

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.08.007

通过干法蚀刻工艺改善 LCDU 的研究

许向生¹, 王 莉¹, 谢 婷²

(1. 合肥工业大学 微电子学院, 安徽 合肥 230601; 2. 中微半导体设备(上海)股份有限公司, 上海 201201)

摘 要:当前 5G 通信、增强现实、虚拟现实、物联网、新能源汽车等领域发展迅猛, 这些应用均依赖存储技术的支撑, 对存储的需求也在不断增长。当动态随机存取存储器(dynamic random access memory, DRAM)尺寸缩小到 20 nm 时, 其存储阵列将面临巨大的微缩挑战, 局部关键尺寸均匀性(local critical dimension uniformity, LCDU)在此情况下尤为关键。文章主要利用国产机台研究光刻-蚀刻-光刻-蚀刻(litho-etch-litho-etch, LELE)工艺中的干法蚀刻工艺对 LCDU 的优化效果。研究结果表明, 结合原位沉积、异步蚀刻与异步原位沉积蚀刻可以将蚀刻后的归一化 LCDU 从 21.2% 显著降低至 7.7%, 与原有的美系机台相比降低了 2.3%。该结果为 DRAM 管芯结构性测试和晶圆测试的改进及成本降低奠定了坚实的基础, 并为本土化设备的研究提供了极大的信心。

关键词:原位沉积; 原位沉积蚀刻; 异步脉冲; 局部关键尺寸均匀性(LCDU); 干法蚀刻

中图分类号: TN405

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2026)08-1047-07

Research on the improvement of LCDU by dry etching process

XU Xiangsheng¹, WANG Li¹, XIE Ting²

(1. School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. Advanced Micro-Fabrication Equipment Inc. China, Shanghai 201201, China)

Abstract: At present, 5G communication, augmented reality, virtual reality, Internet of Things, new energy vehicles and other fields are developing rapidly, which depend on storage technologies, and the demand for storage is also growing. When dynamic random access memory(DRAM) sizes are scaled down to 20 nm, DRAM memory arrays face significant scaling challenges, and local critical dimension uniformity(LCDU) is particularly important in this context. This paper primarily focuses on optimizing LCDU by the dry etching process in litho-etch-litho-etch(LELE) using domestic equipment. The research results show that the combination of *in-situ* deposition, asynchronous etching, and asynchronous *in-situ* deposition and etching can significantly reduce the normalized LCDU after etching from 21.2% to 7.7%, which is 2.3% lower than that of the original American tool, laying a solid foundation for the improvement and cost reduction of DRAM core structural testing and wafer testing and boosting confidence in the development of domestic equipment.

Key words: *in-situ* deposition; *in-situ* deposition and etching; asynchronous pulsing; local critical dimension uniformity(LCDU); dry etching

0 引 言

动态随机存取存储器(dynamic random ac-

cess memory, DRAM)发展至今已有近 60 年历史。随着存储密度的增长, 其关键尺寸(critical dimension, CD)不断缩小, 当微缩至 20 nm 节点

收稿日期: 2024-04-28; 修回日期: 2024-05-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62074048)

作者简介: 许向生(1999—), 男, 河南南阳人, 合肥工业大学硕士生;

王 莉(1977—), 女, 河北高碑店人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: wlhgd@hfut.edu.cn.

时,局部关键尺寸均匀性(local critical dimension uniformity, LCDU)变得尤为重要^[1-2]。局部关键尺寸均匀性的定义是局部区域内关键尺寸分布的 3σ , 常用于量化给定工艺的局部 CD 变化^[3]。LCDU 越低表示局部 CD 的变化范围越小, DRAM 存储阵列偏差越小。假设 CD 为 40 nm 时 LCDU 为 5 nm, 则局部 CD 偏差为 12.5%; 当 CD 为 20 nm、LCDU 为 5 nm 时, 局部 CD 偏差为 25%。对于 DRAM 有源区(active area, AA)而言, 如此大的偏差带来的影响有: AA 两端局部浅沟道隔离(shallow trench isolation, STI)的深度不一致; 后续埋入式字线(word line, WL)与 AA 连接的位置存在偏差; 接触节点(node contact, NC)与 AA 两端的着陆平台(landing pad)接触窗口变窄。这些影响均可通过良率损失、性能差异及较低的器件规格来体现^[4]。

近年来, 有关 LCDU 的研究主要集中在光刻及蚀刻过程, 但多限于光刻工艺, 如光刻胶种类、曝光后烘烤条件、照明条件^[1]、移相掩膜^[5]、负显影工艺^[6]和干燥显影工艺^[7]等。蚀刻方面 LCDU 主要在极紫外(extreme ultra violet, EUV)光刻机基础上进行优化。文献[8]在调整光刻参数后, 通过多次进行沉积与蚀刻循环可以使 30~40 nm 间距归一化 LCDU (LCDU 与 CD 比值) 达到 11%~18%, 通过选择性沉积, 可以使 30~40 nm 间距归一化 LCDU 达到 8%~14%; 文献[9]通过量测观察到 LCDU 改善依赖于显影后检测(after development inspection, ADI)与蚀刻后检测(after etching inspection, AEI)关键尺寸之间的蚀刻偏差, 并通过每个蚀刻步骤(Step, S)的量测发现氧化物蚀刻步骤是改善 LCDU 的关键步骤。目前针对深紫外(deep ultra violet, DUV)光刻后的蚀刻工艺研究较少。

为改善 20 nm DRAM 的 LCDU, 本文基于浸没式深紫外光刻机, 首先调整蚀刻参数以满足光刻-蚀刻-光刻-蚀刻(litho-etch-litho-etch, LELE)垂直形貌需求, 然后通过原位沉积、异步脉冲蚀刻与异步原位沉积蚀刻等方法降低 LCDU。

1 实 验

1.1 LELE 剪切工艺流程

在 20 nm DRAM 中, 由于浸没式 DUV 光刻机存在光刻极限^[10], 原本 EUV 光刻机 1 次曝光即可形成的 AA 掩膜, 在浸没式 DUV 光刻机下可能需要 4 次甚至 5 次曝光才能实现。在浸没式

DUV 条件下, 通过 LELE 2 次剪切线条形成 AA 的掩膜, 其中线条由自对准四重图案化(self-align quadruple patterning, SAQP)技术形成^[11]。LELE 剪切工艺流程如图 1 所示。

图 1a 所示为 SAQP 图案光刻与蚀刻后的示意图, 在经过 3 次蚀刻后线条密度变为原有光刻线条密度的 4 倍。图 1b 和图 1c 所示为 2 次 LE (光刻-蚀刻) 剪切线条示意图, 光刻图案存在固定位置上的偏移, LELE 的第 1 次蚀刻对准 SAQP 蚀刻后形成的套刻标记, LELE 的第 2 次光刻对准 LELE 的第 1 次蚀刻后形成的套刻标记, 最终经由蚀刻缩孔后准确在线条上实现剪切。

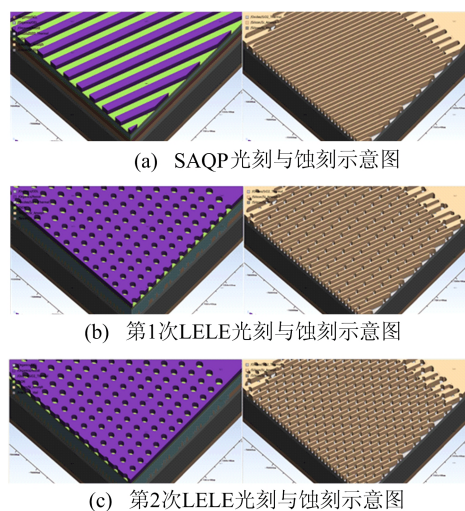


图 1 SAQP & LELE 剪切流程示意图

对于单次 LE 而言, 蚀刻后的 LCDU 主要由光刻后检测 LCDU 与当层蚀刻工艺共同决定。其中, 光刻后 LCDU 的成因包括掩膜关键尺寸变化^[12]、光子散粒噪声^[13-14]和光刻胶带外吸收^[4]等, 这些因素均会引起光阻形貌变化, 进而影响光刻后的 LCDU。光刻后观察到的孔形貌示意图如图 2 所示。

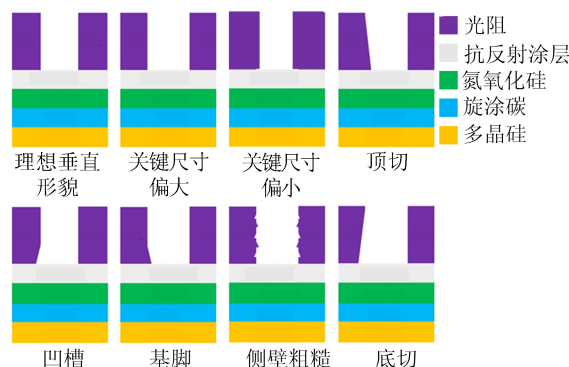


图 2 光刻后观测到的孔形貌示意图

图 2 中,光刻后的膜层结构是光阻(photo resist, PR)、底部抗反射涂层(bottom anti-reflective coating, BARC)、氮氧化硅(SiON)、旋涂碳(spin-on carbon, SOC)、多晶硅(poly-Si)。理想形貌为垂直且关键尺寸一致的光阻形貌,但由于光刻的细微差异,孔的形貌并不完全相同,存在关键尺寸大小差异、光阻底部形貌差异(如凹槽、基脚)以及光阻侧壁形貌差异(如顶切、底切、侧壁粗糙)等,这些差异均会导致局部关键尺寸不同。随着蚀刻将图案向下转移,这些差异也随之向下传递。

对于蚀刻工艺而言,由于蚀刻过程中存在微观和宏观负载效应,这会放大孔与孔之间的差异,进而扩大 LCDU。最终,AA 两端孔的 LCDU 是叠加第 2 次 LE 的 LCDU,从整体计算孔的 LCDU,LELE 的第 1 次蚀刻需保证蚀刻后套刻标记打开,否则无法进行第 2 次 LE,不能形成 AA。

1.2 蚀刻设备与蚀刻步骤

本文所有蚀刻实验均在电感耦合等离子体(inductively coupled plasma, ICP)蚀刻设备中进行,该设备配备 2 个射频发生器。多晶硅形貌研究阶段使用国产 A 机台, LCDU 研究阶段使用国产 B 机台。B 机台相较于 A 机台拥有更丰富的脉冲蚀刻功能,而两机台气体种类、腔体大小等基本相同,最终所有蚀刻均选择在国产 B 机台上完成。

具体蚀刻步骤如下:S1 原位沉积;S2 蚀刻;S3 氮氧化硅蚀刻;S4 旋涂碳蚀刻;S5 多晶硅蚀刻;S6 原位去除。通过 S1~S6 这 6 个步骤对 LE 的 5 层薄膜进行蚀刻,以完成实验。

1.3 量测方法

孔的 CD 和 LCDU 均通过 CD-SEM 拍摄图片进行量测。整片选取 8 个不同曝光区域,每个曝光区域固定位置拍 1 张图片,每张图片量测 2 个孔。

孔的 CD 计算方法为:

$$D_i(X) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (1)$$

$$D(X) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m D_i(X) \quad (2)$$

其中: x_{ij} 为第 i 张图片第 j 个孔的 CD; D_i 为第 i 张图片孔 CD 的算术平均值。

孔的 LCDU 计算方法为:

$$L_i(X) = 3 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n [x_{ij} - D_i(X)]^2} \quad (3)$$

$$L(X) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m L_i(X) \quad (4)$$

其中, L_i 为第 i 张图片孔的 LCDU。

对于样本实验,首先选取样本内不同位置的 6 张图片,每张图片选取 2 个孔来计算对应的 CD 和 LCDU,计算方法与整片相同。小批量实验则选取 13 张不同曝光区域、不同位置图片进行计算,从实验结果来看,13 张图片的 LCDU 与 8 张图片的 LCDU 差异不大。

本文实验的 CD 和 LCDU 均采用归一化结果表示,CD 的归一化方法为:

$$D_{\text{Norm}} = \frac{D(X)}{D_{\text{Ph}}} \times 100\% \quad (5)$$

其中, D_{Ph} 为光刻后孔的 CD 均值。

LCDU 的归一化方法为:

$$L_{\text{Norm}} = \frac{L(X)}{D(X)} \times 100\% \quad (6)$$

在不完全蚀刻时,由于聚合物存在, LCDU 量测存在较大误差,且量测各项参数相同时无法有效捕捉孔的形貌,因此仅作参考。为减少测量误差和实验随机性,实验结果均以整片完全蚀刻到多晶硅上的量测结果为准。

2 结果与讨论

2.1 多晶硅垂直形貌实现

LELE 蚀刻的形貌要求为多晶硅层上的形貌垂直,因此首先研究多晶硅形貌的制备。在国产 A 机台上,进行 S3~S6 共 4 步蚀刻,蚀刻条件见表 1 所列。

表 1 S3~S6 蚀刻条件

步骤	时间/s	脉冲条件	气压/Pa	气体
S3	4	无脉冲	1.33	CHF ₃ 、SF ₆ 、N ₂ 、Ar
S4	27	无脉冲	1.06	COS、O ₂
S5	150	偏置脉冲	1.33	O ₂ 、Cl ₂ 、HBr
S6	6	无脉冲	5.32	O ₂

表 1 中:S3 以光阻作为掩膜,蚀刻抗反射涂层与氮氧化硅膜层;S4 以氮氧化硅作为掩膜,蚀刻旋涂碳膜层;S5 以旋涂碳膜层作为掩膜,蚀刻多晶硅;S6 利用高流量氧气去除多晶硅上剩余的旋涂碳。

多晶硅形貌由 S5 蚀刻多晶硅步骤决定。在 S5 步骤中,通过添加氧气将多晶硅氧化为氧化硅

以保护侧壁,利用氯气进行蚀刻;同时通入高流量溴基气体增加聚合物含量以保护旋涂碳,从而保证 LCDU 不在此步骤增大;随后,通过调整 S5 步骤的气体比例、压力及功率,实现垂直的多晶硅形貌。

在 S6 步骤去除多晶硅表面的旋涂碳膜层及副产物后,通过透射电子显微镜观察到的切片结果如图 3 所示。

图 3 中,侧壁角度大于 89° , 满足需求。此时归一化 CD 为 58.5%, 归一化 LCDU 为 21.2%, 与光刻时的归一化 LCDU (7.7%) 相比, 增大了近 3 倍。这是由于蚀刻存在负载效应: 孔 CD 较大有利于蚀刻气体进入和蚀刻副产物排出; 孔 CD 较小则反之。蚀刻的这种负载效应使得孔的 LCDU 进一步增大, 最终导致蚀刻后的归一化 LCDU 比光刻后的归一化 LCDU 还要大得多。由于多晶硅蚀刻步骤为垂直蚀刻, 在保护侧壁与掩膜后, 归一化 LCDU 主要来源于前层薄膜蚀刻的 CD 不均匀性, 因此需通过前层薄膜蚀刻降低 LCDU, 进而改善最终的 LCDU。为了提升 LCDU, 需要采用更先进的干法蚀刻工艺, 后续所有蚀刻工艺研究均换至国产 B 机台, 以便利用其更丰富的脉冲功能。

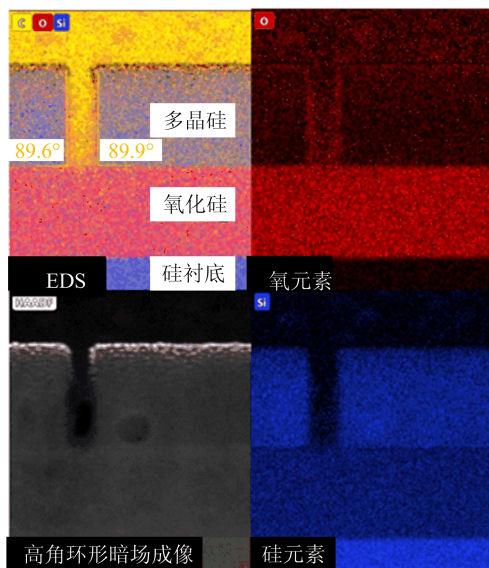


图 3 完全蚀刻后多晶硅上孔形貌

2.2 原位沉积改善 LCDU

缩小孔的 LCDU 可通过沉积来实现。本实验利用蚀刻机台自身条件模仿化学气相沉积工艺, 使用富含聚合物的碳氟类气体进行 S1 原位沉积, 原位沉积同样存在负载效应, 其原理如图 4 所示。图 4 中: 大孔因接触面积大、与自由基接触

多, 沉积量更多; 小孔则因接触面积小、自由基不易进入, 沉积量少。

沉积完成后, 增加 S2 蚀刻步骤以去除顶部与底部的含碳聚合物, 利用偏置电压进行各向异性蚀刻, 从而改善孔的 LCDU。

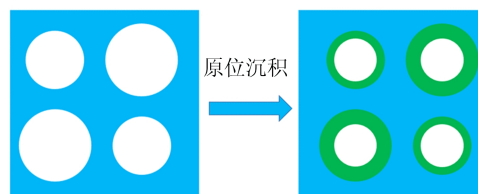


图 4 原位沉积原理图

在 S3~S6 步骤的基础上添加的步骤 S1 和步骤 S2 的条件见表 2 所列。

表 2 S1 原位沉积与 S2 蚀刻条件

步骤	时间/s	脉冲条件	气压/Pa	气体
S1	12	无脉冲	1.06	$C_xH_yF_z$, N_2 , Ar
S2	13	无脉冲	2.00	O_2 , Ar

确定 S1 和 S2 步骤条件后, 设计了不同时间条件的实验, 结果见表 3 所列。

表 3 沉积与蚀刻不同时间条件下的实验结果

S1 时间/s	S2 时间/s	归一化 CD/%	归一化 LCDU/%
10	11	30.9	24.1
12	13	36.4	16.9
14	15	35.1	20.0

由表 3 可知, 实验通过改变沉积/蚀刻时间组合 (10 s/11 s, 12 s/13 s, 14 s/15 s) 进行, 因为沉积后底部聚合物均需去除, 所以设计时蚀刻时间均比沉积时间多 1 s。结果表明, 沉积时间为 12 s、蚀刻时间为 13 s 时, LCDU 结果最佳, 达到 16.9%。

整片采用 12 s 沉积、13 s 蚀刻后的结果如图 5 所示。

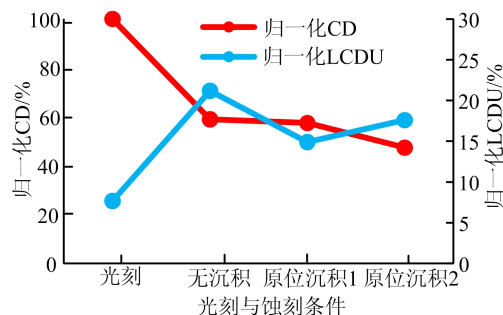


图 5 光刻、无沉积、原位沉积的归一化 CD 与归一化 LCDU 对比

图5中,在添加原位沉积1后,归一化CD缩小1.5%,归一化LCDU从21.2%降低至14.9%。由于工艺需求,需要把孔CD缩小至目标43%左右,然而,因负载效应存在,套刻标记区域接触面积较大,沉积的含碳聚合物更多。若继续沉积,则需增加蚀刻时间以蚀蚀底部,但这不利于套刻标记打开;减少蚀刻时间同样存在此问题。因此,通过调整后续步骤中的气体比例和时间来缩小孔的CD。原位沉积2的结果显示,归一化孔的CD缩小至47.4%,但归一化LCDU升高2.7%。

2.3 异步脉冲蚀刻改善 LCDU

在添加原位沉积后的条件下,在S3氮氧化硅蚀刻时添加异步脉冲蚀刻,利用各项异性蚀刻与各项同性自由蚀刻来优化LCDU。其中,源电源采用100 Hz双状态低-高循环脉冲,偏置电源采用100 Hz高关循环脉冲。

从等离子体角度看:在低源功率、高偏置功率状态下,等离子体密度与自由基密度均较低,但因偏置电压的存在,等离子体可获得更高的离子能量和更窄的离子角分布,实现低密度、高能量的各向异性蚀刻;在高源功率、零偏置功率状态下,自由基与等离子体含量均很高,但由于无偏置功率,蚀刻速率很慢,自由基可充分扩散至孔周围进行各向同性自由蚀刻。

在S3氮氧化硅蚀刻时添加异步脉冲蚀刻的结果如图6所示。

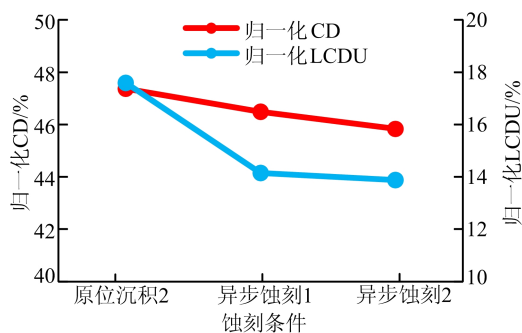


图6 S3 异步脉冲蚀刻的归一化 CD 与归一化 LCDU 对比

由图6可知,添加异步蚀刻1后,归一化LCDU从17.6%降低至14.2%。这是通过自由蚀刻与各向异性蚀刻的快速循环,形成锥形侧壁并缩小CD,从而降低LCDU。

然而,添加异步蚀刻后出现了套刻标记不能打开的现象,如图7所示。

图7所示为正常打开的套刻标记与产生微沟

槽无法打开的套刻标记的对比。在低源功率、高偏置功率阶段,高能离子可沿套刻标记侧壁“滑行”,滑至套刻标记侧壁底部边角时会产生聚集效应,导致边角材料刻蚀速率显著提高,形成微沟槽,即微沟槽效应;而在高源功率、零偏置功率阶段,蚀刻气体进行自由蚀刻,相较于无脉冲模式,蚀刻速率降低,对套刻标记中部蚀刻不足。对于小尺寸孔而言,各向异性蚀刻阶段的高能离子可直接沿侧壁“滑行”至孔底部,加速蚀刻,因此孔CD的蚀刻速率差异不大;但套刻标记中部蚀刻量不足,会阻塞下一步蚀刻。

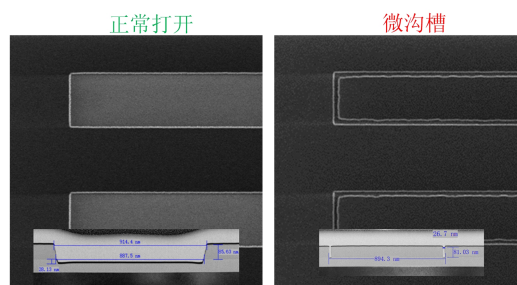


图7 套刻标记顶部图像对比

通过调整时间、气体比例和脉冲占空比后,套刻标记得以打开。图6中,套刻标记打开的异步蚀刻2的归一化CD与归一化LCDU基本不变。

2.4 异步脉冲原位沉积蚀刻改善 LCDU

在添加异步蚀刻的条件下,结合原位沉积与异步蚀刻的经验,在S2蚀刻中增加可以产生聚合物的碳氟类气体,同时采用高频异步的双状态脉冲。高源功率、零偏置功率时,由于分子大量解离,起蚀刻作用的O原子大部分与解离出来的H原子与C原子反应生成H₂O和CO₂排出,剩余的C、H、F结合形成聚合物沉积在光阻表面。由于总的自由蚀刻作用小于沉积作用,整体表现为沉积。在低源功率、偏置功率开启时,带电离子存在物理轰击作用,具有方向性,轰击光阻表面,此时沉积作用小于蚀刻作用,实现各向异性蚀刻,可去除顶部与底部沉积产生的聚合物。

S2蚀刻完整晶圆设计实验结果见表4所列。

表4 S2蚀刻完整晶圆设计实验结果

脉冲条件	碳氟类气体	归一化CD/%	归一化LCDU/%
无脉冲	无	44.5	13.8
偏置脉冲	无	42.1	14.1
异步脉冲	有	50.4	11.3

由表4可知,对比无脉冲、偏置脉冲和异步脉

冲的结果,异步脉冲原位沉积蚀刻后的归一化 LCDU 可从 13.8% 降低至 11.3%。

在进一步实验中,通过改变沉积作用与蚀刻作用的参数,定义蚀刻作用和沉积作用如下:

$$E_{\text{etch}} = T_{\text{etch}} G_{\text{etch}} (B_{\text{etch}})^2 \quad (7)$$

$$E_{\text{dep}} = T_{\text{dep}} G_{\text{dep}} S_{\text{dep}} \quad (8)$$

其中: T_{etch} 为蚀刻时间; G_{etch} 为蚀刻气体流量; B_{etch} 为蚀刻偏置功率; T_{dep} 为沉积时间; G_{dep} 为沉积气体流量; S_{dep} 为沉积源功率。

对比沉积作用与蚀刻作用的比值与归一化 LCDU,发现其关系如图 8 所示。

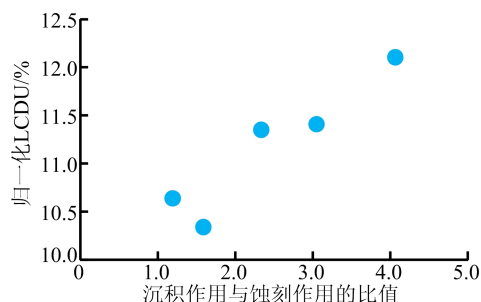


图 8 沉积作用、蚀刻作用对归一化 LCDU 的影响

从图 8 可以看出,当蚀刻作用与沉积作用比值小于 2.0 时,归一化 LCDU 可降至 10.5%。但随着该比值减小至 2.0,套刻标记会出现与 2.3 节相同的问题,即无法打开套刻标记。因此,需通过调整沉积作用与蚀刻作用的比值来寻求最佳值。

后续通过继续调整 S2 蚀刻中沉积与蚀刻的比例、S3 蚀刻中自由蚀刻与各向异性蚀刻的比例以及 S4 蚀刻中偏置功率与气体流量,最终使归一化 LCDU 达到 7.7%,与美系机台的 10% 相比,降低了 2.3%,达到了与浸没式深紫外光刻后相同的归一化 LCDU。

随后进行的小批量实验归一化 CD 和归一化 LCDU 结果如图 9 所示。

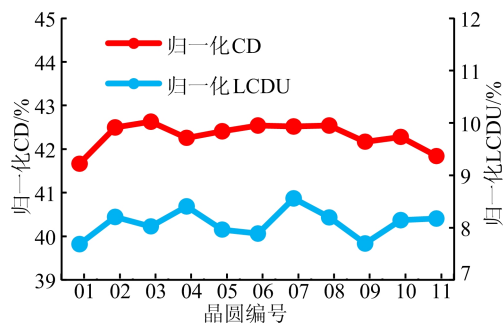


图 9 小批量实验的归一化 CD 和归一化 LCDU 结果

图 9 中,晶圆编号 01 至 11 均为重复实验。经小批量重复实验后,CD 达到要求,且归一化 LCDU 始终维持在 8% 附近,工艺稳定。

然后,进行第 2 次 LE 工艺,套刻标记通过第 2 次曝光返工后达到要求;再通过干法蚀刻调整两次 LE 之间的差值,最终实现 AA 当前最佳的 LCDU。

3 结 论

随着 DRAM 尺寸不断微缩,对 LCDU 的要求持续提高。经过在国产机台上的不断实验研发,通过原位沉积、异步蚀刻和异步沉积蚀刻的调整,归一化 LCDU 从 21.2% 降低至 7.7%,相比原有美系机台降低了 2.3%,达到了目前世界先进水平。这为 DRAM 管芯结构性测试和晶圆测试的改进及成本降低奠定了坚实基础,并为本土化设备的研究提供了极大信心。

但随着 DRAM 尺寸的继续微缩,LCDU 将面临新的挑战。后续将继续探索更多先进干法蚀刻方法以进一步提升 LCDU。

[参 考 文 献]

- [1] Zhang Z, Zhang Y, Zhu L, et al. Comprehensive investigation on improvement of local CDU for sub-20 nm DRAM devices[C]//Optical and EUV Nanolithography XXXVI, Vol 12494. [S. l.]: SPIE, 2023: 48.
- [2] Zhou W, Wei F, Zhang Y, et al. Contour-based metrology for assessment of edge placement error and its decomposition into global/local CD uniformity and LELE intralayer overlay[C]//Metrology, Inspection, and Process Control for Semiconductor Manufacturing XXXV, Vol 11611. [S. l.]: SPIE, 2021: 472-479.
- [3] Jiang J, De Simone D, Vandenberghe G. Difference in EUV photoresist design towards reduction of LWR and LCDU [C]//Advances in Patterning Materials and Processes XXXIV, Vol 10146. [S. l.]: SPIE, 2017: 64-71.
- [4] Liang A, Hermans J, Tran T, et al. Integrated approach to improving local CD uniformity in EUV patterning[C]//Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography VIII, Vol 10143. [S. l.]: SPIE, 2017: 251-265.
- [5] Song J, Kim J, Bae H J, et al. EUV source pole control for LCDU and CD ellipticity handling in hexagonal contact arrays[C]//Optical and EUV Nanolithography XXXVII, Vol 12953. [S. l.]: SPIE, 2024: 83-88.
- [6] Green M, Huang T W, Ramadan M, et al. Patterning solutions for NTD contact hole levels in advanced DRAM nodes [C]//Photomask Technology 2020, Vol 11518. [S. l.]: SPIE, 2020: 98-105.

(下转第 1074 页)

- [10] 王彪,张天天,唐啸宇,等. 国家组织药品带量采购政策的降价持续性研究[J]. 中国卫生政策研究, 2023, 16(4): 32-36.
- [11] Long H, Yang Y, Geng X, et al. Changing characteristics of pharmaceutical prices in China under centralized procurement policy: a multi-intervention interrupted time series [J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2022, 13: 944540.
- [12] 陈烨,丁锦希. 药品集中带量采购中的专利问题探讨[J]. 知识产权, 2021(9): 79-96.
- [13] 郭松波,艾兴政,钟丽,等. 非对称零售商药品带量采购的团购协调机制研究[J]. 中国管理科学, 2024, 32(4): 208-217.
- [14] 岳殿民,骆雨晴,吴晓丹,等. 药品带量采购政策下民营医院参与机制研究[J]. 管理评论, 2023, 35(10): 268-282.
- [15] Feng Q, Lu L X. The strategic perils of low cost outsourcing[J]. *Management Science*, 2012, 58(6): 1196-1210.
- [16] Chen X, Wang X, Xia Y. Production coemption strategies for competing manufacturers that produce partially substitutable products[J]. *Production and Operations Management*, 2019, 28(6): 1446-1464.
- [17] 叶同,关志民,张大儒,等. Nash 讨价还价公平关切下基于低碳商誉的供应链联合减排与广告的动态优化与协调[J]. 中国管理科学, 2021, 29(3): 119-132.
- [18] 张新鑫,侯文华,申成霖,等. 集中采购参与意愿、制药企业议价能力与药品市场绩效[J]. 中国管理科学, 2017, 25(7): 113-122.
- [19] 李钊,马志强,陈敬贤. 商业银行融资对药品批发企业供给价格的影响:基于 Nash 讨价还价模型的分析[J]. 系统管理学报, 2018, 27(6): 1099-1108.
- [20] Chen R R, Roma P. Group buying of competing retailers [J]. *Production and Operations Management*, 2011, 20(2): 181-197.
- [21] Sun J, Yuan P, Li G. Reducing supply chain carbon emissions in consideration of energy service companies under the cap-and-trade mechanism [J]. *Annals of Operations Research*, 2023: 1-28.
- [22] Hua Y F, Lu J, Bai B, et al. Can the profitability of medical enterprises be improved after joining China's centralized drug procurement? A difference-in-difference design [J]. *Frontiers in Public Health*, 2022, 9: 809453.
- [23] 宋伟,吴清锋,李钧. 药品集采制度对医药企业绩效影响研究:基于 PSM-DID 模型[J]. 财会通讯, 2022(16): 104-108.
- [24] 郭悄倚. 带量采购政策对仿制药企业创新活动的影响[D]. 成都:西南财经大学, 2022: 15.
- [25] 余佳,游达明. 考虑风险厌恶特征的供应链竞合模式比较研究[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(8): 2091-2104.
- [26] 孙言,朱正,杨莉. 国家组织药品集中带量采购价格降幅影响因素分析[J]. 中国卫生政策研究, 2022, 15(2): 54-59.

(责任编辑 胡亚敏)

(上接第 1052 页)

- [7] Shigaki S, Takeda S, Shibayama W, et al. DDR process and materials for NTD photo resist in EUV lithography[C]//International Conference on Extreme Ultraviolet Lithography 2017, Vol 10450. [S. l.]: SPIE, 2017: 72-83.
- [8] Miller E, Sun J, Church J, et al. Contact local CD uniformity optimization through etch shrink [C]//Advanced Etch Technology and Process Integration for Nanopatterning X, Vol 11615. [S. l.]: SPIE, 2021: 15-23.
- [9] Lorusso G F, Mao M, Reijnen L, et al. Influence of etch process on contact hole local critical dimension uniformity in extreme-ultraviolet lithography[C]//Advances in Patterning Materials and Processes XXXII, Vol 9425. [S. l.]: SPIE, 2015: 161-169.
- [10] 李艳丽,刘显和,伍强. 先进光刻技术的发展历程与最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922006.
- [11] Tahara S. Reactive ion etching challenges and technology for memory device fabrication [C]//2023 International Conference on Electronics Packaging (ICEP). [S. l.]: IEEE, 2023: 33-34.
- [12] Qi Z J, Rankin J, Sun L, et al. Contribution of EUV mask CD variability on LCDU[C]//Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography VIII, Vol 10143. [S. l.]: SPIE, 2017: 396-404.
- [13] Kim S M, Lim C M, Jung M R, et al. Understanding of stochastic noise[C]//Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography VI, Vol 9422. [S. l.]: SPIE, 2015: 167-177.
- [14] Kim S M, Koo S, Park J T, et al. EUV stochastic noise analysis and LCDU mitigation by etching on dense contact-hole array patterns[C]//Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography V, Vol 9048. [S. l.]: SPIE, 2014: 60-68.

(责任编辑 胡亚敏)