

钴插塞化学机械平坦化的抛光液组分优化

田骥源, 王胜利, 肖悦, 王辰伟, 刘凤霞, 梁婷伟

(河北工业大学 电子信息工程学院, 天津 300130)

摘要: **目的** 提高 Co 在超大规模集成电路全局化学机械抛光过程中的去除速率及 Co/Ti 去除选择比, 并对去除机理进行详细描述。**方法** 研究不同浓度的磨料、多羟多胺络合剂 (FA/O II)、氧化剂等化学成分及不同 pH 值对钴去除率的影响。利用电化学实验、表面化学元素分析 (XPS) 揭示钴实现高去除速率的机理, 通过原子力显微镜 (AFM) 对钴抛光前后的表面形貌进行了观察, 并采用正交实验法找到抛光液最佳组分配比。**结果** 随磨料浓度的升高, 钴去除速率增大。随 pH 值的升高, 钴去除速率降低。随氧化剂浓度的提升, 钴去除速率升高, 但 Co/Ti 去除选择比先升后降。随螯合剂浓度的增大, 钴去除速率及 Co/Ti 去除选择比均先升后降。正交试验找到了最佳的抛光液配比及条件 (3% 磨料+20 mL/L 多胺螯合剂 (FA/O II)+5 mL/L 氧化剂 (H_2O_2), pH=8), 实现了钴的高去除 (~ 500 nm/min) 及较好的 Co/Ti 去除选择比 (100:1)。并且, 表面的平坦化效果明显提高, 原子力显微镜测试结果显示 Co 面粗糙度由原本的 3.14 nm 降低到 0.637 nm。**结论** 采用弱碱性抛光液能有效提升钴的去除速率, 并保证腐蚀可控。抛光液中同时含有氧化剂和螯合剂时, 通过强络合作用实现了钴的抛光速率和 Co/Ti 去除选择比的大幅度提升。

关键词: 钴插塞; 化学机械抛光; 去除速率; Co/Ti 选择比; 电化学

中图分类号: TG175 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)09-0272-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.09.036

Component Optimization of Polishing Slurry on Chemical Mechanical Planarization of Cobalt Contact

TIAN Qi-yuan, WANG Sheng-li, XIAO Yue, WANG Chen-wei, LIU Feng-xia, LIANG Ting-wei

(School of Electronic Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

ABSTRACT: The work aims to improve removal rate of Co and removal selection ratio of Co/Ti in global chemical mechanical polishing process of Very Large Scale Integration Circuit (VLSI), and describe removal mechanism of Co in detail. The effects of different concentrations of abrasives, polyhydroxypolyamine complexing agents (FA/O II) and oxidants, and different pH values on cobalt removal rate were studied. The mechanism of high Co removal rate was revealed by performing electrochemical experiments and surface chemical element analysis (XPS), and surface morphology of cobalt before and after polishing was observed by atomic force microscope (AFM). Optimum distribution ratio of polishing slurry was detected by performing or-

收稿日期: 2018-05-17; 修订日期: 2018-07-20

Received: 2018-05-17; **Revised:** 2018-07-20

基金项目: 国家科技重大专项子课题 (2016ZX02301003-004-007); 河北省自然科学基金青年基金 (F2015202267); 河北工业大学优秀青年科技创新基金资助 (2015007)

Fund: Major National Science and Technology Major Sub Class (2016ZX02301003-004-007), Natural Science Foundation of Hebei Province (F2015202267) and Scientific Innovation Grant for Excellent Young Scientists of Hebei University of Technology under Grant (2015007)

作者简介: 田骥源 (1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为钴插塞化学机械抛光。

Biography: TIAN Qi-yuan (1994—), Female, Master, Research focus: cobalt contact chemical mechanical polishing.

通讯作者: 王胜利 (1970—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为化学机械抛光。

Corresponding author: WANG Sheng-li (1970—), Male, Ph. D., Professor, Doctoral supervisor, Research focus: chemical mechanical polishing.

thogonal experiment. The removal rate of cobalt increased as the concentration of abrasive increased, and decreased as pH value increased. As oxidant concentration increased, removal rate of cobalt increased while removal selection ratio of Co/Ti firstly increased and then decreased. As the concentration of chelating agent increased, both removal rate of cobalt and removal selection ratio of Co/Ti firstly increased and then decreased. The orthogonal test found that the optimum distribution ratio of polishing slurry (3% abrasive, 20 mL/L polyamine chelating agent (FA/O II) and 5 mL/L oxidant (H_2O_2), pH=8) realized high removal rate of cobalt (~ 500 nm/min) and better removal selection ratio of Co/Ti (100:1). Besides, the planarization effect of surface was obviously improved. Atomic force microscope test results showed that Co surface roughness changed from 3.14 nm to 0.637 nm. The weakly alkaline polishing slurry can effectively improve removal rate of cobalt and ensure that corrosion is controllable. The combination of H_2O_2 and FA/O II in the polishing slurry could significantly improve polishing rate of cobalt and removal selection ratio of Co/Ti. It can be attributed to the strong complexation reaction on the surface of Co which results in the formation of the easily removable water-soluble complex.

KEY WORDS: cobalt contact; chemical-mechanical polishing; removal rate; removal selection ratio of Co/Ti; electrochemical

随着集成电路的特征尺寸不断缩小（7 nm 及以下），传统的钨插塞面临着一系列问题：电阻率随厚度的减小而增大^[1]，在窄沟槽宽度（ ~ 20 nm 及以下）的非共形沉积^[2]，无法满足扩散势垒/衬底的标度限制^[3]。钴（Co）已成为最具前景的取代钨（W）的插塞材料^[4]，这是因为 Co 具有电阻率低（ $6.3 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ）、在高长宽比沟槽中可以进行良好的共形沉积、与较薄的衬底也有较好的相容性等独特的性能^[5-7]。

由于 Co 的优良特性，很多研究人员对其充当阻挡层进行研究。鲁海生等人^[8]研究了 H_2O_2 浓度和甘氨酸对 Co 化学机械抛光特性的影响。实验发现，在酸性抛光液中，甘氨酸对于 Co 是一种很好的螯合剂，而且与 H_2O_2 协同作用能极大地增强 Co 的抛光速率，但酸性条件下溶解腐蚀不可控。潘辉等人^[9]研究了碱性条件下胺基螯合剂和 H_2O_2 对 Co 去除速率的影响。实验发现，Co 在碱性抛光液中易被氧化，进而表面钝化，溶解腐蚀可得到有效控制，但去除速率降低，甚至低于 Cu 的去除速率。针对上述问题，优化抛光液 pH 值到 9，发现螯合剂和 H_2O_2 协同作用也有效提高了 Co 的去除速率（56.7 nm/min），但对于 Co 充当插塞材料来说，去除速率仍相对较低。

如今对于 Co 充当插塞的研究相对较少。C. Wua

等人^[4]提出了 Co 插塞工艺的两步抛光过程——全局和局部化学机械抛光，并介绍了每一步抛光的要求，如图 1 所示。他们强调，在全局化学机械抛光中，除去覆盖层上大量的钴，并通过端点检测在阻挡层（Ti）处停止抛光，这要求有较高的 Co 去除速率及较好的 Co/Ti 选择比；在局部化学机械抛光期间，则要求更高的衬底去除率和较低的 Co/ILD 选择比。根据钴插塞全局抛光的要求，Wang 等人^[10]采用弱酸作为络合剂，与磨料以及抑制剂结合，分析了不同 pH 值（pH=7~12）对 Co 抛光性能的影响，实验虽得到较高的去除速率（500 nm/min），但没有研究抛光液对 Co/ILD（如 Ti 等）的速率选择比的影响，无法确定是否抛光可以再在阻挡层（Ti）处停止。Shi 等人^[11]采用 β 型丙氨酸与甘氨酸结合充当络合剂，用 H_2O_2 为氧化剂，加入硅溶胶磨料在 pH=7 时抛光 Co，最终达到更高的去除速率（ ~ 700 nm/min），但问题是这种情况下溶解速率也相对较高（ ~ 2 nm/min），表面腐蚀严重，反应不可控，无法有效达到平坦化要求。R. Popuriet 等人^[12]采用柠檬酸作为络合剂，对 Co 进行抛光，也得到了较高的去除速率（500 nm/min）和优异的抛光表面质量，但没有测试表面元素组成以及详细地分析 Co 的去除机制。

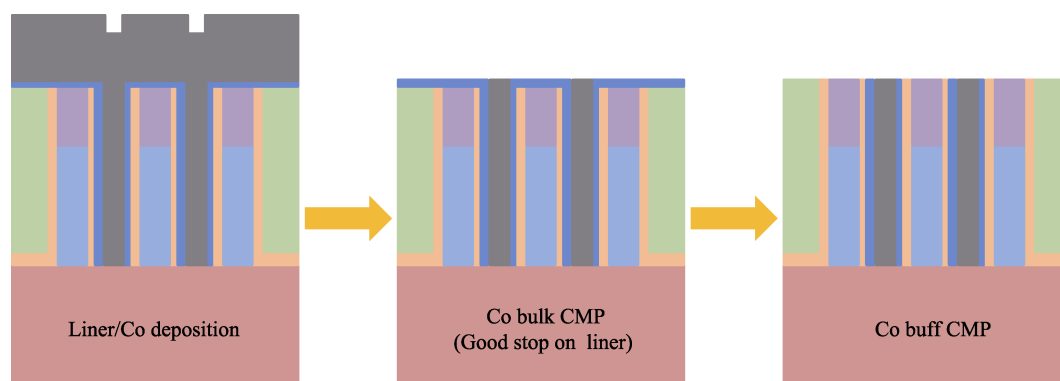


图 1 钴化学机械抛光工艺原理图

Fig.1 Schematic diagram of cobalt chemical mechanical polishing process

由此可见,研究人员一直在对不同络合剂对钴插塞全局抛光的影响进行研究,以达到钴插塞全局抛光的要求。因此,探索抛光液组分对 Co 抛光去除机制的影响尤为重要。

本团队一直致力于在碱性体系中研究胺基螯合剂 FA/O II 对钴 CMP 的作用。季军等人^[13]报告了螯合剂 FA/O II 在碱性抛光液中对钴作为阻挡层的去除速率的影响,证明了胺基螯合剂对于 Co 表面有较强的络合作用,可以有效提高 Co 的去除速率。洪姣等人^[14]采用螯合剂 FA/O II 清洗了进行化学机械抛光后的 Co 表面,证明了胺基螯合剂可以有效去除 CMP 清洗过程中 Co 的表面缺陷,提升平坦化效果。但 Co 充当插塞材料的全局化学机械抛光尚未有研究。

本文主要研究不同抛光液组分对钴插塞高去除速率(≥ 100 nm/min)和较好的 Co/Ti 去除选择比($\sim 100:1$)的影响,以实现 Co 的全局化抛光。并通过电化学实验、表面化学元素分析(XPS)详细揭示钴的去除机理。采用正交试验法找到抛光液最佳组分配比,并用原子力显微镜(AFM)对钴抛光前后的表面形貌进行观察,获得较好 Co 插塞抛光表面,实现平坦化。

1 实验

1.1 抛光实验及耗材

抛光实验采用 E460E 抛光机(Alpsitec Inc),抛光垫是 ROHM 公司生产的 Politex PAD。实验参数为:抛光压力 10346.64 Pa,抛光垫转速 93 r/min,抛光头

转速 87 r/min,抛光液流量 225 mL/min。实验前对抛光垫进行了 10 min 的清洗。将 2 kÅ Co(PVD)溅射在 250 Å Ti(PVD)薄膜层上,通过这种方法制备钴镀膜片(SKW Associates Inc),然后沉积在有 5 kÅ 热氧化物的 300 mm 硅材料上(见图 2)。抛光后用去离子水冲洗晶片,然后用 N₂ 气流干燥。每次抛光试验前后,用四点探针(Four Dimensions, Inc, 333 A)测量 81 个测试点的厚度,并计算其平均差值,确定钴抛光速率。每组实验重复三次,以保证数据准确性。

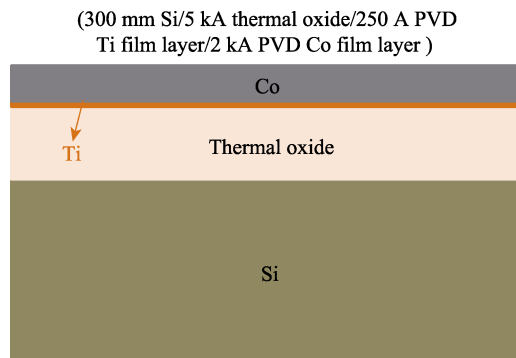


图 2 钴镀膜片示意图

Fig.2 Schematic diagram of cobalt film

本研究采用胶体二氧化硅(平均粒径为 85 nm)作为磨料,过氧化氢(质量分数为 30%)作为氧化剂, HNO₃ 和 KOH 调节抛光液 pH 值。FA/O II 螯合剂(天津晶岭微电子材料有限公司)的 pH 为 12.5,图 3 为其分子式,它是乙二胺四乙酸(EDTA)的衍生物,含有叔胺、羟基和乙醇等多个官能团。

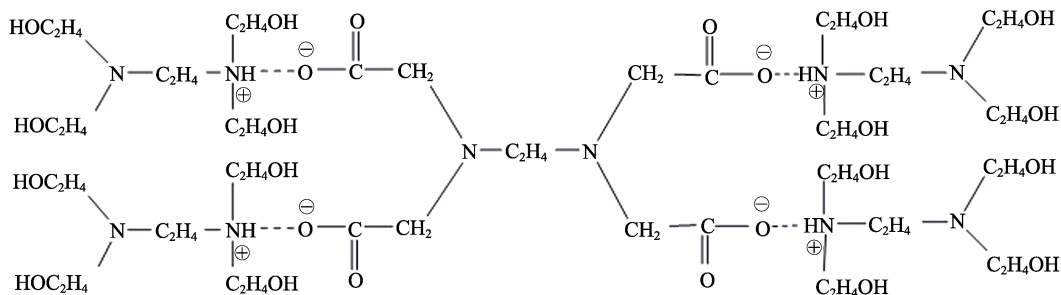


图 3 FA/O II 螯合剂的分子式

Fig.3 Molecular formula of FA/O II chelating agent

1.2 电化学实验

采用 200 mL、三电极池 CHI660E 电化学工作站,以饱和甘汞电极为参比电极,铂电极为对电极,厚度 5 mm 的块体 Co(99.99%, 1 cm×1 cm)为工作电极。实验溶液为去除二氧化硅颗粒的抛光液,以防止二氧化硅颗粒在钴表面吸附。每次实验前,用 2000#细砂纸打磨 Co 电极表面,用酒精擦去有机杂质后,再用去离子水冲洗,并 N₂ 气流干燥。扫描范围为-1~1 V,扫描时间为 600 s,测试 OCP-time 曲线。在 E_{OCP}±

300 mV 范围内,用 5 mV/s 扫描,测得动态电位极化曲线。通过线性塔菲尔拟合的阳极和阴极塔菲尔区的动电位极化曲线计算 J_{corr} (腐蚀电流密度)和 E_{corr} (腐蚀电位)。

1.3 X 射线光电子能谱和原子力显微镜测试

在不同抛光液(不含磨料,不断搅拌)中浸泡 Co 片(1 cm×1 cm) 10 min 后,用 X 射线光电子能谱仪(ESCALAB 250Xi, Thermo Scientific, 美国)进行表面元素检测,采用单色铝 K-αX 射线(1486.66 eV)。

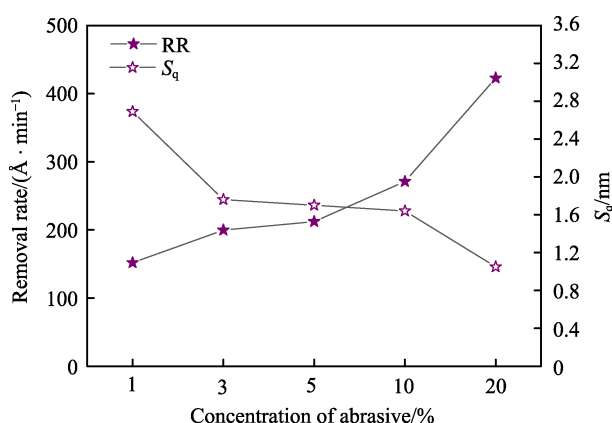
用安捷伦 5600 原子力显微镜对 Co 片表面粗糙度进行检测, 扫描范围为 $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ 。在每次测量之前, 用 DI 水冲洗钴片后, 用高纯氮干燥。

2 结果及分析

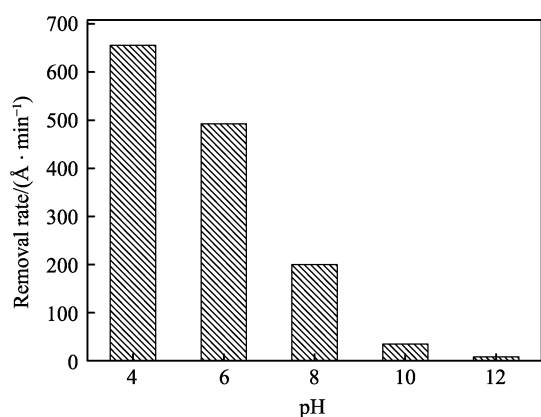
2.1 磨料浓度及 pH 对 Co 去除速率 (RR) 的影响

磨料浓度对 Co 去除率的影响如图 4a 所示, 抛光液 (pH=9.7) 磨料质量分数为 1%~20%。结果表明, 随磨料浓度的增大, 抛光速率升高。这是由于磨粒浓度随磨料浓度的增加而增大, 但由于磨粒含量不会加剧碱性浆料中钴的腐蚀, 只是使得钴表面有效磨料颗粒的数量增加, 使得抛光垫和 Co 表面之间的机械力增大。对抛光后的钴片进行 AFM 测试, 结果表明, 面粗糙度逐渐降低, 且在磨料质量分数在 3%~10% 时变化不大, 因此选择 3% 这一较低的磨料质量分数进行后续实验。

pH 值 (只含 3% 磨料) 对 Co 去除率的影响见图



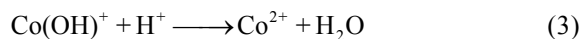
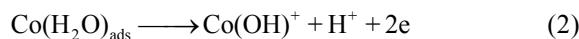
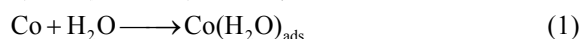
a 不同磨料浓度对 Co 去除速率及表面粗糙度的影响



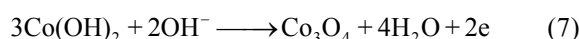
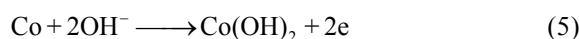
b 不同 pH 值对 Co 去除速率的影响

图 4 磨料浓度及 pH 对 Co 去除速率及表面粗糙度的影响
Fig.4 Effects of abrasive concentration and pH on Co removal rate and surface roughness: a) effect of different abrasive concentration on Co removal rate and surface roughness, b) effect of different pH on Co removal rate

4b。结果表明, 随 pH 值的升高, 抛光速率也大幅度降低。但酸性条件下, 钴溶解速率难以控制, 极易发生化学腐蚀而使界面腐蚀加重, 反应如公式 (1) — (3)。



在碱性条件下, Co 表面被氧化, 生成致密的钝化层。在 pH 为 8~12 时, Co 去除率相对酸性条件受限, 因此逐渐降低。尤其是在 pH=12 时, Co 表面被完全钝化, 去除速率降至 0 nm/min。反应如公式 (4) — (8)。因此为了保证较高的去除速率和较好的抛光后表面平整度, 接下来的实验选择弱碱性抛光液 (pH=8)。



2.2 不同浓度的氧化剂和螯合剂对 RR 和 Co/Ti 选择比的影响

如图 5 所示, 在 pH=8 的条件下, 抛光液由质量分数 3% 的磨料和不同浓度的氧化剂组成。随氧化剂浓度 (1~20 mL/L) 的升高, Co 和 Ti 的去除速率都逐渐增大。Ti 在空气中会与 O_2 反应, 公式如 (9)。在 pH 不变的条件下, H_2O_2 将 Co 二价离子氧化为三价, 并致使 OH^- 浓度增大, 见公式 (10) — (13)。

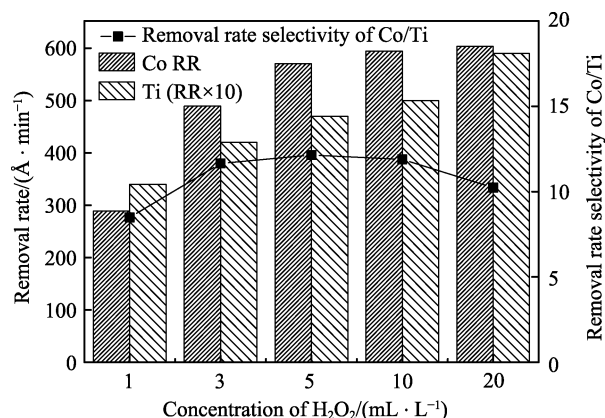
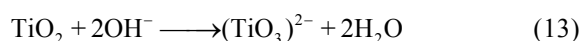
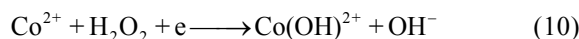


图 5 不同 H_2O_2 浓度及 pH 对 Co 去除速率的影响
Fig.5 Effects of different H_2O_2 concentrations and pH on Co removal rate

可见反应(10)促进了电离反应(公式(6))的正向进行,因此Co的去除速率逐渐增大。 OH^- 含量的增加促进 TiO_2 转化为 TiO_3^{2-} (公式(13)),因此Ti的去除速率有所提升,Co/Ti去除选择比也随之逐渐增大。但当氧化剂含量在10~20 mL/L时,Co/Ti选择比开始减小,说明此时Ti的去除率上升幅度开始超过Co。

如图6所示,pH为8,抛光液由质量分数3%的磨料和不同浓度的螯合剂组成。随着FA/O II从5 mL/L增加到20 mL/L,Co和Ti的去除率逐渐增大,选择比也逐渐增大;但当螯合剂浓度进一步增加到50 mL/L时,Co和Ti的去除速率都开始呈下降趋势,选择比也大幅度降低。速率的提升很可能是由于FA/O II中的有机大分子与Co(II)和 TiO_2 的络合作用,生成了易去除的水溶性络合物,在下面的XPS实验中会进一步详细分析。当螯合剂达到一定浓度(20 mL/L)时,表面参与反应的FA/O II浓度达到饱和,因此络合反应也会达到饱和。并且由于FA/O II具有一定的粘附性,造成螯合剂在材料表面堆积^[13],导致抛光速率下降,并且从图中可见其对Co的影响较大,因此Co/Ti去除选择比也减小。

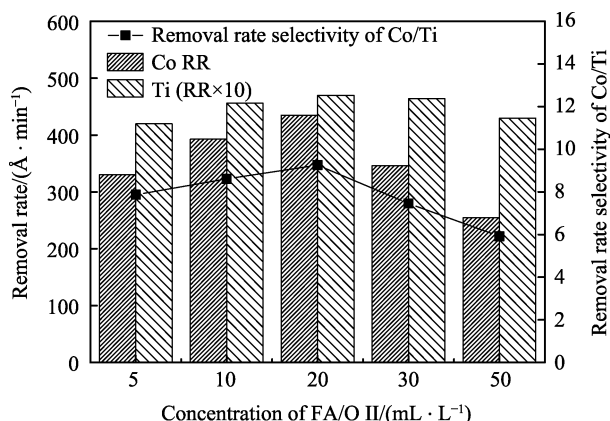


图6 不同FA/O II浓度及pH对Co去除速率的影响
Fig.6 Effects of different FA/O II concentrations and pH on Co removal rate

2.3 正交试验

正交试验方法具有均匀的分散和可比性,可以优化各种因素和不同层次的复杂实验项目^[15,16]。在上述单因素实验结果的基础上,进一步分析了在极低浓度的磨料、氧化剂和螯合剂的情况下,这些主要因素的影响,并找到最佳抛光液配比。实验采用四因素三水平,具体见表1。

为满足钴插塞全局化学机械抛光的要求,选取Co RR、Ti RR和Co/Ti选择比这3个指标作为研究对象,实验方案和结果列于表2。采用距离分析法对正交实验结果进行分析。首先要定义四个参数 $k1j$ 、

$k2j$ 、 $k3j$ 、 Rj ,其中: $k1j$ 、 $k2j$ 、 $k3j$ 为每个因子 j ($j=A$ 、 B 、 C 、 D)中三个水平的总和的平均值, Rj 是影响因子的主导度,是 $k1j$ 、 $k2j$ 、 $k3j$ 在某一因素上的最大值与最小值之差。

表1 因素和水平
Tab.1 Factors and levels

Level	Factors			
	A(Abrasive)/%	B(pH)	C(FA/O II)/(mL·L ⁻¹)	D(H ₂ O ₂)/(mL·L ⁻¹)
1	1	8	10	1
2	3	9	20	3
3	5	10	30	5

表2 正交试验设计表
Tab.2 Orthogonal test table

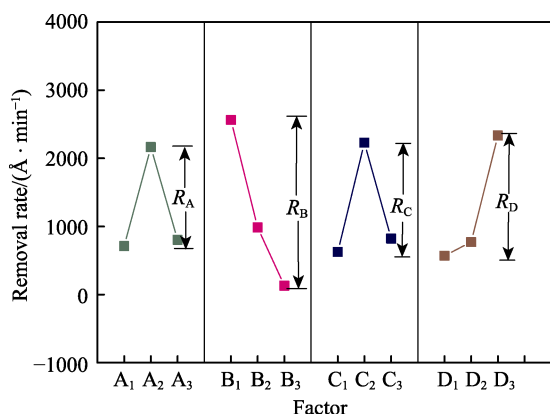
Slurry No.	Factor/Level				Result		
	A	B	C	D	Co RR/(Å·min ⁻¹)	Ti RR/(Å·min ⁻¹)	Selectivity
1	1	1	1	1	792.265	45.487	17:1
2	1	2	2	2	1019.52	50.725	20:1
3	1	3	3	3	322.505	43.945	7:1
4	2	1	2	3	5615.64	53.424	105:1
5	2	2	3	1	864.815	49.54	17:1
6	2	3	1	2	15.525	41.925	0.37:1
7	3	1	3	2	1281.57	51.487	25:1
8	3	2	1	3	1071.325	50.817	21:1
9	3	3	2	1	53.85	42.214	1.28:1

图7展示了各参数的影响曲线,从而可以获得更直观的理解。结果表明,各因素对Co RR的影响有 $B>D>A>C$,对Ti RR有 $B>D>C>A$,对选择比有 $B>D>C>A$ 。由此可知,pH(因子B)是影响三个指标的最重要因素。氧化剂(因子D)对三个指标的影响为第二,螯合剂(因子C)对Co RR和Co/Ti选择比的影响较大。磨料含量(A因子)的影响可忽略不计,因为其值很低(质量分数仅为3%)。

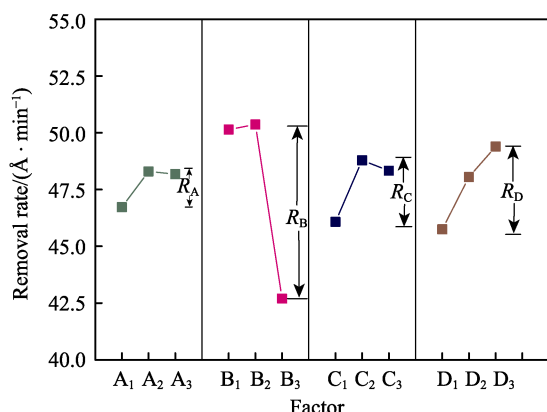
由以上分析可知,试验4的 $A_2B_1C_2D_3$ 方案是最佳方案,Co RR为最大值5615.64 Å/min, Ti RR为53.424 Å/min, Co/Ti选择比为105:1(~100:1)。与单因素条件下对比可见, H_2O_2 和FA/O II的交互作用大幅度增大了Co RR以及Co/Ti选择比,对满足钴插塞全局抛光中需要有相对高的Co去除速率以及好的Co/Ti选择比的要求有较大的促进作用。

2.4 机理分析

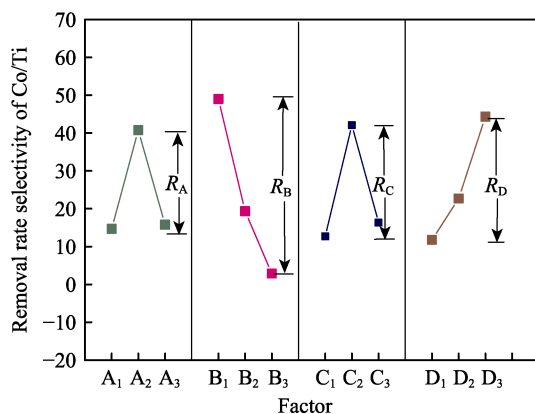
为进一步证明螯合剂的作用,对Co插塞表面进行XPS实验。准备了两种抛光液,均含3%磨料和



a Co去除速率



b Ti去除速率



c Co/Ti 选择比

图 7 各参数的影响曲线

Fig.7 Influence curve of each parameter: a) Co removal rate, b) Ti removal rate, c) Co/Ti selection ratio

5 mL/L H_2O_2 , pH=8, 其中 Sample I 不含 FA/O II, Sample II 含 20 mL/L FA/O II。

从图 8 可以看出,不添加螯合剂的 Sample I 图谱中几乎没有 N1s 峰,而含有螯合剂的 Sample II 图谱中可以发现明显的 N1s 峰。这说明 Co 表面残留了未及时除去的 Co-FA/O II 络合物或未反应的螯合剂。

为进一步证明络合物的产生,对 Co $2P_{3/2}$ 进行分峰处理,如图 9 所示。结果表明,在添加螯合剂后,CoOOH 对应的峰消失,新出现了一个在标准能谱中找不到对应峰值的 782.6 eV 峰,很有可能是 CoOOH

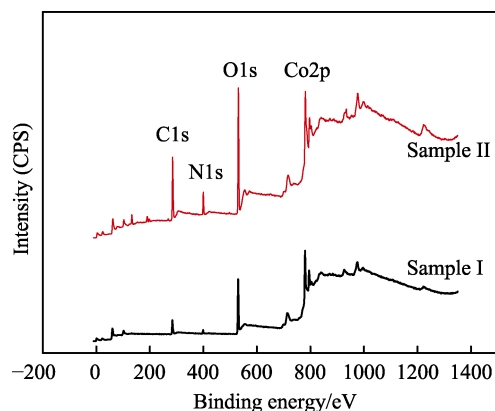
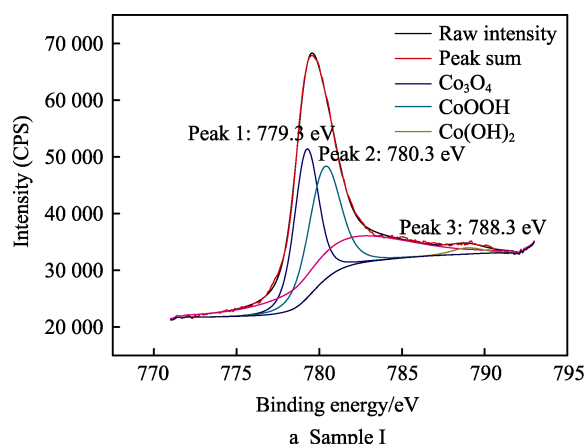
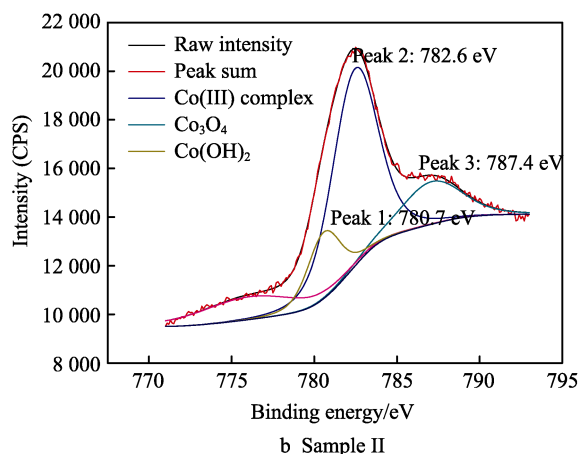


图 8 XPS 全谱图

Fig.8 Full spectrum diagram of XPS



a Sample I



b Sample II

图 9 Co $2P_{3/2}$ XPS 分峰图Fig.9 Co $2P_{3/2}$ XPS peak map

与螯合剂发生了络合反应生成了对应的络合物,增强了钴的去除。其反应如下:



为了进一步证明上述关于钴表面络合作用的猜想,对用正交实验得到的最佳配比抛光 Co 表面并进行 AFM 测试,如图 10b 所示。与未抛光的表面(图 10a)进行对比,面粗糙度由原本的 3.14 nm 降低到 0.637 nm,表面平整度较好。

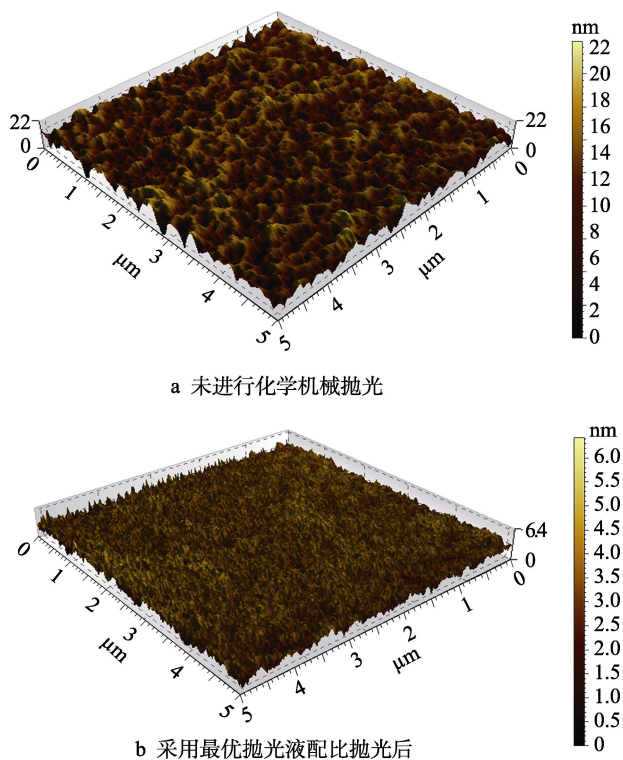


图10 钴的AFM图像

Fig.10 AFM images of Co: a) before CMP, b) after CMP at optimum polishing liquid ratio

3 结论

1) 随磨料的增加, Co RR 逐渐增大; 随 pH 的升高, Co RR 逐渐降低。

2) 当磨料质量分数为 3%, pH 固定在 8 时, 随 H_2O_2 浓度增大, Co RR 随之增大; FA/O II 浓度增大, Co RR 先升后降, 在 20 mL/L 时达到最大值。

3) 通过正交试验找到抛光液最佳配比及条件: 磨料质量分数为 3%, H_2O_2 为 5 mL/L, FA/O II 为 20 mL/L, pH 为 8。在这一配比及条件下, 实现了钴的高去除率(5615.64 Å/min)、高 Co/Ti 选择比(105:1)以及较好的表面平整度。

参考文献:

- [1] JOSELL D, BRONGERSMA S H, TOKEI Z. Size-dependent resistivity in nanoscale interconnects[J]. Annual review of materials research, 2009, 39(39): 231-254.
- [2] BABU S. Advances in chemical mechanical planarization (CMP)[M]. Britain: Woodhead Publishing, 2016.
- [3] CHEN H C, STANDAERT T E, ALPTEKIN E, et al. Interconnect performance and scaling strategy at 7 nm node[C]// IEEE International interconnect technology conference. [s. l.]: IEEE, 2014: 93-96.
- [4] WU C, HAN J H, SHI X, et al. Cobalt CMP development for 7 nm logic device[J]. Ecs transactions, 2017, 77(5): 93-97.
- [5] SHI X, SIMPSON D E, ROY D. The role of chemisorbed hydroxyl species in alkaline electrocatalysis of glycerol on gold[J]. Physical chemistry chemical physics, 2015, 17(17): 11432-11444.
- [6] SHI X, SIMPSON D E, ROY D. Tribo-electrochemical characterization of Ru, Ta and Cu CMP systems using percarbonate based solutions[J]. Journal of solid state science & technology, 2015, 4(11): 5058-5067.
- [7] SHI X, ROCK S E, TURK M C, et al. Minimizing the effects of galvanic corrosion during chemical mechanical planarization of aluminum in moderately acidic slurry solutions[J]. Materials chemistry & physics, 2012, 136(2-3): 1027-1037.
- [8] 鲁海生. 新型铜互连阻挡层 Co/TaN 的化学机械抛光研究[D]. 上海: 复旦大学, 2013.
LU Hai-sheng. Research on chemical mechanical polishing of new copper interconnect barrier Co/TaN[D]. Shanghai: Fudan University, 2013.
- [9] 潘辉, 王胜利, 张乐, 等. H_2O_2 基的碱性阻挡层抛光液 Co CMP 的影响[J]. 半导体技术, 2016(1): 42-45.
PAN Hui, WANG Sheng-li, ZHANG Le, et al. The effect of H_2O_2 based alkaline barrier polishing slurry on Co CMP[J]. Semiconductor technology, 2016(1): 42-45.
- [10] WANG L, MISHRA A, MAHULIKAR D, et al. Polishing compositions and methods for polishing cobalt films: European Patent, EP2995662[P]. 2017.
- [11] SHI X, SCHLUETER J A, O'NEILL M L. Chemical mechanical polishing (CMP) of cobalt-containing substrate: US, 20160027657 A1[P]. 2016.
- [12] POPURI R, SAGI K V, ALETY S R, et al. Citric acid as a complexing agent in chemical mechanical polishing slurries for cobalt films for interconnect applications[J]. Ecs journal of solid state science and technology, 2017, 6(9): 594-602.
- [13] JI J, PAN G, ZHANG W, et al. Role of additive in alkaline slurries for Co CMP[J]. Ecs journal of solid state science and technology, 2017, 6(12): 813-818.
- [14] HONG J, NIU X, LIU Y, et al. Effect of a novel chelating agent on defect removal during post-CMP cleaning[J]. Applied surface science, 2016, 378: 239-244.
- [15] ZUO W, JIA Q E, LIU X, et al. Orthogonal experimental design and fuzzy grey relational analysis for emitter efficiency of the micro-cylindrical combustor with a step[J]. Applied thermal engineering, 2016, 103: 945-951.
- [16] LEYTON A, PEZOA C R, BARRIGA A, et al. Identification and efficient extraction method of phlorotannins from the brown seaweed macrocystis pyrifera, using an orthogonal experimental design[J]. Algal research, 2016, 16: 201-208.