

4 英寸热氧化硅衬底上磁性隧道结的微制备^{*}

王天兴 魏红祥 李飞飞 张爱国 曾中明 詹文山 韩秀峰

(中国科学院物理研究所与凝聚态物理中心磁学国家重点实验室,北京 100080)

(2004 年 3 月 9 日收到,2004 年 3 月 26 日收到修改稿)

就如何在 4 英寸热氧化硅衬底上沉积高质量的磁性隧道结纳米多层薄膜材料和如何利用光刻方法微加工制备均匀性较好的磁性隧道结方面做了初步研究,并对磁性隧道结的磁电性质及其工作特性进行了初步测量和讨论.利用现有的光刻设备和工艺条件在 4 英寸热氧化硅衬底上直接制备出的磁性隧道结,其结电阻与面积的积值的绝对误差在 10% 以内,隧穿磁电阻的绝对误差在 7% 以内,样品的磁性隧道结性质具有较好的均匀性和一致性,可以满足研制磁随机存储器存储单元演示器件的基本要求.

关键词:磁性隧道结,隧穿磁电阻,磁随机存储器,4 英寸热氧化硅衬底

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

1. 引言

未来有可能商业化的磁随机存储器(MRAM)具有非挥发、高速、高密度、低能耗、低成本和抗辐射性能好等诸多优良特性,它综合了半导体静态随机存储器(SRAM)、动态随机存储器(DRAM)、闪存(flash)等现有的随机存储器(RAM)的各种优点.作为通用记忆体^[1],它将具有巨大的市场竞争力.另外,高容量和高密度的磁随机存储器,还有最终可将硬盘驱动器(HDD)和随机存储器集成为一体的发展空间和前景,即能实现数据的运算和处理,同时又能完成数据的即时存储,可省去计算机硬盘(HD)和随机存储器之间的数据调用和传递过程,能完全避免数据在传递过程中产生的出错概率,进一步减小“电脑”的体积,仿真和模拟“人脑”的优异功能.

1995 年,具有高磁电阻的磁性隧道结(MTJ)材料的发展,显示出很大的磁阻变化和信号输出^[2,3]. MTJ 材料类似于巨磁阻(GMR/自旋阀)材料,但磁性层间的隔离层为绝缘材料,一般是氧化铝、氧化镁等材料.由于量子隧穿机理,极化电流在垂直膜平面穿过势垒层时,随势垒层上下两个磁电极的磁矩平行或反平行取向不同而呈现低或高的磁电阻状态.由于制备 MTJ 的技术和材料方面的不断提高和改

善,目前隧穿磁电阻(TMR)变化率可以较容易达到 30%—50%^[4,5]. MTJ 材料具有以下几方面的特性使其成为制造磁随机存储器的理想材料.通过改变势垒层的种类和厚度,结电阻在相当宽的范围内可以调节,容易与半导体电路匹配;TMR 输出信号强度远大于 GMR;电流垂直于电极平面通过(CPP)隧道结可使单元尺寸减小,存储密度能进一步提高.因此,利用 MTJ 作为磁随机存储器的存储单元,能实现两种非常稳定的磁电阻状态,并可以在无外加电压时仍然保持写入后的高阻态或低阻态,不同的阻态可作为二进制 0 或 1 数据稳定地写入和读出.这种建立在 TMR 基础上的数据存储方法不同于其他通常的商业存储器,如静态随机存储器和动态随机存储器.它们通过存储电荷来设定不同的状态,无外加电压时存储的信息会丢失.

近几年来,由于薄膜磁电阻器件技术的不断发展和改善,MTJ 的实用性能不断提高,通过 MTJ 和半导体 CMOS 电路的微电子集成等技术,美国和日本等国在研制和开发基于 1 MTJ + 1 晶体管结构的磁随机存储器方面取得了巨大进展.到 2003 年已成功制备出容量达到 1 和 4M 的磁随机存储器^[6].中国科学院物理研究所、南京大学和中国科技大学等单位,亦在 MTJ 的自旋电子极化隧穿理论和材料制备等方面,获得了一些重要进展^[7-15].但在今后进一

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目(批准号 2001CB610601)、国家杰出青年基金(批准号 50325014)和国家自然科学基金(批准号:10274103 和 50271081)资助的课题.

步开发实用型 256M 或更大容量和高密度磁随机存储器方面,如何控制结电阻和磁电阻的均匀性、MTJ 单元状态的转变特性以及 MTJ 与 CMOS 的集成与匹配,是发展 MTJ 材料和开发磁随机存储器技术的关键性问题。

本文基于现有的实验条件,就如何在 4 英寸热氧化硅衬底上沉积高质量的 MTJ 纳米多层薄膜材料和如何微加工制备均匀性较好的 MTJ,做了初步研究,并阐述了 MTJ 的磁电性质及其工作特性。

2. MTJ 单元材料及制作过程

最简单的 MTJ 单元包括一个绝缘势垒层(I)和上下两个铁磁性(FM)层构成 FM/I/FM 三明治结构。TMR 效应可简单地由双带模型来理解:在费米面附近,一般认为过渡族元素的 d 带分裂为有不同态密度的自旋向上和向下态,而且 d 带中费米能级附近自旋向上和向下的电子数不相等,这种不平衡由自旋极化来描述。对于正常的隧穿过程,自旋守恒,不发生自旋翻转散射,一个磁性电极中靠近势垒层界面处的自旋向上或向下的电子通过量子隧穿必须到达另一个磁性电极的自旋向上或向下态中。当两电极的磁矩平行时,主自旋带的电子隧穿到另一电极的主自旋带,对于次自旋带亦然。当两磁性电极的磁矩反平行时,主自旋带的电子隧穿到另一电极的次自旋带,对应的有效隧穿态密度减小,导致隧穿电流减小,MTJ 单元显示出相对于平行态时大得多的磁电阻。一级近似下,在接近绝对零度的低温下,MTJ 的磁电阻与两个磁电极的自旋极化率存在如下关系:

$$\text{TMR} = \frac{R_{\text{AP}} - R_{\text{P}}}{R_{\text{P}}} = \frac{2P_1 P_2}{1 - P_1 P_2}, \quad (1)$$

$$P_i = \frac{\rho_i^{\uparrow} - \rho_i^{\downarrow}}{\rho_i^{\uparrow} + \rho_i^{\downarrow}}, \quad (2)$$

R_{P} 为两磁性电极的磁矩平行时的结电阻, R_{AP} 为其反平行时的电阻, P_i 为磁性电极的极化率, ρ_i ($i = 1, 2$) 为其费米面处的态密度。由此可见,对于费米能级处主、次自旋态密度差别大的材料可以获得较高的磁阻率。事实上,真实的情况要比这种简化的图像复杂得多,势垒材料对于 TMR 的大小及符号有很大影响^[6]。实际样品中, TMR 的大小依赖于电极表面的有效极化、磁电极和势垒层间界面的质量以及介电势垒材料的特性。另外, TMR 具有偏压依赖

和温度依赖,对于第三主族过渡金属和铝的氧化物构成的 MTJ, TMR 随偏压、温度升高而下降^[17, 18]。偏压依赖可能存在多种起源,包括态密度效应和结的界面处与能量有关的自旋翻转散射及各种激发态的存在,以及隧穿电子的界面量子相干因子等^[18-20]。由于磁随机存储器单元一般工作在一定的偏压下,实际的 TMR 值会略低于低压下的测量值。本文中 TMR 值在 1 mV 左右偏压下测定。

对于小尺寸的、特别是亚微米尺寸的 MTJ 单元,要使其结电阻和磁电阻值都满足磁随机存储器器件的要求,其势垒层厚度应在 1.0 nm 左右或更薄。由于结电阻以指数率依赖于势垒层厚度, AlO_x 厚度的微小变化会导致结电阻在较大范围内变化。这种指数依赖关系对于在大面积基底上制作适用于半导体生产、具有一定稳定性和均匀性的 MTJ 单元,无疑是一个挑战。

本文所制备的 MTJ 采用了自旋阀钉扎型结构,即 Ta(5 nm)/Cu(20 nm)/Py(5 nm)/IrMn(10 nm)/CoFe(4 nm)/Al(1.0 nm)氧化物/CoFe(4 nm)/Py(20 nm)/Cu(20 nm)/Ta(5 nm)。

本文利用日本真空高真空三室大型磁控溅射仪(ULVAC TMR R & D Magnetron Sputtering System)以 4 英寸热氧化硅片作基底来沉积 MTJ 薄膜材料。在不中断真空(10^{-7} Pa)的情况下,先在主沉积室用磁控溅射方法进行种子层、底部导电层、反铁磁钉扎层、下部磁电极的沉积;然后在中间沉积和氧化室进行铝层的溅射沉积和等离子体氧化,形成中间势垒层;最后再进入主沉积室完成顶部磁电极(自由层)和导电层及保护层的沉积。

由于我们目前用于沉积二氧化硅绝缘层的磁控溅射仪的均匀区仅在 1—2 平方英寸大小,故我们将 MTJ 薄膜沉积完毕后的 4 英寸衬底,分割成面积为 $25\text{mm} \times 25\text{mm}$ (1 平方英寸大小) 8 个大单元样品,然后采用常规的光刻工艺逐块进行微加工和隧道结制备。所用的光刻板为两种,曝光面积均设计为 $25\text{mm} \times 25\text{mm}$, 每块光刻板再分为 9 个小区域。第 1 种光刻板在每一个小区域(block)中包含 50 个不同尺寸的 MTJ 结区形状包括长方形和圆形,每种尺寸构成 1×5 阵列,即每种尺寸单元有 5 个隧道结,用作规律性研究,为本文提供数据。隧道结面积分别为 $\phi 5 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$, $\phi 15 \mu\text{m}$, $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$, $15 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$, $15 \mu\text{m} \times 45 \mu\text{m}$ 和 $15 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$, 其中 $\phi 5 \mu\text{m}$ 和 $\phi 15 \mu\text{m}$ 分别

表示直径为 $5\ \mu\text{m}$ 和 $15\ \mu\text{m}$ 的圆形. 因此, 利用第 1 种光刻板制备出的一个样品中共含 450 个隧道结. 第 2 种光刻板设计隧道结分布只有 $15\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$ 两种尺寸, 分别构成 $1 \times 2, 2 \times 2, 2 \times 4$ 阵列, 制备完毕的样品可进行磁随机存储器演示器件的应用性研究. 利用第 2 种光刻板制备出的每一个样品中共含 44 个隧道结. 如图 5 和图 6 所示, 一个 4 英寸硅片可以切割出 8 片 $25\text{mm} \times 25\text{mm}$ 的样品, 本实验中第 1 片样品用第 1 种光刻板进行微细加工制作, 其他 7 片样品采用第 2 种光刻板. 所以我们在一个 4 英寸热氧化硅衬底上分割出的 8 片样品区域中共制备了 758 个隧道结.

对利用第 1 种光刻板制备出的样品 1 中 9 个区域里所包含的 450 个隧道结进行了常规的 $I-V$ 和 TMR 测试, 由于这个样品中第 6 个区域 (block 6) 在退火前被漏测 (但测量了退火后的数据), 故这里只给出样品 1 其他 8 个区域退火前的测量结果. 图 1 和图 2 给出样品 1 中第 1 个区域里 (任选一个 block) 每个隧道结电阻和面积的积矢 (RA) 值及其 TMR 的实际测量值 (绝对值). 可以看到, 每个隧道结 RA 的绝对值基本落在 $15 \pm 1\text{k}\Omega\mu\text{m}^2$ 以内, 其平均值为 $15.4\ \text{k}\Omega\mu\text{m}^2$, 即 RA 的绝对误差在 10% 以内; 而每个隧道结的 TMR 的绝对值基本落在 $18 \pm 1\%$ 以内, 其平均值为 17.8%, 即 TMR 的绝对误差在 7% 以内, 因此一个区域里的 50 个 MTJ 具有较好的均匀性和一致性. 每个 MTJ 的性能, 基本满足制备磁随机存储器演示器件的需要.

16	16	B	16	16	16	16	16	16	16
B	15	15	15	15	15	15	15	15	15
15	15	15	15	15	16	16	B	16	15
14	14	14	14	B	16	16	16	16	16
15	15	14	14	B	16	16	16	16	16

图 1 给出样品 1 第 1 个区域里 (任选一个 block) 各个隧道结电阻和 RA 的实际测量值 (绝对值), B 表示测量时被击穿的结. RA 的绝对误差在 10% 以内

样品 1 中其他 7 个区域与第 1 个区域的结果十分相近.

图 3 给出样品 1 的 9 个区域里 (9 个 block) 任选一种特定的单元尺寸 (如 $30\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$) 的典型 TMR

17	17	B	17	17	19	18	18	17	17
B	17	17	18	17	18	18	17	17	17
18	18	18	18	18	18	18	B	17	17
19	19	18	19	B	18	18	18	18	18
18	18	18	18	B	18	18	18	18	18

图 2 给出样品 1 第 1 个区域里 (任选一个 block) 各个隧道结磁电阻的实际测量值 (绝对值), B 表示测量时被击穿的结. TMR 的绝对误差在 7% 以内

比值和结电阻值的平均值. 图 4 给出样品 1 的 9 个区域里 (9 个 block) 任选一种特定的单元尺寸 (如 $30\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$) 的典型 TMR 比值和结电阻值的平均值. 可以看出, 一个样品的 9 个区域里的隧道结, 均具有较好的一致性.

34 Ω	35 Ω	35 Ω
18%	19%	20%
漏测	34 Ω	34 Ω
	18%	18%
34 Ω	35 Ω	34 Ω
18%	19%	18%

图 3 一个尺寸为 $25\text{mm} \times 25\text{mm}$ 的样品内共有 9 个小区域, 每个小区域共有隧道结 50 个, 其尺寸分布从 $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ 到 $15\ \mu\text{m} \times 60\ \mu\text{m}$, 共有 10 种尺寸, 每种尺寸有 5 个隧道结. 给出分布在 9 个小区域内典型尺寸为 $15\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$ 的隧道结电阻 R 和 TMR 比值的平均值

利用第 2 种光刻板制作的其他 7 片样品, 亦做了类似的测量和数据分析, 它们呈现出非常相似的结果, 即 4 英寸热氧化硅衬底上切割出的 8 个样品均有较好的均匀性和一致性. 图 5 和图 6 给出全部 8 个样品的 MTJ 的结电阻和 RA 及磁电阻的平均值结果. 实验结果表明样品制备具有一定的工艺稳定性和均匀性.

从具体数值来看, RA 值均小于 $20\ \text{k}\Omega\mu\text{m}^2$, 落在制备磁随机存储器需求的参数范围之内^[21]. 图 7 给

43	43	43	42	42	42	41	41	B
42	42		42	42		42	41	
漏测			43	43	43	42	42	B
			43	44		42	44	
45	45	B	43	44	44	44	45	45
45	44		44	44		45	45	

图 4 一个尺寸为 25mm × 25mm 的样品内共有 9 个小区域, 每个小区域共有隧道结 50 个, 其尺寸分布从 5 μ m × 5 μ m 到 15 μ m × 60 μ m, 共有 10 种尺寸, 每种尺寸有 5 个隧道结. 给出分布在 9 个小区域内典型尺寸为 15 μ m × 30 μ m 的隧道结矫顽力 H_c 的测量值(单位为 kA/4 π m), 同一种形状和尺寸的隧道结, 其矫顽力具有较好的一致性, B 表示测量时被击穿的结

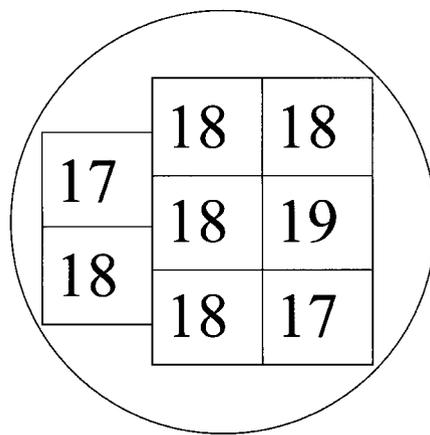


图 6 在 4 英寸热氧化硅衬底上制备出 8 个样品 MTJ 的磁电阻的平均值(单位为 %), 单个样品面积为 25mm × 25mm, 每个样品共分 9 个单元

材料相关, 可以通过光刻板图型的设计来改善, 原因详见下一节矫顽力部分. 这种偏离效应随边长长宽比率的减小逐渐减弱. 总体来看, 直接沉积和微加工制备出的 MTJ 其未退火时的 TMR 值均大于 16%, 未退火前 MTJ 的磁电阻比值和结电阻均具有较好的一致性.

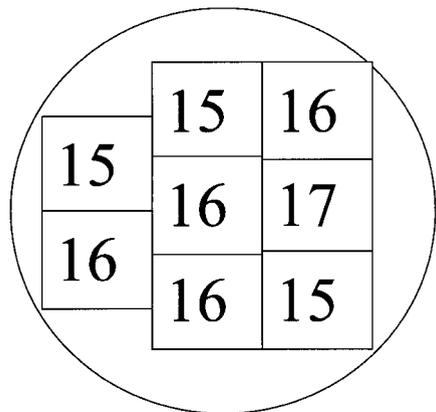


图 5 在 4 英寸热氧化硅衬底上制备出 8 个样品的 MTJ 的结电阻与 RA 的平均值(单位为 k $\Omega\mu$ m²), 单个样品面积为 25mm × 25mm, 每个样品共分 9 个单元

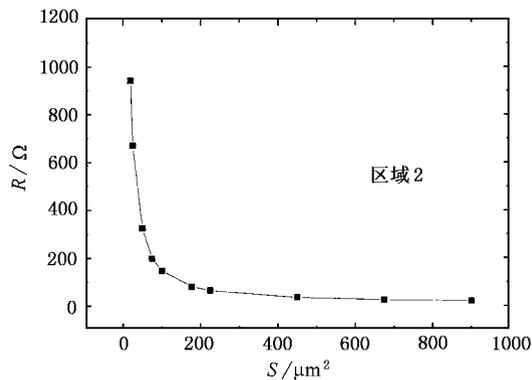


图 7 一个 25mm × 25mm 样品其第 2 个小区域内各种尺寸下 MTJ 的结电阻随结面积变化的典型曲线

出第 1 个样品任选一个区域(block 2)内 MTJ 结电阻的统计平均值曲线, 单元结电阻值随结区面积的变化接近倒数关系, 对于目前的单元尺寸, 其结电阻阻值也较合理, 从介观尺度上基本满足欧姆定律的变化趋势. 图 8 给出第 1 个样品第 2 个区域内全部 MTJ 的磁电阻的平均值随结面积变化的关系曲线. 在 20 μ m × 5 μ m 位置附近, 曲线发生很大偏离, 这种偏离主要来源于形状各向异性^[22], 对于长宽比率较大的结区, 由于能量最低原理, 涡旋磁畴结构的形成及易轴方向与 MTJ 的形状、尺寸大小及磁电极的

随 MTJ 制备工艺的改善及其和半导体 CMOS 电路集成技术匹配工艺的不断改进, 磁随机存储器的密度和容量会越来越高, 会要求 MTJ 单元尺寸不断减小, 但为保持或增加信号的写入和读出速度, 同时要求 MTJ 单元的结电阻不随之增加, 否则会产生难以接受的 RC 延迟. 因此在结区面积减小同时保持结电阻满足 CMOS 外电路需求值的情况下, 将会不得不减小电阻和 RA 值. 由于 TMR 对于势垒变化非常敏感, 通过优化铝层厚度和氧化时间, 可以保持

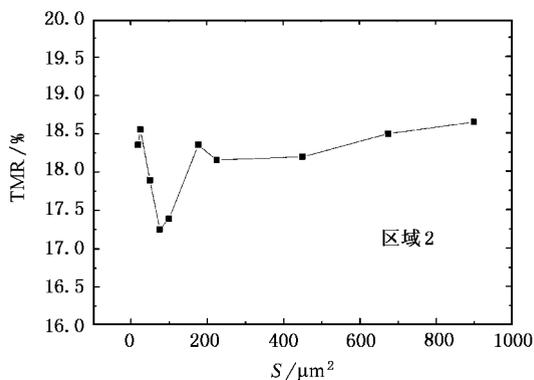


图 8 一个 25mm × 25mm 样品其第 2 个小区域内各种尺寸下 MTJ 的磁电阻比率随结面积的变化曲线

AlO_x 的化学成分而同时改变绝缘层厚度(或势垒层高度),达到调制结电阻的目的。目前,采用 AlN ^[23, 24], MgO ^[25] 等其他势垒材料以及其他元素注入 AlO_x 的合金化方法^[26],已显示出较低的势垒高度,并且对于给定的势垒层厚度,减小了 RA 值。

我们已经能够在相当宽的 RA 值范围内获得 $\text{MR} \geq 18\%$ 的 MTJ。这些结果有助于研制更小尺寸和更高性能的隧道结。这是因为能用于高密度磁随机存储器的更小尺寸的隧道结单元,其参数指标要求更高。例如,如果在隧道结尺寸为 $0.162\mu\text{m} \times 0.324\mu\text{m}$ 时,要满足 $\text{RA} = 1000 \Omega\mu\text{m}^2$ 的 MTJ,其合理结电阻约为 $19 \text{ k}\Omega$,而磁电阻比值不能低于 20%。这对于我们目前 1 nm- AlO_x 势垒层的样品,外推到该尺寸,电阻值会远大于这个上限。这个困难虽然可以通过减小势垒层厚度来解决,但是如果铝层厚度接近 0.5 nm 时,低 RA 材料受到势垒层缺陷的严重制约,厚度仅为几个原子层的 AlO_x 势垒很难无缺陷地大面积制备^[27]。由于实验获得的 TMR 值随 RA 值的减小通常表现出下降的趋势,所以制备具有较低 RA 值但同时却能保持较高磁电阻比值的 MTJ 材料目前仍然是个具有挑战性的难题。

3. 记忆单元的控制和矫顽力

MTJ 单元通过流经一对正交线(位线和数字线)的电流来反转其自由层。自由层通常取一定的形状(如椭圆或矩形),形状各向异性会对其自由层翻转产生一能量势垒。脉冲电流经过数字线,提供一半或部分翻转 MTJ 单元所需要的磁场。然后,流经位线的脉冲电流提供所需要的另一部分磁场,它们的

合成磁场把位于数字线和位线交叉点的单元自由层翻转。其他只受到数字线或位线脉冲电流单一作用的隧道结单元因只受到部分磁场作用而不发生翻转。理想情况下,这种翻转应为一单能量势垒。事实上,各种各样的缺陷会使其成为多能量势垒,意味着自由层翻转时,其磁滞回线或磁电阻曲线偏离矩形工作模式。这样,隧道结单元位与位之间的翻转场(矫顽力)会不一致,使单元的翻转操作一致性受到影响^[28]。我们期望构成磁随机存储器的每一个隧道结矩阵单元具有一致的和合理大小的反转场,它们既能被数字线和位线脉冲电流产生的合成磁场一致驱动,又有一定的抵抗杂散磁场扰动的矫顽力。

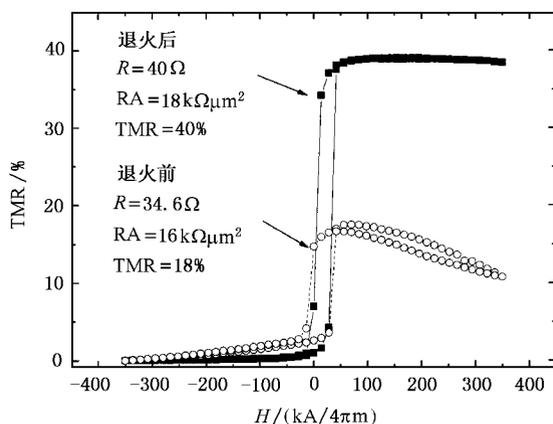


图 9 典型的 TMR 实验曲线。隧道结尺寸为 $15\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$, \circ 为退火前的实验曲线, \blacksquare 为退火后的实验曲线

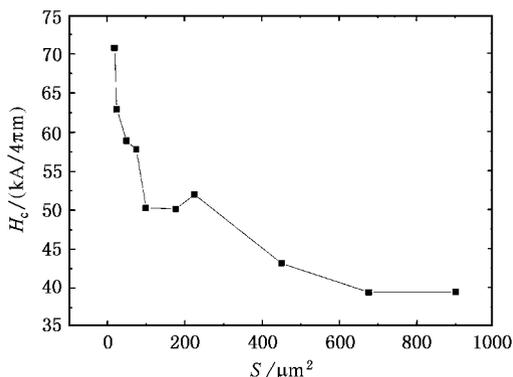


图 10 8 个区域内不同尺寸结单元的矫顽力平均值

图 9 给出单元尺寸为 $5\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ 退火前和退火后的 TMR 曲线,曲线形状具有多势垒的特征,但很接近于单能量势垒,具有较好的翻转特性。退火后,结电阻略增大,而单元磁电阻比值增加两倍多,并且翻转特性进一步改善,矫顽力也相应减小。但

是,本工作中,退火后大面积上的隧道结的电阻和磁电阻的均匀性并未得到很好的保持,磁电阻的具体数值在 33%—40% 范围内,有关这方面的实验研究还需进一步开展.图 10 给出 8 个区域内不同尺寸结单元的矫顽力平均值.从图 10 可以看到,在材料不变的情况下,随单元尺寸减小,矫顽力逐渐增加.另外,我们制备的 MTJ 自由层矫顽力相对较大,随 MTJ 大小和形状不同,在 35—70kA/4 π m 之间,可以不考虑热波动的影响.但大的矫顽力势必要求强的操作电流,导致功耗增加和对 CMOS 电路要求的提高.

尺寸为 $\phi 15\mu\text{m}$ 和 $20\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ 的结偏离了曲线,然后随结区形状逼近矩形,TMR 值逐渐回升到曲线总体具有的趋势.考虑到我们设计的结区形状与易轴之间的关系,结的长边与易轴垂直,可以确定对于 $20\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 的结,这种偏离主要源于形状各向

异性^[22].对于 $\phi 15\mu\text{m}$ 的隧道结,初步的微磁学理论计算和分析表明,矫顽力偏低于边长与其直径相等的正方形.同样,对于面积较大的结区,形状各向异性对于结的性质亦没有明显影响.

4. 结 论

实验结果表明,大面积制备 MTJ 其均匀性和一致性受到许多因素的影响.因此在大面积衬底上制备均匀、稳定的 MTJ 相对较为困难.而我们利用现有的光刻工艺初步在 4 英寸热氧化硅衬底上开展了 MTJ 大面积的制备研究,通过室温直接沉积 MTJ 薄膜材料和微加工制备,获得的数百个 MTJ 基本上具有合理的结电阻、积矢和较高的磁电阻比值,其均匀性和一致性也基本上可以满足我们目前研制磁随机存储器存储单元演示器件的要求.

- [1] Cowburn R P 2003 *Materials Today*. July/August 32. ISSN : 1369 7021
- [2] Miyazaki T and Tezuka N 1995 *J. Magn. Magn. Mater.* **139** L231
- [3] Moodera J S, Kinder L R, Wong T M and Meservey R 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3273
- [4] Han X F, Oogane M, Kubota H, Ando Y and Miyazaki T 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 283
- [5] Han X F, Oogane M, Daibou T, Yaoita K, Ando Y, Kubota H and Miyazaki T 2001 *J. Magn. Soc. Japan* **25** 707
- [6] Durlam M *et al* 2003 *IEEE J. Solid State Circ.* **38** 369
- [7] Zhang X, Li B Z, Sun G and Pu F Q 1997 *Phys. Rev. B* **56** 5484
- [8] Qi Y, Xing D Y and Dong J 1998 *Phys. Rev. B* **58** 2783
- [9] Zheng Z M, Xing D Y and Dong J 1999 *Phys. Rev. B* **59** 14505
- [10] Du J *et al* 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 236 (in Chinese) [杜 军 等 1999 物理学报 **48** 236]
- [11] Han X F 2002 *J. Mater. Sci. Technol.* **18** 497
- [12] Han X F 2002 *Nanotechnology* **13** 136
- [13] Peng Z L, Wang W N, Zhu T, Han X F and Zhan W S 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2901 (in Chinese) [彭子龙、王伟宁、朱 涛、韩秀峰、詹文山 2003 物理学报 **52** 2901]
- [14] You B, Sheng W, Sun L, Zhang W, Du J, Lu M, Zhai H, Hu A, Xu Q, Wang Y and Zhang Z 2003 *J. Phys.* **D36** 2313
- [15] Lü C, Wu M W and Han X F 2003 *Phys. Lett. A* **319** 205
- [16] de Teresa J M, Barthelemy A, Fert A, Contour J P, Lyonnet R, Montaigne F, Seneor P and Vaures A 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 4288
- [17] Zhang S, Levy P M, Marley A C and Parkin S S P 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 3744
- [18] Han X F, Yu A C C, Oogane M, Murai J, Daibou T and Miyazaki T 2001 *Phys. Rev. B* **63** 224404
- [19] Han X F, Murai J, Ando Y, Kubota H and Miyazaki T 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 2533
- [20] Li F F, Li Z Z, Xiao M W, Du J, Xu W and Hu A 2004 *Phys. Rev. B* **69** 54410
- [21] Daughton J M 1997 *J. Appl. Phys.* **81** 3758
- [22] Gallagher W J, Parkin S S P, Lu Y, Bian X P, Marley A C, Poche K P, Altman R A, Rishton S, Jahnes C, Shaw T M, Shaw G and Xiao G 1997 *J. Appl. Phys.* **81** 3741
- [23] Shim H J, Huang I J, Kim K S, Cho B K, Kin J T and Sok J H 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 1095
- [24] Schwickert M M, Childress J R, Fontana R E, Kellock A J, Rice P M, Ho M K, Thompson T J and Gurney B A 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 6871
- [25] Popova E, Faure-Vincent J, Tiusan C, Bellouard C, Fischer H, Hehn M, Montaigne F, Alnot M, Andrieu S, Schuhl A, Snoeck E and da Costa V 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 1035
- [26] Lee S R, Choi C M and Kim Y K 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 317
- [27] Han X F *et al* 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 764
- [28] Nozaki Y and Matsuyama K 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 7295

Microfabrication of magnetic tunnel junctions on 4-inch Si/SiO₂ substrate^{*}

Wang Tian-Xing Wei Hong-Xiang Li Fei-Fei Zhang Ai-Guo Zeng Zhong-Ming Zhan Wen-Shan Han Xiu-Feng
(*State Key Laboratory of Magnetism , Institute of Physics and Center for Condensed Matter Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China*)

(Received 9 March 2004 ; revised manuscript received 26 March 2004)

Abstract

Magnetic tunnel junctions (MTJs) with different sizes from $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ to $15\mu\text{m} \times 60\mu\text{m}$ were fabricated on 4-inch Si/SiO₂ substrates. Their magnetoelectronic properties were investigated using the four-probe measuring system. The typical values of junction resistance-area product and tunneling magnetoresistance (TMR) ratio of the MTJs are $16 \text{ k}\Omega\mu\text{m}^2$ and 18% respectively. The absolute errors of junction resistance-area product and TMR ratio are within 10% and 7% respectively for all the MTJs. All of the MTJs fabricated and measured show a good uniformity. Our experimental results show that such MTJs can be used to fabricate the prototype demonstration devices for magnetoresistive random access memory.

Keywords : magnetic tunnel junction , tunneling magnetoresistance , magnetoresistive random access memory , 4-inch Si/SiO₂ substrate

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

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2001CB610601) , the Funds for Outstanding Young Researchers from the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50325104) , and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10274103 and 50271081) .