

氮化硅/钽硅 X 射线光刻掩模研制及应用*

谢常青^{1;1)} 牛洁斌¹ 王德强¹ 董立军¹ 陈大鹏¹ 伊福廷² 张菊芳²

1 (中国科学院微电子研究所纳米加工与新器件集成技术实验室 北京 100029)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 经过三十多年的研发, 接近式 X 射线光刻技术已经非常成熟, 其具有分辨率高、焦深大、工艺宽容度大、产量高等诸多优点. 对于 X 射线掩模吸收体材料, 如果选择金, 只能采用电镀工艺, 而且金会污染硅基集成电路; 而钽硅材料可以采用干法刻蚀工艺, 不会污染硅基集成电路, 是一种理想的 X 射线掩模吸收体材料. 本文论述了氮化硅/钽硅 X 射线掩模制作工艺, 不同于常规工艺, 电子束光刻显影后, 以 ZEP520 电子束光刻胶作为阻挡层, SF_6/CHF_3 作为反应气体, 电感耦合等离子体直接刻蚀钽硅薄膜. 初步的实验结果证明了这种 X 射线掩模制作工艺是可行的.

关键词 接近式 X 射线光刻 X 射线掩模 钽硅薄膜 电感耦合等离子体 同步辐射

1 引言

光刻技术一直是集成电路制造业向前发展的技术先导. 就光刻工艺性能而言, 接近式 X 射线光刻 (Proximity X-ray Lithography PXL) 不需要配备成本昂贵的投影光学系统, 同时具有高分辨率、大焦深、大像场、低缺陷灵敏度等诸多优越性能, 近年来的研究表明 PXL 的分辨率可以达到 35nm 及 35nm 以下^[1-3]. PXL 技术已有三十多年的研发历史, 目前其研究主要集中在大规模生产的实用化问题上, 相比于其下一代光刻技术竞争对手, PXL 最大的优势在于最接近实用化的需求. 2000 年 PXL 正式进入高频高速化合物半导体集成电路生产线^[4], 迄今为止, 在所有的下一代光刻技术中, PXL 是唯一进入生产线的.

接近式 X 射线光刻是 1:1 的, 也就是说吸收体图形的尺寸与曝光后的光刻胶图形大小、形状要求完全一样, 高集成度的 1:1 式 X 射线掩模的制作是 X 射线光刻技术的关键环节, 需要特别指出的是, 过去人们通常认为 1:1 式的 X 射线掩模是 X 射线光刻技术工业化应用的最大技术难点, 其实不然, 在 180nm 节点以上, 相对于光学掩模而言, X 射线掩模的制造难度和成本确实大得多, 但是在 100nm 节点以下, 相对于光学掩模而言, X 射线光刻掩模的制造难度和成本则要低一

些, 其原因是 100nm 节点以下 193nm 光学掩模也不完全是 4:1 式的, 除了需要进行复杂的光学临近效应校正外, 对于半密集线、孤立线必须添加散射条, 而散射条宽度通常小于 50nm, 而 X 射线掩模不存在这些问题.

X 射线掩模的制作工艺有两种, 一种是加法工艺, 指的是以电镀 Au 作为吸收体的制作工艺, 其工艺比较简单, Au 的化学性质稳定, 不易氧化, 但是 Au 材料往往会对硅集成电路造成污染(但是对高频高速化合物半导体集成电路则不存在这个问题); 另一种是减法工艺, 指的是以刻蚀钽硅或钨等难溶性金属材料作为吸收体的制作工艺, 虽然其制作工艺中的图形转移步骤依赖于高精度干法刻蚀工艺, 工艺复杂, 但是由于这些难熔金属不会对污染硅集成电路而且其加工工艺符合集成电路工艺规范, 因此目前国际上 X 射线掩模的研究均集中在难熔金属 X 射线掩模上^[5]. 本文报道了氮化硅/钽硅 X 射线掩模制作工艺, 与 IBM 的碳化硅/钽硅 X 射线掩模制作工艺不同, 我们直接在 TaSi 薄膜上进行电子束光刻, 利用 ZEP520 电子束光刻胶的优异抗刻蚀性能进行电子束光刻胶到 TaSi 薄膜的干法图形转移, 整个氮化硅/钽硅 X 射线掩模制作工艺中仅需要一次高精度干法刻蚀工艺, 初步的实验结果证明了我们的技术方案的可行性.

* 国家自然科学基金(60236010)资助

1) E-mail: xraylith@public.bta.net.cn

2 氮化硅/钽 X 射线掩模制作工艺及分析

理论上说, X 射线光刻用的掩模类次于半色调光学光刻掩模, 在软 X 射线波段, 没有任何一种材料在足够厚的时候能对 X 射线完全透明, 同时也没有任何一种材料在足够薄时候能完全吸收 X 射线. 正是基于这样一个客观存在的物理事实, X 射线光刻掩模一般由低原子序数材料组成的约 $2\mu\text{m}$ 厚的透光薄膜衬基和高原子序数材料组成的约 $0.4\mu\text{m}$ 厚的吸收体图形构成, 也就是说, 有大面积曝光场区的薄膜衬基制备和高精度、高密度的深亚微米吸收体图形加工是 X 射线掩模技术关键.

X 射线掩模对有大面积曝光场区的薄膜衬基的基本要求是低应力、对 X 射线和可见光的良好透过性、高的杨氏模量以保证足够的强度及机械稳定性. 经过多年的努力我们研制成功了大面积曝光场区的氮化硅薄膜衬基, 氮化硅薄膜衬基的生长工艺参见文献[6], 图 1 表示大面积曝光场区的 X 射线掩模的布局.

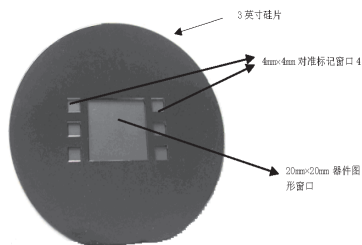


图 1 大面积曝光场区的 X 射线掩模布局

我们的氮化硅/钽 X 射线掩模制作工艺如下: 先用化学汽相淀积方法在用在 $525\mu\text{m}$ 厚硅片的正反两面生长低应力富硅 SiN_x 薄膜, 其中正面 SiN_x 薄膜的厚度为 $2\mu\text{m}$, 然后在正面 SiN_x 薄膜上蒸发 20nm Cr 作刻蚀阻挡层和粘附层, 再在 Cr 薄膜表面上射频溅射 500nm 低应力 TaSi 薄膜作吸收层, 经过常规光学光刻背面窗口、干法刻蚀背面窗口内的 SiN_x 薄膜、在 80°C 下用 35% 重量比的 KOH 溶液约 8h 湿法腐蚀体硅, 然后进行紫外光刻胶键合, 制成备用的 X 射线掩模白膜. 再在 X 射线掩模白膜上甩 400nm 厚的 ZEP520 电子束光刻胶, 经过日本 JEOL 公司的 JBX-5000LS 电子束直写机曝光、显影, 形成 X 射线掩模图形, 再以 ZEP520 电子束光刻胶作为掩模

层, 用我们自行研制的塔式感应耦合高密度等离子体刻蚀机进行 TaSi 薄膜的干法刻蚀, 采用的反应气体是 SF_6 : $\text{CHF}_3=15\text{sccm}: 45\text{sccm}$, 背冷氦的流量是 10sccm , 源功率是 400W , 偏压功率是 120W , 刻蚀过程中的气压是 2Pa , ZEP520 电子束光刻胶对 TaSi 薄膜的刻蚀选择比为 2:1. 然后用大流量低偏压功率等离子体去除残余的 ZEP520 电子束光刻胶和在去铬液中轻微漂一下 Cr, 即完成氮化硅/钽硅 X 射线掩模的制作. 作为对比, 图 2(a) 给出的是美国 IBM 公司的碳化硅/钽硅 X 射线掩模制作工艺, 图 2(b) 给出的是我们的氮化硅/钽硅 X 射线掩模制作工艺.

从图 2 可见, 常规的碳化硅/钽硅 X 射线掩模制作工艺中电子束光刻胶和 TaSi 薄膜之间有一层氮氧化硅作为图形转移过渡层, 该过渡层可以减少电子束直写机曝光过程中的电子背散射效应, 但是也增加了一步高精度干法刻蚀工艺, 我们的氮化硅/钽硅 X 射线掩模利用了 ZEP520 电子束光刻胶的高抗蚀性能, 直接进行 ZEP520 电子束光刻胶和 TaSi 薄膜之间的图形转移, ZEP520 电子束光刻胶的分辨率仅次于 PMMA, 但是其抗等离子体刻蚀的能力却远远强于 PMMA. 相比于 IBM 的制作工艺, 其优点是不仅少了一步氮氧化硅淀积工艺, 还少了一步高精度干法刻蚀工艺, 其缺点是电子束直写机曝光过程中电子背散射效应较 IBM 的制作方法严重, 但是应该看到, 近年来电子束直写机的性能指标是在不断提高的, 特别是近年来 100keV 电子束直写机的研制不断取得进展, 预计在不久的将来, 金属衬底的电子束直写背散射问题是可以得到有效解决的. 图 3 是我们制作的氮化硅/钽硅 X 射线掩模尺寸电子扫描电镜图.

3 氮化硅/钽硅 X 射线掩模曝光实验

氮化硅/钽硅 X 射线掩模曝光实验是在北京同步辐射装置 3B1A 光刻束线上进行的, 采用的 X 射线光刻胶是 SAL601 负胶, 采用烘箱进行前烘, 前烘温度是 75°C , 前烘时间是 1800s , 曝光剂量是 60 毫安·分, X 射线掩模和硅片的间距是 $18\mu\text{m}$, X 射线曝光后立即进行后烘, 后烘温度是 105°C , 后烘时间是 90s , 显影液为 MF312: 去离子水=1:1, 显影时间为 180s . 图 4 是最终曝光出来的 X 射线光刻胶图形, 初步实验结果表明我们研制的氮化硅/钽硅 X 射线掩模技术路线是可行的.

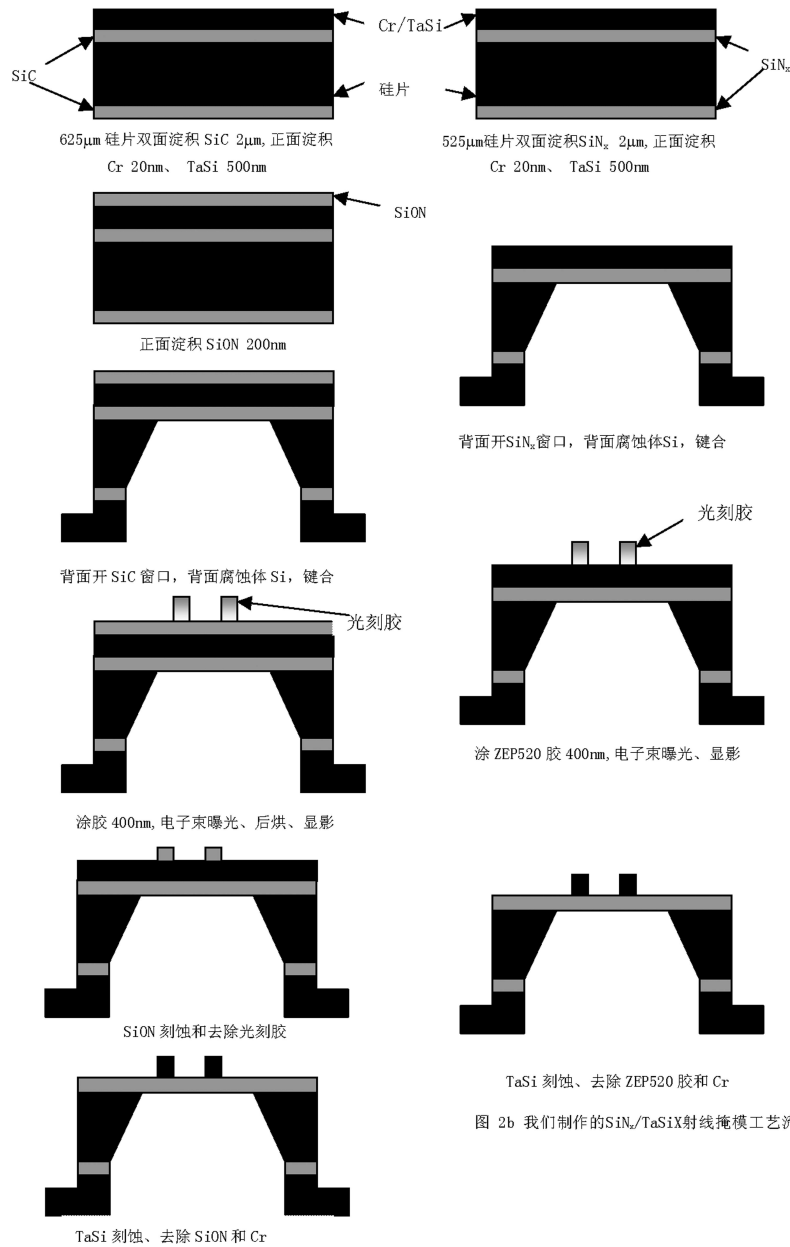


图 2a SiC/TaSiX 射线掩模常规工艺流程

图 2b 我们制作的 SiNx/TaSiX 射线掩模工艺流程

图 2 I SIC/TaSiX 射线掩模常规工艺流程图和我们制作的 SiNx/TaSiX 射线掩模工艺流程图比较

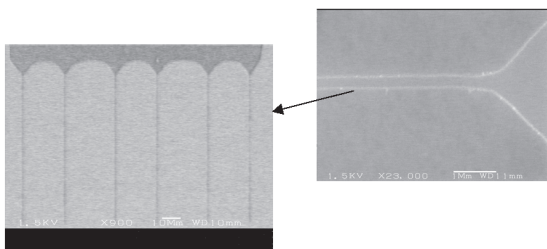


图 3 氮化硅/钽硅 X 射线掩模尺寸电子扫描电镜图

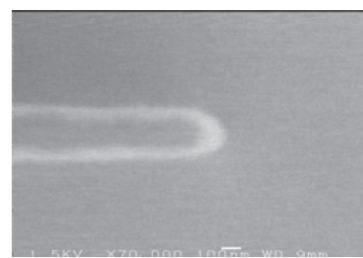


图 4 氮化硅/钽硅 X 射线掩模尺寸电子扫描电镜图

4 结束语

当其竞争对手遇到诸多技术难题的时候, 经过 20 世纪 90 年代的沉寂之后, X 射线光刻技术凭借着其自身固有的诸多优点重新成为国际光刻技术的研究热

点. 本文介绍了我们的氮化硅/钽硅 X 射线掩模制作工艺, 其特点是无须在电子束光刻胶和 TaSi 薄膜之间增加一层过渡层, 利用了 ZEP520 电子束光刻胶的高抗蚀性能, 直接进行 ZEP520 电子束光刻胶和 TaSi 薄膜之间的图形转移. 初步的实验结果表明我们研制的氮化硅/钽硅 X 射线掩模技术路线是可行的.

参考文献(References)

- 1 Kitayama, Itoga K. J. Vac. Sci. Technol., 2000, **B18**(6): 2950—2954
- 2 Khan M, Han G, Tsvit G et al. J. Vac. Sci. Technol., 2001, **B19**(6): 2423—2427
- 3 Toyota E, Hori T, Khan M et al. J. Vac. Sci. Technol., 2001, **B19**(6): 2428—2433
- 4 Selzer R(B), Heaton J. Microelectronic Engineering, 2000, **53**: 591—594
- 5 Marumoto K, Yabe H, Aya S. J. Vac. Sci. Technol., 2003, **B21**(1): 207—213
- 6 CHEN Da-Peng, YE Tian-Chun, XIE Chang-Qing et al. Semiconductors, 2001, **22**(12): 1529—1531(in Chinese)
(陈大鹏, 叶甜春, 谢常青等. 半导体学报, 2001, **22**(12): 1529—1531)

Fabrication of Silicon Nitride /Refractory Metal Tantalum X-Ray Mask and Its Application *

XIE Chang-Qing^{1;1)} NIU Jie-Bing¹ WANG De-Qiang¹ DONG Li-Jun¹ CHEN Da-Peng¹
YI Fu-Ting² ZHANG Ju-Fang²

1 (Key Laboratory of Nano-Fabrication and Novel Devices Integrated Technology,
Institute of Microelectronics, CAS, Beijing 100010, China)

2 (Synchrotron Radiation Laboratory, Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract After more than 30 years research and Development, Proximity X-ray lithography has matured considerably and it has many advantages, such as high resolution, long depth of focus, large process latitude, high throughput ,and so on. For X-ray mask absorber, if Au metal is selected, it can only be plated and may pollute the silicon-based integrated circuits. TaSi film can be dry etching and does not pollute the silicon-based integrated circuits, it is a potential candidate for X-ray mask absorber. In this paper , the home-made silicon nitride /TaSi X-ray mask fabrication process is described, unlike the conventional fabrication process, after e-beam exposure and development, is etched Inductively Coupled Plasma(ICP) etching based on SF₆/CHF₃ gas chemistries is used to pattern the TaSi film, using ZEP520 e-beam resist as the barrier layer directly. Primary experimental result demonstrated this X-ray mask fabrication process is feasible.

Key words proximity X-ray lithography, X-ray mask, TaSi film, inductively coupled plasma, synchrotron radiation

*Supported by NSFC (60236010)

1) E-mail: xraylith@public.bta.net.cn