

高磁电阻磁性隧道结的几种微制备方法研究^{*}

李飞飞 张谢群 杜关祥 王天兴 曾中明 魏红祥 韩秀峰[†]

(中国科学院物理研究所磁学国家重点实验室 北京 100080)

(2004 年 11 月 11 日收到 2005 年 3 月 30 日收到修改稿)

利用金属掩模法优化了制备磁性隧道结的实验和工艺条件,金属掩模的狭缝宽度为 100 μm . 采用 4 nm 厚的 $\text{Co}_{75}\text{Fe}_{25}$ 为铁磁电极和 1.0 或 0.8 nm 厚的铝氧化物为势垒膜,直接制备出了室温隧穿磁电阻(TMR)为 30%—48% 的磁性隧道结,其结构为 $\text{Ta}(5\text{ nm})/\text{Cu}(25\text{ nm})/\text{Ni}_{79}\text{Fe}_{21}(5\text{ nm})/\text{Ir}_{22}\text{Mn}_{78}(10\text{ nm})/\text{Co}_{75}\text{Fe}_{25}(4\text{ nm})/\text{AlO}_x(0.8\text{ nm})/\text{O}/\text{Co}_{75}\text{Fe}_{25}(4\text{ nm})/\text{Ni}_{79}\text{Fe}_{21}(20\text{ nm})/\text{Ta}(5\text{ nm})$. 同时,利用刻槽打孔法和去胶掀离法两种光刻技术并结合 Ar^+ 离子束刻蚀及化学反应刻蚀,制备出面积在 $4\text{ }\mu\text{m} \times 8\text{ }\mu\text{m}$ — $20\text{ }\mu\text{m} \times 40\text{ }\mu\text{m}$ 、具有室温高 TMR 和低电阻的高质量磁性隧道结. $300\text{ }^\circ\text{C}$ 退火前后其室温 TMR 可分别达到 22% 和 50%. 研究结果表明,采用光刻中的刻槽打孔或去胶掀离工艺方法制备的小尺寸磁性隧道结,可用于研制磁动态随机存储器 and 磁读出头及其他传感器件的磁敏单元.

关键词:磁性隧道结,隧穿磁电阻,金属掩模法,光刻法

PACC: 7340G, 7570P, 7550R, 7340R

1. 引言

1975 年,法国学者 Julliere 利用金属掩模法制备出 $\text{Fe}/\text{Ge}/\text{Co}$ 结构的磁性隧道结,此后的十几年中,一些学者一直致力于磁性隧道结制备工艺条件的探索,但由于所制得磁性隧道结低温和室温隧穿磁电阻(TMR)较低(室温 $\text{TMR} \leq 1\%$),一直未受到应有的重视^[1-5]. 直到 1995 年具有室温高 TMR 的磁性隧道结被制备出来,它才成为人们高度关注的焦点^[4,6]. 这是因为只有具有室温高 TMR、低结电阻和低自由层偏转场的磁性隧道结,才能适用于计算机磁读出头^[7-9]、磁动态随机存储器(MRAM)^[10-13]和其他磁敏感器件方面. 用于硬盘驱动器磁读出头的磁性隧道结材料一般要求达到 $\text{TMR} \geq 20\%$,而结电阻和结面积的积矢(RS)约在 $10\text{ }\Omega\mu\text{m}^2$ 量级,自由层的偏转场低于或接近于 796 A/m ;用于 MRAM 的磁性隧道结材料一般要求达到 $\text{TMR} \geq 30\%$,而 RS 约在 $1\text{—}50\text{ k}\Omega\mu\text{m}^2$ 之间,自由层的偏转场约在 $79.6\text{—}7960\text{ A/m}$ 之间. 目前实验室水平下的计算机 TMR 磁读出头样机已能使磁记录密度提高到 26.35 Gb/cm^2 以

上,到 2004 年 IBM, Motorola, NEC 和东芝公司利用磁性隧道结还分别成功地制备出了 16 A 和 1 Mb 的 MRAM. 国际上一些知名公司投入数十亿美元的资金,正在继续开发实用型的 256 Mb 的 MRAM. 实用型的 MRAM 如果开发成功,将会造就数千亿美元的潜在市场. 磁性隧道结中发现的 TMR 效应和金属多层膜中发现的巨磁电阻(GMR)效应及其应用,极大地推动了高速、高密度、高稳定、不挥发、低成本的信息技术及其新材料的发展,也促进了自旋电子学这一新兴学科的形成和对自旋电子学新材料及新器件的进一步深入研究^[14,15]. 目前,对磁性隧道结中的 TMR 效应^[16-20]、磁激子和声子激发^[21]、量子阱效应^[22,23]、自旋极化电子的分离和注入^[24]、自旋极化电子隧穿理论的研究^[25-30]、磁性隧道结材料及应用^[31-33]以及自旋极化电子在其他纳米线和器件里隧穿效应的研究等^[34]仍然是备受关注的研究课题.

目前,用于制备微米、亚微米和纳米磁性隧道结、磁性隧道结阵列、TMR 磁读出头和 MRAM 方法有光刻和电子束曝光以及离子束刻蚀、化学反应刻蚀、聚焦离子束刻蚀等,其中光刻技术结合离子束刻蚀是微加工工艺中具有较低成本、可大规模生产的

^{*} 国家重点基础研究发展规划(批准号:2001CB610601)、国家杰出青年科学基金(批准号:50325104)和国家自然科学基金(批准号:10274103)资助的课题.

[†] E-mail: xfhan@aphy.iphy.ac.cn

首选工艺.因此研究光刻技术结合离子束刻蚀方法制备磁性隧道结,通过优化实验条件,制备出高质量的微米和亚微米磁性隧道结具有很大的实际应用意义.另外,在优化制备磁性隧道结的工艺条件时,金属掩模法仍具有低成本、省时省力、见效快的优点.一般情况下,利用狭缝宽度为 $60\text{--}100\ \mu\text{m}$ 的金属掩模法从制备磁性隧道结样品到完成 TMR 测试,只须 $3\text{--}6\ \text{h}$.因此金属掩模法制备磁性隧道结,既可用于快速优化实验和工艺条件,也可以作为采用复杂工艺和技术制备微米、亚微米或纳米磁性隧道结之前的预研制方法.

在本文中,我们分别给出了利用金属掩模法和光刻技术结合离子束刻蚀法制备磁性隧道结的优化工艺条件和典型的实验结果.我们采用 $\text{Co}_{75}\text{Fe}_{25}$ 合金膜作为磁性隧道结的上下铁磁电极,厚度为 $25\ \text{nm}$ 左右的 Cu 膜作为导电层,利用金属掩模法直接获得了室温 TMR 为 $30\%\text{--}48\%$, R_S 约为 $20\text{--}50\ \text{k}\Omega\mu\text{m}^2$ 的磁性隧道结;利用光刻和离子束刻蚀技术制备法,获得了室温 TMR 为 $30\%\text{--}50\%$, R_S 为 $4\text{--}20\ \text{k}\Omega\mu\text{m}^2$ 的高质量磁性隧道结.

2. 金属掩模法及其实验结果和讨论

图 1 给出一种用金属掩模法制备磁性隧道结的工艺流程.首先将 Cu 导电层、钉扎层和下部磁电极等通过第一个条形的、狭缝宽度为 $100\ \mu\text{m}$ 的金属掩模,沉积到热氧化硅 $\text{Si}(100)/\text{SiO}_2$ 衬底上,得到底部电极 $\text{Ta}(5\ \text{nm})/\text{Cu}(25\ \text{nm})/\text{Ni}_{79}\text{Fe}_{21}(5\ \text{nm})/\text{Ir}_{22}\text{Mn}_{78}(10\ \text{nm})/\text{Co}_{75}\text{Fe}_{25}(4\ \text{nm})$,然后将样品从磁控溅射仪中取出,更换第二个方形、孔边长为 $800\ \mu\text{m}$ 的金属掩模.将样品送入金属 Al 沉积和氧化室,溅射 $1.0\ \text{nm}$ 厚的 Al 膜后,在 $1.0\ \text{Pa}$ 的 Ar 和 O 的混合气体氛围中,用等离子体氧化方法氧化 Al 膜 $60\ \text{s}$,形成势垒层 $\text{Al}(1.0\ \text{nm})\text{-O}$.再将样品从磁控溅射仪中取出,更换第三个条形的、狭缝宽度为 $100\ \mu\text{m}$ 的金属掩模.最后将样品送入磁性膜沉积室,溅射上部电极 $\text{Co}_{75}\text{Fe}_{25}(4\ \text{nm})/\text{Ni}_{79}\text{Fe}_{21}(20\ \text{nm})/\text{Ta}(5\ \text{nm})$,形成十字形的磁性隧道结.每个金属掩模尺寸为 $25\ \text{mm}\times 25\ \text{mm}$.每一个 $25\ \text{mm}\times 25\ \text{mm}$ 衬底上可一次性制备 14 个磁性隧道结.

最终磁性隧道结的结构为: $\text{Ta}(5\ \text{nm})/\text{Cu}(25\ \text{nm})/\text{Ni}_{79}\text{Fe}_{21}(5\ \text{nm})/\text{Ir}_{22}\text{Mn}_{78}(10\ \text{nm})/\text{Co}_{75}\text{Fe}_{25}(4\ \text{nm})/\text{Al}(1.0\ \text{nm})\text{-O}/\text{Co}_{75}\text{Fe}_{25}(4\ \text{nm})/\text{Ni}_{79}\text{Fe}_{21}(20\ \text{nm})/\text{Ta}(5$

$\text{nm})$.利用四探针法测量室温下的 TMR-磁场曲线和 TMR-直流偏压曲线.

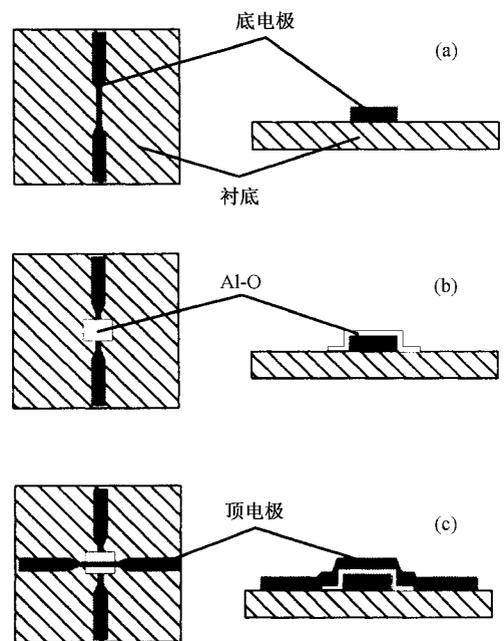


图 1 一种金属掩模法制备磁性隧道结的工艺流程图 (a)沉积底电极 (b)沉积 Al 膜并氧化 (c)沉积底电极

图 2 和图 3 给出了室温时经过优化工艺条件制备出的磁性隧道结其 TMR 在 $\pm 79.6\ \text{kA/m}$ 磁场范围内随外加磁场的变化曲线.该磁性隧道结的结面积 S 为 $100\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$,测量偏压 V_{DC} 为 $1\ \text{mV}$,温度 $300\ \text{K}$ 时, TMR 在沉积状态下直接达到 41.5% ,两铁磁电极平行时的结电阻 R_p 为 $1.87\ \Omega$, R_S 为 $18.7\ \text{k}\Omega\mu\text{m}^2$,自由层的偏转场为 $493.5\ \text{A/m}$,并且在外加磁场从 $366.2\ \text{A/m}$ 增加到 $493.5\ \text{A/m}$ 时室温 TMR 从 0.5% 跳跃增加到 33.5% ,磁场灵敏度达到 $0.26\% \cdot \text{m}\cdot\text{A}^{-1}$.

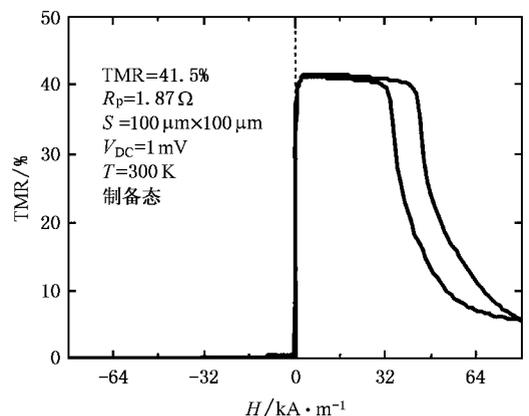


图 2 室温下磁性隧道结 TMR 随外加磁场的变化曲线

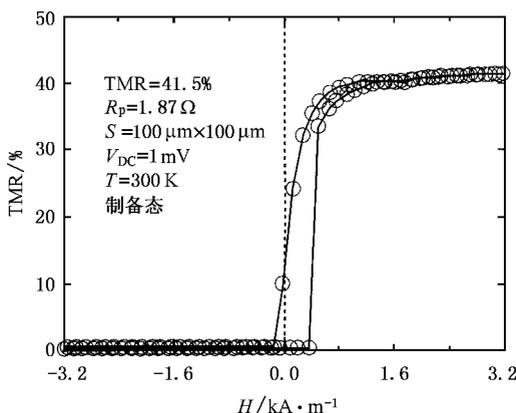


图3 室温下磁性隧道结 TMR 在低磁场下的变化曲线

3. 光刻技术结合 Ar 离子束和化学反应刻蚀的刻槽和打孔工艺

首先利用磁控溅射方法,将磁性多层膜 Ta(5 nm)/Ni₇₉Fe₂₁(3 nm)/Cu(20 nm)/Ni₇₉Fe₂₁(3 nm)

Ir₂₂Mn₇₈(10 nm)/Co₇₅Fe₂₅(4 nm)/Al(0.8 nm)/O/Co₇₅Fe₂₅(4 nm)/Ni₇₉Fe₂₁(20 nm)/Ta(5 nm)在磁控溅射仪中沉积到热氧化硅 Si(100)/SiO₂ 衬底上. 所有纳米金属膜的溅射沉积,均在本底真空为 3 × 10⁻⁶ Pa 的磁控溅射仪中连续完成. 当 0.8 nm 厚的 Al 膜在沉积和氧化室里沉积完毕后,在 1.0 Pa 的 Ar 和 O 的混合气体氛围中,用等离子体氧化方法氧化 Al 膜 40—60 s,形成势垒层 Al(0.8 nm)-O.

利用光刻和离子束刻蚀及化学反应刻蚀技术,采用刻槽和打孔工艺,获得 30 μm × 30 μm 至 5 μm × 5 μm 大小的磁性隧道结阵列. 刻槽和打孔工艺如图 4 所示. 首先用金属掩模沉积出一组形状为长条形(如 1200 μm × 400 μm)的、规则排列的磁性隧道结薄膜阵列. 然后通过第一次涂胶、光刻板掩模紫外曝光、Ar 离子刻蚀和去胶工艺,如图 4(a)~(c)所示. 在磁性隧道结膜的中间部位,通过刻槽方式获得所需要的孤岛状磁性隧道结. 结区的图形由光刻板掩模图形决定,可以选为长方形、椭圆形或其他形状. 环绕孤岛状磁性隧道结的槽的深度超过 Al₂O₃ 和底

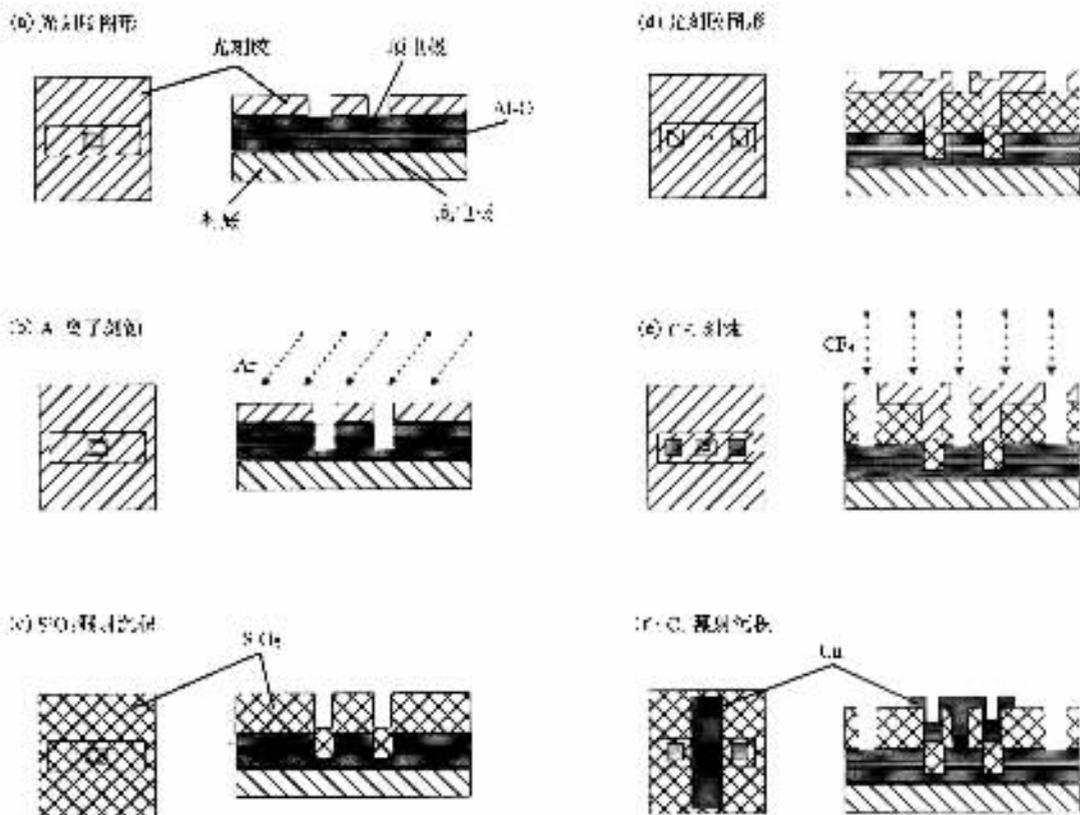


图4 一种利用光刻技术中的刻槽和打孔工艺方法制备磁性隧道结的工艺过程 (a)第一次涂胶和紫外曝光后获得磁性隧道结图形 (b) Ar 离子刻蚀, (c) 去胶然后沉积 SiO₂ 绝缘层隔离和掩埋隧道结, (d) 第二次涂胶和紫外曝光获得磁性隧道结上部导电孔和两边导电电极接触孔的图形 (e) 化学反应刻蚀及 Ar 离子辅助刻蚀 (f) 去胶然后沉积 Cu 和 Au 导电电极

部铁磁层(如 $\text{Al}(0.8\text{ nm})\text{-O}/\text{Co}_{75}\text{Fe}_{25}(4\text{ nm})$)即可.接着去胶后通过沉积 SiO_2 绝缘层来隔离和掩埋隧道结.图 4(d)为通过第二次涂胶后,利用第二个光刻版掩模经过紫外曝光获得磁性隧道结上部导电孔和两边电极接触孔的图形.图 4(e)为利用化学反应刻蚀快速去除磁性隧道结上部导电孔和两边电极接触孔中的 SiO_2 ,然后通过 Ar 离子辅助刻蚀获得良好的金属接触面.图 4(f)为去胶后再通过第二个金属掩模直接沉积 Cu 和 Au 导电电极.最后上下两个铜导电电极形成十字形,每个孤岛状的磁性隧道结位于十字形结的中心.利用我们设计的一套金属和光刻掩模版,每个 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 衬底上,可一次性制备 81 个不同尺寸的磁性隧道结.通过四探针法测量室温下的 TMR- H 曲线和 TMR- V_{DC} 曲线等,可以初步检测磁性隧道结的性质.变温和低温下的 TMR 等数据可用量子超导磁强计或物性测量系统测得.

图 5 给出室温下 TMR 在 $\pm 79.6\text{ kA/m}$ 磁场范围内随外加磁场的变化曲线.图 6 给出室温下同一个磁性隧道结的 TMR 随外加低磁场的变化曲线.真空热处理为 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 退火 1 h.退火前后磁性隧道结的室温 TMR, R_p , RS 及自由层的偏转场分别为 22% 和 50%, 31 和 41 Ω , 3.1 和 4.1 $\text{k}\Omega\mu\text{m}^2$, 2.07 和 1.87 kA/m .退火前外加磁场从 1.70 kA/m 增加到 2.07 kA/m 时,室温 TMR 从 4.5% 跳跃增加到 20.6%,

磁场灵敏度达到 $0.04\% \text{ m} \cdot \text{A}^{-1}$;热处理后外加磁场从 1.59 kA/m 增加到 1.87 kA/m 时,室温 TMR 从 5.8% 跳跃增加到 48.0%, 磁场灵敏度达到 $0.15\% \text{ m} \cdot \text{A}^{-1}$.退火有效地减小了自由层的偏转场,提高了磁电阻比值和磁场灵敏度.

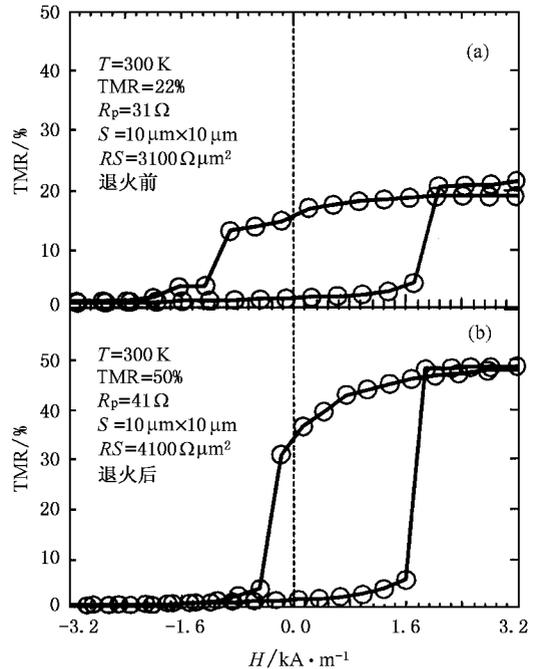


图 6 室温下磁性隧道结的 TMR 随外加小磁场的变化曲线 (a)退火前 (b)退火后

4. 光刻技术结合离子束刻蚀的去胶掀离 (lift-off) 工艺法

首先利用磁控溅射仪在热氧化硅 Si/SiO_2 衬底上沉积多层膜 $\text{Ta}(5\text{ nm})/\text{Cu}(30\text{ nm})/\text{Ni}_{79}\text{Fe}_{21}(5\text{ nm})/\text{IrMn}(10\text{ nm})/\text{Co}_{75}\text{Fe}_{25}(4\text{ nm})/\text{Al}(1\text{ nm})\text{-O}/\text{Co}_{75}\text{Fe}_{25}(4\text{ nm})/\text{Ni}_{79}\text{Fe}_{21}(20\text{ nm})/\text{Cu}(20\text{ nm})/\text{Ta}(5\text{ nm})$.主沉积室本底真空优于 $6 \times 10^{-7}\text{ Pa}$,金属 Al 沉积和氧化室本底真空优于 $3 \times 10^{-6}\text{ Pa}$.整个薄膜的制备都是在高真空的环境下进行的. Al-O 势垒层是在 1.0 Pa 的 Ar 和 O 的混合气体氛围中,用等离子体氧化方法氧化 Al 膜 50 s 形成的.衬底可以选择 $25\text{ cm} \times 25\text{ cm}$, $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 和 $100\text{ cm} \times 100\text{ cm}$ 热氧化硅硅片 Si/SiO_2 .

在实验中,我们选用 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 热氧化硅衬底和若干配套的光刻版.利用这些配套光刻版可以制备结区面积在 $4\text{ }\mu\text{m} \times 8\text{ }\mu\text{m}$ — $20\text{ }\mu\text{m} \times 40\text{ }\mu\text{m}$ 或 5

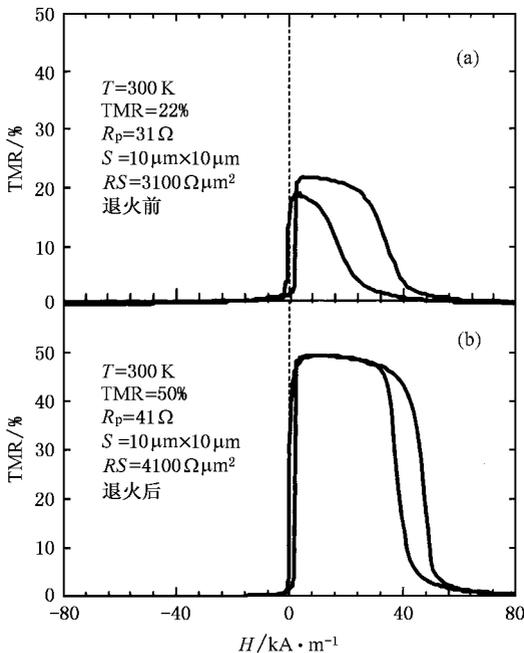


图 5 室温下磁性隧道结的 TMR 随外加磁场的变化曲线 (a)退火前 (b)退火后

$\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ — $15 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$ 大小的磁性隧道结. 利用去胶剥离法对磁性隧道结多层膜进行光刻加工, 每一轮工艺一般包括涂胶、曝光、显影、刻蚀、去胶等步骤. 例如, 第一次通过光刻掩模和紫外曝光及 Ar 离子刻蚀, 可在 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 热氧化硅衬底上加工出 450 个条状的磁性隧道结薄膜, 图 7(a) 所示为其中一个条状磁性隧道结薄膜. 紧接着进行第二个微加工过程, 以达到磁性隧道结结区图形化. 实验中可以设定不同形状和尺寸的结区, 图 7(b) 所示为第二次涂胶、紫外曝光、显影后的光刻胶图案. 然后将样品放入 Ar 离子刻蚀机中用 Ar 离子束以一定的倾角对薄膜进行刻蚀, 加工出面积分布在 $4 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ — $20 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ 范围内的各种不同尺寸的结区, 如图 7(c) 所示. 第二次 Ar 离子刻蚀后并不去胶, 根

据隧道结薄膜的厚度和实际需要, 直接将样品放入磁控溅射仪沉积 100 — 200 nm 左右的 SiO_2 , 如图 7(d) 所示. SiO_2 用于隔开底部导电层和后来要沉积的顶部导电层, 使底部导电层和顶部导电层只能通过磁性隧道结连接. 沉积 SiO_2 后, 再将样品放入丙酮中去胶, 即用去胶剥离法将结区和底部导电层导通孔上方的 SiO_2 剥离掉, 如图 7(e) 所示, 使结区和顶部导电层能够导通. 再将样品放入磁控溅射仪沉积 150 nm 左右的 Cu 作为顶部导电层, 接着进行第三次涂胶并利用第三块光刻版进行紫外曝光, 显影后光刻胶图案如图 7(f) 所示. 放入刻蚀机中用 Ar 离子刻蚀出顶部导电层及底部导电层导通孔形状, 如图 7(g) 所示. 最后用丙酮去胶得到图 7(h) 所示的十字

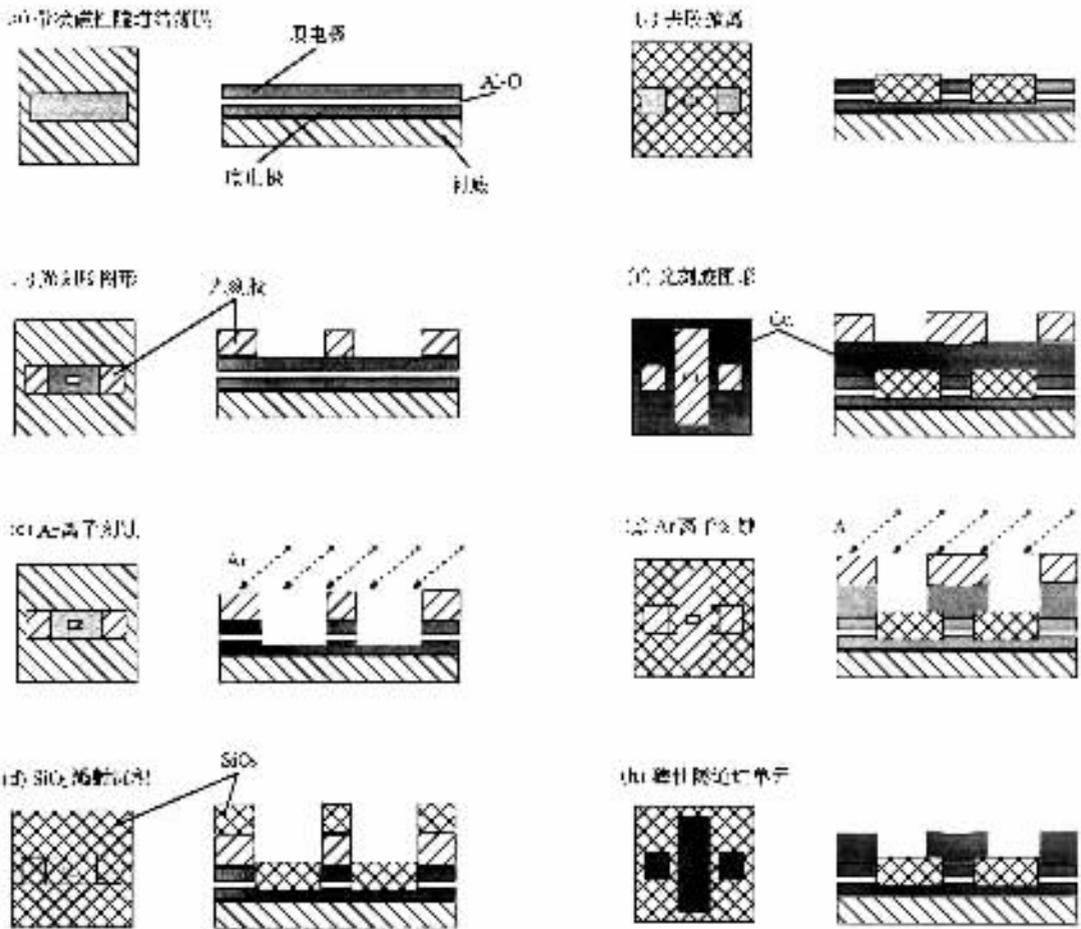


图 7 一种利用光刻去胶剥离法制备磁性隧道结的工艺流程图 (a)热氧化硅衬底上的磁性隧道结薄膜经过第一次涂胶、曝光和 Ar 离子刻蚀后, 加工出 450 个长条状的磁性隧道结薄膜(图中为其中一个)(b)第二次涂胶、曝光和显影后的光刻胶图案, 即磁性隧道结结区图形化;(c)第二次 Ar 离子刻蚀, 刻蚀后不去胶;(d)沉积 SiO_2 绝缘隔离层;(e)将样品置入丙酮中去胶剥离(f)沉积顶部 Cu 导电层后, 经过第三次涂胶、紫外曝光和显影所得的光刻胶图形;(g)Ar 离子刻蚀获得顶部导电层及底部导电层导通孔形状(h)将样品置入丙酮中去胶后即可获得 450 个十字形的磁性隧道结(图中显示其中一个)

形磁性隧道结单元。

将做好的磁性隧道结放入退火炉中,在 79.6 kA/m 的取向磁场和 290 °C 温度下退火 1 h. 用四探针法分别测量退火处理前后磁性隧道结在室温下的 TMR- H 曲线。

图 8 和图 9 分别给出退火处理前后磁性隧道结的 TMR 在 -24—24 kA/m 磁场范围内随外加磁场的变化曲线. 退火处理后, R_p 和 RS 都有所增加, 自由层反转场为 3.98 kA/m, 而磁性隧道结的性能有了显著的改善, TMR 由退火前的 28.7% 增加到 49.1%, 提高了近一倍, 偏置场大于 23.9 kA/m, TMR 曲线具有较好的方形度. 磁性隧道结这些性能的改善, 主要源于退火处理后势垒层中缺陷密度的降低、势垒层均匀性的提高、铁磁层和势垒层界面性质的改善。

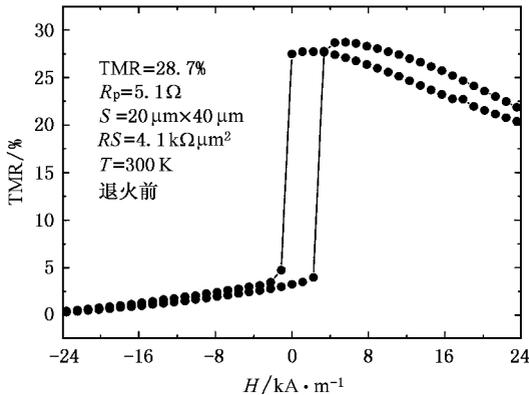


图 8 室温下未退火的磁性隧道结 TMR 随外加磁场 H 的变化曲线

磁性隧道结的 R_p , TMR 及其矫顽力随直流偏压、电流及温度的变化关系, 可参见文献 [21]. 利用一种磁激子和声子辅助隧穿的自旋极化电子输运模

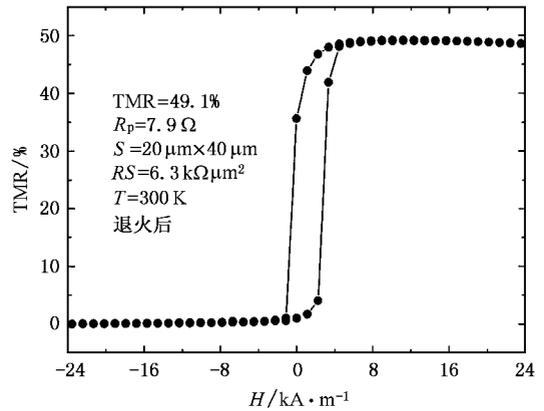


图 9 室温下退火后的磁性隧道结 TMR 随外加磁场 H 的变化曲线

型和一组内禀参数, 基本上可定量解释和计算磁性隧道结在不同温度和低偏压下的各种内禀磁电性质^[25—29], 本文不再赘述。

5. 结果和讨论

我们的实验结果表明, 利用金属掩模法制备磁性隧道结, 既可用于快速优化实验和工艺条件, 又可以作为采用复杂工艺和技术制备微米、亚微米或纳米磁性隧道结之前的预研制方法. 而采用光刻技术中的刻槽和打孔方法及去胶剥离方法制备的磁性隧道结, 经过适当的退火处理后可以获得较高的 TMR、较低的 RS 值以及较小的反转场和较高的偏置场. 这样的隧道结, 可以用于制备 MRAM 的存储单元或其他磁敏传感器的探测单元。

作者感谢中国科学院物理研究所微加工实验室对本文工作的支持。

- [1] Julliere M 1975 *Phys. Lett. A* **54** 225
- [2] Maekawa S, Gafvert U 1982 *IEEE Trans. Magn.* **MAG-18** 707
- [3] Nakani R, Kitada M 1991 *J. Mater. Sci. Lett.* **10** 827
- [4] Miyazak T, Yaoi T, Ishio S 1991 *J. Magn. Magn. Mater.* **98** L7; Yaoi T, Ishio S, Miyazak T 1993 *J. Magn. Magn. Mater.* **126** 430; Tezuka N, Miyazak T 1995 *J. Magn. Magn. Mater.* **139** L231
- [5] Plaskett T S, Freitas P P, Barradas N P *et al* 1994 *J. Appl. Phys.* **76** 6104
- [6] Moodera J S, Kinder L R, Wong T M *et al* 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3273
- [7] Sato M, Kobayashi K 1997 *IEEE Trans. Magn.* **33** 3553
- [8] Han X F, Oogane M, Kubota H *et al* 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 283
- [9] Machida K, Hayashi N, Miyamoto Y *et al* 2001 *J. Magn. Magn. Mater.* **235** 201
- [10] Daughton J M 1997 *J. Appl. Phys.* **81** 3758
- [11] Sousa R C, Sun J J, Soares V *et al* 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 3288
- [12] Parkin S S P, Roche K P, Samant M G *et al* 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 5828
- [13] Tehrani S, Slaughter J M, Chen E *et al* 2000 *IEEE Trans. Magn.* **35** 2814

- [14] Prinz G A 1998 *Science* **282** 1660 3744
- [15] Wolf S A , Awschalom D D , Buhrman R A *et al* 2001 *Science* **294** 1488
- [16] Egeloff W F , Chen P J , McMichael R D *et al* 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 5209
- [17] Akinaga H 2002 *J. Magn. Magn. Mater.* **239** 145
- [18] Akinaga H 2002 *Surf. Sci.* **514** 145
- [19] Bae J S 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 3135
- [20] Tsunoda M 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 1168
- [21] Han X F , Murai J , Ando Y *et al* 2000 *Appl. Phys. Lett.* **78** 2533
- [22] Nagahama T , Yuasa S , Suzuki Y *et al* 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 4381
- [23] Yuasa S , Nagahama T , Suzuki Y 2002 *Science* **297** 234
- [24] Stein S , Schmitz R , Kohlstedt H 2001 *Solid State Commun.* **117** 599
- [25] Zhang S , Levy P M , Marley A C *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 3744
- [26] Bratkovsky A M 1997 *Phys. Rev. B* **56** 2334
- [27] Bratkovsky A M 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 2334
- [28] Han X F , Yu A C C , Oogane M *et al* 2001 *Phys. Rev. B* **63** 224404
- [29] Lu C , Wu M W , Han X F 2003 *Phys. Lett. A* **319** 205
- [30] Li F F , Li Z Z , Xiao M W *et al* 2004 *Phys. Rev. B* **69** 054410
- [31] Du J , Chen J , Wu X S *et al* 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 236 (in Chinese] 杜 军、陈 景、吴小山等 1999 物理学报 **48** 236]
- [32] Peng Z L , Wang W N , Zhu T *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2901 (in Chinese] 彭子龙、王伟宁、朱 涛等 2003 物理学报 **52** 2901]
- [33] Wang T X , Wei H X , Li F F *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3895 (in Chinese] 王天兴、魏红祥、李飞飞等 2004 物理学报 **53** 3895]
- [34] Tsukagoshi K , Alphenaar B W , Ago H 1999 *Nature* **401** 572

Microfabrication methods of magnetic tunnel junctions with high tunneling magnetoresistance^{*}

Li Fei-Fei Zhang Xie-Qun Du Guan-Xiang Wang Tian-Xing Zeng Zhong-Ming Wei Hong-Xiang Han Xiu-Feng[†]

(State Key Laboratory of Magnetism , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China)

(Received 11 November 2004 ; revised manuscript received 30 March 2005)

Abstract

In this work , on the one hand , the contact-shadow-mask method and technique were used to micro-fabricate the magnetic tunnel junction (MTJ) and optimize the experimental conditions . The width of the gap for the long and narrow top or bottom magneto-electrode is $100\ \mu\text{m}$, which can be used to deposit MTJs and form a cross strip with the tunnel section of $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$. The MTJs with tunneling magnetoresistance (TMR) ratio of 30%—48% can be directly obtained for the structure of Ta(5 nm)/Cu(25 nm)/Ni₇₉Fe₂₁(5 nm)/Ir₂₂Mn₇₈(10 nm)/Co₇₅Fe₂₅(4 nm)/Al(0.8 nm)-O/Co₇₅Fe₂₅(4 nm)/Ni₇₉Fe₂₁(20 nm)/Ta(5 nm) . On the other hand , the MTJs with high TMR ratio and small active area from $20\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$ down to $4\ \mu\text{m} \times 8\ \mu\text{m}$ were fabricated using two optical lithography methods of milling contact hole and lift-off resist , combined with Ar ion-beam etching or CF₄ reactive etching techniques . Then , the TMR ratio from 22% up to 50% can be achieved before and after annealing at around 300 °C for 1 h . Our investigation shows that the patterned MTJs , which were microfabricated using the two optical lithography methods stated above , can be used as the fundamental element of magnetoresistive random access memory , magnetic read-heads in hard disk drives and the field sensitive sensor .

Keywords : magnetic tunnel junction , tunneling magnetoresistance , contact-shadow-mask method , optical lithography methods

PACC : 7340G , 7570P , 7550R , 7340R

^{*}Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2001CB610601) , the National Natural Science Foundation for Outstanding Young Researchers of China (Grant No. 50325104) , and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10274103) .

[†]E-mail : xlfhan@aphy.iphy.ac.cn