺杂浓度分别为 1×10^{14}，1×10^{15}，1×10^{16} cm^{-3}，电子倍增层厚度从 5 μm 逐渐增加至 40 μm 时电子倍增层增益的变化趋势。在模拟过程中，电子倍增层的初始厚度设置为 5 μm，这是由于在 EBCMOS 器件结构中，电子倍增层是必不可少的组成部分，并且其厚度需要达到一定的值，才能确保倍增效应的有效发生。图 4(b)展示了当电子倍增层厚度为 5，20，35 μm，掺杂浓度从 1×10^{13} cm^{-3} 增加至 1×10^{19} cm^{-3} 时的信噪比。可以看出，电子倍增层增益随着电子倍增层厚度的增加而不断降低，在厚度较薄时下降速率偏高，而后逐渐降低。随着掺杂浓度的不断升高，信噪比相对平缓，直到掺杂浓度增加到 1×10^{19} cm^{-3}，信噪比骤然降低。这是由于较高的掺杂浓度会加速少数载流子的复合过程，使得少子寿命缩短，增益下降，进而也会使信噪比降低。相反，掺杂浓度越低，少数载流子的复合速率减小，少子寿命延长，进而有助于提升 *SNR*。并且发现电子倍增层厚度越薄，*SNR* 越高，这种趋势在不同掺杂浓度下的表现均较为一致。这是由于电子倍增层厚度的增加，会导致电子在传输过程中的复合概率增大，使得收集到的电子减小，进而导致 *SNR* 的降低。因此，降低基底的掺杂浓度并减薄电子倍增层的厚度，是提升 EBCMOS 器件性能的有效方式。

3　结论

从材料选择、结构优化和环境等多方面对 EBCMOS 图像传感器的信噪比特性进行理论研究，入射电子能量，工作温度，钝化层的材料及厚度、掺杂浓度和电子倍增层厚度等参数对信噪比的影响至关重要。首先，入射电子的能量和器件的工

作温度对*SNR*有显著影响。因此,在实际应用中,控制EBCMOS器件的工作温度尤为重要。通过加强散热设计和优化工作电压,可以维持EBCMOS器件的高信噪比。

其次,钝化层材料的选择对于抑制界面缺陷和降低表面复合电流起着关键作用。在不同的钝化材料中,Al_2O_3钝化层在高信噪比的条件下更具优势,Si_3N_4和SiO_2相对较差。此外,在实际器件设计中,尽可能减薄Al_2O_3钝化层的厚度,可以提供高增益,从而进一步提升*SNR*。

最后,P型基底的掺杂浓度和电子倍增层的厚度会对EBCMOS的*SNR*产生一定影响。降低P型基底的掺杂浓度有助于降低器件的噪声水平,这是因为较低的掺杂浓度会减少载流子的复合,从而提高增益和信噪比。同时,电子倍增层的厚度也是影响增益和噪声的关键因素,电子倍增层过厚会导致电子寿命降低,从而导致增益和信噪比的下降。

综上所述,EBCMOS器件的设计需要综合考虑钝化层材料、基底掺杂浓度、倍增层厚度以及工作温度等因素。通过优化这些参数,可以显著提高器件的信噪比,从而实现高性能的电子轰击成像应用。这些研究结果为未来EBCMOS技术的进一步发展提供了重要的理论依据和实践指导。

参考文献:

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

[2] Dominjon A, Ageron M, Barbier R, et al. An EBCMOS camera system for marine bioluminescence observation: the LuSEApher prototype[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2012, 695: 172-178.

[3] Barbier R, Depasse P, Baudot J, et al. First results from the development of a new generation of hybrid photon detector: EBCMOS[C]// Astroparticle, Particle and Space Physics, Detectors and Medical Physics Applications, 2008: 23-27.

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

[5] Pisecny P, Husekova K, Frohlich K, et al. Growth of lanthanum oxide films for application as a gate dielectric in CMOS technology[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2004, 7(4-6): 231-236.

[6] 徐鹏霄, 唐光华, 唐家业, 等. EBCMOS混合型光电探测器研究[J]. 光电子技术, 2016, 36(4): 232.
Xu Pengxiao, Tang Guanghua, Tang Jiaye, et al. Review of EBCMOS hybrid photodetector [J]. Optoelectronic Technology, 2016, 36(4): 232.

[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): 175-180.
Liu Hulin, 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.

[8] 王生凯, 靳 川, 乔 凯, 等. 热处理对背照式CMOS传感器信噪比影响的实验研究[J]. 红外技术, 2019, 41(6): 585-590.
Wang Shengkai, Jin Chuan, Qiao Kai, et al. Impact of annealing temperature on SNR in backside-illuminated CMOS image sensor: An experimental study [J]. Infrared Technology, 2019, 41(6): 585-590.

[9] 严毅赟, 钱芸生, 张景智, 等. 电子轰击有源像素传感器光谱响应测试系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(13): 1304001.
Yan Yiyun, Qian Yunsheng, Zhang Jingzhi, et al. Design of spectral response test system for electron bombardment active pixel sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(13): 1304001.

[10] 李书涵, 陈文娥, 王重霄, 等. EBCMOS钝化层表面残气吸附特性[J]. 半导体光电, 2023, 44(6): 901-906.
Li Shuhan, Chen Wen'e, Wang Chongxiao, et al. Residual gas absorption characteristics on the surface of EBCMOS passivation layer[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(6): 901-906.

[11] 陈文娥, 陈卫军, 宋 德, 等. 电离效应对EBCMOS中电子倍增层增益的影响研究[J]. 半导体光电, 2024, 45(2): 222-227.
Chen Wen'e, Chen Weijun, Song De, et al. Influence of ionization effect on gain of electron multiplying layer in EBCMOS [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(2): 222-227.

[12] 刘广荣, 左 昉, 周立伟, 等. EBCCD的增益及信噪比研究[J]. 光学技术, 2002, 28(2): 120-122.
Liu Guangrong, Zuo Fang, Zhou Liwei, et al. Research of gain and SNR of EBCCD[J]. Optical Technique, 2002, 28(2): 120-122.

[13] 陈 晨, 许武军, 翁东山, 等. 电子倍增CCD噪声来源和信噪比分析[J]. 红外技术, 2007, 29(11): 634-637.
Chen Chen, Xu Wujun, Weng Dongshan, et al. The noise sources and SNR analysis of electronic multiplying CCD[J]. Infrared Technology, 2007, 29(11): 634-637.

[14] Hirvonen L M, Barber M J, Suhling K. Photon counting imaging and centroiding with an electron-bombarded CCD using single molecule localisation software [J]. Nuclear

Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016, 820: 121-125.

[15] Fiebiger J R, Muller R S. Pair-production energies in silicon and germanium bombarded with low-energy electrons [J]. Journal of Applied Physics, 1972, 43(7): 3202-3207.

[16] Shimizu R, Kataoka Y, Ikuta T, et al. A Monte Carlo approach to the direct simulation of electron penetration in solids [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1976, 9(1): 101-113.

[17] Chen W, Chen W, Song D, et al. A universal gain theory of the multiplying layer in EBCMOS based on elastic and inelastic scattering [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2024, 551: 165352.

[18] Aebi V, Costello K. Electron Bombarded Semiconductor Image Sensors [M]. Berlin: Springer, 2024.

[19] Jansson P A. Deconvolution of Images and Spectra (2nd Ed.) [M]. Orlando: Academic Press, 2015

[20] Miora R H D, Rohwer E, Kielhorn M, et al. Calculating point spread functions: Methods, pitfalls, and solutions [J]. Optics Express, 2023, 32(16): 27278-27302.

作者简介：

王重霄(1999—),女,硕士生,主要从事EBCMOS器件稳定性的研究;

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

宋　德(1981—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光电成像器件、有机太阳能电池等方面的研究。