

# Research on Electron Bombardment CMOS Chip Thinning Process

Longhua Wang De Song\*

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin, 130022, China

## Abstract

This study employed a combined approach of wet etching and dry etching to prepare electron-bombarded CMOS chips. It was demonstrated that wet etching effectively removes the chip's glass packaging and surface microlens layers, while dry etching successfully removes the passivation layer. Both methods passed integrity verification, confirming no damage to the chip's imaging functionality. Electron bombardment experiments revealed the emergence of electron gain at an electric field voltage of 1000V. At 2000V, a collection efficiency of 33% was achieved, along with a gray value gain of 100. The experimental data for collection efficiency and gray value gain exhibited good consistency with simulation results, validating the rationality of the electron collection efficiency model. This research provides essential support for the design of EB-CMOS imaging devices.

## Keywords

EBCMOS; Wet Etching; Dry Etching; Electron Bombardment; Charge collection efficiency

# 电子轰击 CMOS 芯片减薄工艺研究

王龙华 宋德\*

长春理工大学物理学院, 中国 · 吉林 长春 130022

## 摘要

采用湿法刻蚀与干法刻蚀相结合的方法, 对 CMOS 芯片进行刻蚀制备电子轰击 CMOS 芯片。研究证明, 湿法腐蚀可以很好的去除芯片的玻璃封装和表面微透镜层, 干法刻蚀可以去除芯片的钝化层。并且都能通过完好性检测的验证, 不损伤芯片成像功能。通过电子轰击实验, 在电场电压为 1000V 出现电子增益, 电场电压 2000V 时收集效率达到 33%, 灰度值增益达到 100, 且收集效率和灰度值增益数据实验与模拟数据表现一致, 证明了电子收集效率模型合理性。本研究将为 EBCMOS 成像器件的设计提供支撑。

## 关键词

EBCMOS; 湿法腐蚀; 干法刻蚀; 电子轰击; 电荷收集效率

## 1 引言

EBCMOS (电子轰击互补金属氧化物半导体) 是一种真空固体混合型微光成像传感器<sup>[1]</sup>, 结合光阴极、真空腔体、背减薄 CMOS 器件及读出电路, 通过高压电场加速光电子产生倍增效应, 读出电路直接成像。该器件具有高增益、高分辨率、低噪声以及超低照度下无须制冷等优点, 主要用于便携式和机载军用夜视设备中, 是数字化微光成像器件的一

个重要发展方向<sup>[2-4]</sup>, 在单光子探测、天文探测和生物成像等领域具有广阔的应用前景。

2018 年, 刘虎林<sup>[5]</sup>等使用 100nm 厚氧化铝钝化层背减薄 CMOS 芯片制备了一种紫外响应 EBCMOS, 可以在 40lx 光照亮度下实现 25lp/mm 的分辨率。2022 年, 微光夜视技术重点实验室的李桐桐等人<sup>[6]</sup>通过分析 EBCMOS 器件真空度下降的原因, 提出了一种改善和维护器件内部真空度的手段。通过搭建超高真空除气系统, 研究 CMOS 的放气特性, 根据研究结果得到最优的除气工艺参数。同年王学宁<sup>[7]</sup>研究了背部轰击 CMOS (BSB-CMOS) 表面附近的背散射电子特性, 研究了钝化层和入射电子能量对背散射电子角分布的影响等。2023 年本课题组对 65  $\mu\text{m}$  的电子倍增层进行了增益的测试, 结果证明了电子倍增层的增益随着入射电子能量的增大而增加<sup>[8]</sup>。

2024 年南京电子器件研究所研制了 130 万像素数字化微光 EBAPS 器件<sup>[9]</sup>, 兼具真空光电器件的低暗发射、高增

【基金项目】国家自然科学基金 (U2141239)、国家自然科学基金 (12274041)

【作者简介】王龙华 (2000-), 男, 硕士, 从事 EBCMOS 增益测试的研究。

【通讯作者】宋德 (1981-), 男, 博士, 副教授, 研究生导师, 从事光电成像器件方面的研究。

益特性与 CMOS 图像传感器的高集成度、数字化输出,适用于极低照度 ( $10^{-5}\text{lx}$ ) 探测。周潮虹等通过驱动 EBAPS 器件<sup>[10]</sup>,利用 USB 接口将采集的数据传输至上位机进行图像分析,在照度为  $2 \times 10^{-2}\text{lx}$  的狭缝靶标处 EBAPS 的 MTF 先升后降,外加  $-1000\text{V}$  时达到最大值。吕蒙等<sup>[11]</sup>研究了电子轰击互补金属氧化物半导体中背部减薄结构下表面附近的背散射电子特性。结果表明,增加钝化层的密度有助于减小弹性碰撞的平均散射步长、入射深度和弹性散射半径。何欣悦等人<sup>[12]</sup>通过模拟分析,研究了钝化层材料、钝化层厚度、入射电子能量以及基底温度对噪声特性的影响。证明了在提升信噪比的结构设计过程中,应优先考虑优化钝化层的结构。

国内外目前对 EBCMOS 器件中 CMOS 芯片钝化层减薄工艺研究较少,本实验将采用湿法腐蚀和干法刻蚀的相结合的方法研究背照式 CMOS 芯片减薄工艺。

## 2 实验

### 2.1 实验器件选择

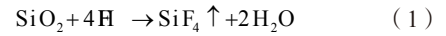
本实验采用的芯片为索尼 IMX183 芯片,该芯片具有体积小、像素高、像素尺寸大等优点,非常适合用于制备 EBCMOS 器件。测试系统包括汞灯、真空腔室、金阴极、背照式 CMOS 图像传感器以及数据采集电路。该系统能够有效地支持电子轰击实验和数据的采集处理,为验证芯片性能提供了可靠的实验平台。

### 2.2 实验方法

半导体制造中有两种基本的刻蚀工艺干法刻蚀和湿法刻蚀,干法腐蚀和湿法腐蚀各有优缺点。干法腐蚀精度高、方向性强,适用于纳米级刻蚀和复杂材料,但设备复杂、成本高,且腐蚀速度较慢。湿法腐蚀的腐蚀速度快、设备简单且成本低,但方向性差、容易污染,不适用于所有材料,且对某些敏感材料可能造成损伤。

在 CMOS 芯片减薄工艺中,玻璃封装和微透镜层的厚度较大,因而需要使用湿法腐蚀进行处理,本文选择氢氟酸溶液作为湿法腐蚀的腐蚀液。玻璃封装和微透镜层需要完全去除,因此湿法腐蚀能够很好地满足需求。干法刻蚀尽管具有较高的精度,但由于刻蚀速率较慢,难以完成对玻璃封装和微透镜层的去除。对于钝化层的处理,CMOS 芯片的钝化层厚度通常非常薄,通常在纳米级别,湿法腐蚀方向性差且不易控制,而干法刻蚀能够很好地满足需求。干法刻蚀较低的刻蚀速率有助于精确控制刻蚀精度,且其各向同性的特性使得芯片表面能够达到较高的均匀性。

芯片的最外层为石英玻璃封装,用于在保护芯片内部的电路和元件。要实现 CMOS 芯片背部钝化层的减薄,需要去除石英玻璃封装。选择 40% 浓度的氢氟酸溶液,并将其与去离子水按 1:10 的比例混合配置为实验用腐蚀液。氢氟酸与玻璃封装中的二氧化硅反应,其反应方程式可以表示为:



CMOS 芯片表面的微透镜是为提升图像传感器光学性能而设计的微型透镜,主要用于增强光收集效率,改善低光环境下的成像能力。微透镜层的主要成分为二氧化硅,氢氟酸溶液依然可以作为其腐蚀液。

钝化层的减薄采用干法刻蚀技术,使用的设备为 ICP-98A 型感应耦合等离子体刻蚀机。在刻蚀过程中,腔室内的压强保持为 1 Pa,刻蚀气体采用  $\text{SF}_6$  和  $\text{O}_2$  的混合气体,气流量分别为 40 sccm 和 5 sccm。激励电源功率设置为 300 W,偏压电源功率为 50 W,刻蚀时间为 10 秒。

## 3 结果与分析

### 3.1 石英玻璃封装去除

图 1 为去玻璃封装后 CMOS 芯片的照片,去掉传感器的玻璃封装,芯片的内部结构显露出来。CMOS 图像传感器的像素区通过金键合线与各引脚相连接,被封装在陶瓷底座上。

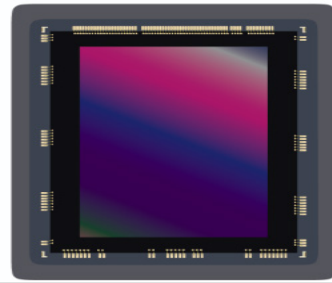


图 1 去除玻璃封装后的 CMOS 芯片

去除玻璃封装后,对芯片进行完整性检测。采集电路获取到的成像画面显示正常,证明腐蚀过程没有对芯片的成像功能造成影响。

### 3.2 微透镜层去除

芯片表面存在着一层渐变色彩薄膜,这是芯片微透镜层,在不同的角度下,由于光学涂层的干涉效应、微透镜表面的不规则性或光线的人射角度差异,导致呈现出不一样的色彩。

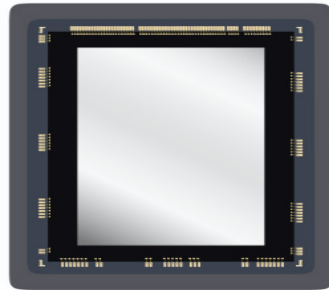


图 2 去除玻璃封装的芯片

图 2 为去除微透镜层后的芯片图片,在去掉微透镜层后,芯片表面的渐变色彩消失,成为一个光亮的镜面。对芯片进行测试,结果表明湿法腐蚀未对芯片的成像功能产生不良影响。

### 3.3 钝化层去除

去除钝化层后的芯片外观没有明显变化,但芯片成像出现持续高亮度的状态,原因是钝化层的去除导致芯片表面界面态的变化,从而引发较大的噪声电流。

因为衬底成分为硅,将芯片静置一段时间,利用空气中的氧气产生氧化反应将硅衬底表面氧化,形成一层二氧化硅氧化膜。这一层氧化膜起到钝化层的作用,逐渐消除芯片表面态引起的噪声电流恢复成像。

### 3.4 电荷收集效率研究

模拟数据使用本课题组的电荷收集效率仿真模型<sup>[8]</sup>,模拟实验参数中的电荷收集效率和增益大小。

CMOS 衬底厚度和掺杂浓度未知,暂且假设 P 型衬底厚度为 10 μm,衬底掺杂浓度为 10<sup>15</sup> atom/cm<sup>3</sup>。电子轰击的灰度值增益在 1000V 开始出现,钝化层厚度估算为 17nm,钝化层类型为二氧化硅。入射电子能量分别为 500eV、750eV、1000eV、1250eV、1500eV、1750eV 和 2000eV,模拟在不同入射电子能量下的电荷收集效率和电子轰击增益。

$$G = \frac{\varepsilon(E_0 - E_{Dead})}{W} \quad (2)$$

$E_0$  是入射电子的初能,  $E_{Dead}$  是电子通过钝化层(或死层)所消耗的能量,  $W$  半导体轰击过程中形成电子-空穴对所需要的能量(Si 大约为 3.6eV、砷化镓对应的能量消耗为 4.4eV)。 $\varepsilon$  是电荷收集效率。

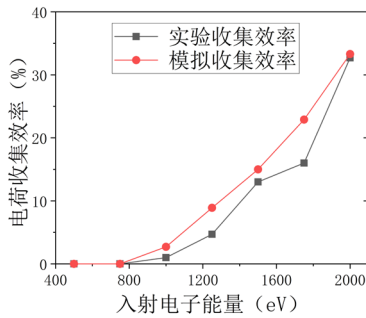


图 3 电荷收集效率与入射电子能量的关系

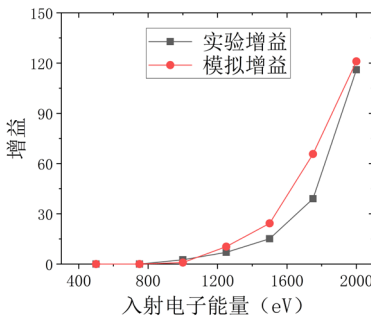


图 4 增益与入射电子能量的关系

图 3 和 4 展示了实验与模拟的电荷收集效率和增益的对比。通过对实验条件的模拟结果,发现电子轰击实验中的数据与模拟数据的收集效率和增益增长趋势上基本一致。随

着入射电子能量的增加,器件的增益和电荷收集效率都表现出显著提升。当入射电子能量达到 2000 eV 时,电荷收集效率可达到 33%,增益则可达 116。随着入射电子能量的增加,倍增层产生的二次电子数量也随之增加。而在倍增电子运动到 N 阱的过程中,被复合消耗的电子比例逐渐减少,更多的二次电子被收集电路有效捕捉。由此,器件的电荷收集效率不断增加,进一步验证了模拟与实验数据之间的一致性。

## 4 结论

电子轰击 CMOS 背部减薄工艺包含芯片封装、微透镜层和钝化层的去除与减薄。实验结果表明,通过湿法刻蚀技术去除芯片封装和表面微透镜层,干法刻蚀技术去除芯片钝化层,不会损伤芯片成像功能。制备的电子轰击 CMOS 芯片满足电子轰击实验的要求,电场电压在 2000V 时收集效率达到 33%,灰度值增益达到 100,且实验与模拟的收集效率和灰度值增益数据表现一致,证明了电子收集效率模型合理性。为国产电子轰击 CMOS 器件的研制提供了重要的支撑。

## 参考文献

- [1] Aebi V W, Boyle J J. Electron bombarded active pixel sensor: U.S. Patent 6,285,018[P]. 2001-9-4.
- [2] Barbier R, Depasse P, Baudot J, et al. First results from the development of a new generation of hybrid photon detector: EBCMOS[M]//Astroparticle, Particle And Space Physics, Detectors And Medical Physics Applications. 2008: 23-27.
- [3] 海小华,陈宇,赵帅明.增强现实型头盔显示器光学系统设计[J].长春理工大学学报(自然科学版),2024,47(06):1-8.
- [4] 刘亚宁,桑鹏,吕嘉玮,等.微型低功耗EBAPS相机技术[J].红外技术,2019,41(09):810-818.
- [5] 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(01):175-180.
- [6] 李桐桐,肖超,焦岗成,等.电子敏感CMOS部件除气方法[J].应用光学,2022,43(06):1181-1186.
- [7] Wang X, Song D, Jiao G, et al. Characterising backscattered electrons in EBCMOS[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(6): 1-5.
- [8] 宋园园,宋德,李野,等.钝化层及P型基底结构优化对电子轰击型有源传感器电荷收集效率影响的研究[J].中国激光,2023,50(18):242-250.
- [9] 王东辰,徐鹏霄,王艳,等.130万像素数字化微光EBAPS器件及组件[J].固体电子学研究与进展,2024,44(06):617:1-1.
- [10] 周潮虹,钱芸生,张景智.EBAPS的调制传递函数测试系统[J].应用光学,2024,45(05):992-1000.
- [11] 吕蒙,宋德,焦岗成,等.EBCMOS中背散射电子的特性研究[J].中国激光,2024,51(17):1-8.
- [12] 何欣悦,焦岗成,程宏昌,等.钝化层结构对EBCMOS噪声特性的影响[J].中国激光,2025,52(01):213-221.