

磁随机存储器中垂直电流驱动的磁性隧道结 自由层的磁化翻转*

彭子龙 韩秀峰† 赵素芬 魏红祥 杜关祥 詹文山

(北京凝聚态物理国家实验室,中国科学院物理研究所磁学国家重点实验室,北京 100080)

(2005 年 5 月 17 日收到,2005 年 6 月 29 日收到修改稿)

在基于磁性隧道结(Magnetic Tunneling Junction, MTJ)的磁随机存储器(Magneto-resistive Random Access Memory, MRAM)中利用通过 MTJ 的垂直电流,实现信息写入的新方法,同时给出了基于此新方法的一种新的 MRAM 结构和驱动原理图,并分析了它的读和写操作的可行性具体过程.

关键词:垂直电流,磁性隧道结,磁随机存储器

PACC: 7540M, 7570D, 7590

1. 引 言

基于磁性隧道结(MTJ)的磁随机存储器(MRAM)因具有传统半导体存储器所不具备的诸多优势^[1,2],近几年来一直都是国际学术界关注的焦点,也是产业界投入巨资予以研究开发的重点项目和产品,其中尤为突出的是发达国家的一些大型跨国公司,如美国的 IBM, MOTOROLA 及日本的 SONY, NEC 和 TOSHIBA 等世界知名大公司,目前均已各自投资数亿美元在开发 MRAM 芯片. 以日本为例,自 1988 年巨磁电阻(GMR)^[3]和 1995 年隧穿磁电阻(TMR)^[4]相继被发现后,在日本文部省和通产省的高投入资金的持续资助下,两年前日本的科研院校学术界和产业界已基本完成了 100—200 Gbit/in² 磁读出头的原型器件研制和商品实用化的国家和企业目标^[5,6]. 近三年,日本文部省和通产省又分别投入数十亿日元资助科研院校学术界和产业界进行 256M 容量 MRAM 演示芯片及其实用材料的研制,并取得了阶段性重要进展. 2004 年 SONY, NEC 和 TOSHIBA 公司先后研制成功 1K 和 1M 容量的 MRAM 演示芯片. 2004 年 9 月在冲绳岛举行的第一届亚洲论坛大会暨第二十八届日本磁学年会上,来

自日本科研院校学术界和产业界的 1000 余位参会人员提交的 585 篇论文或报告中,有约 10% 与 MRAM 研制及新型磁性隧道结材料的研究相关,这充分体现了日本对 MRAM 材料和器件研发的重视及寄予的厚望. 2004 年德国 Infineon 公司和美国 IBM 公司发布了 16M 容量 MRAM 演示芯片合作研发成功的消息,说明了 MRAM 的良好研究发展状态. 今后几年,256M 的 MRAM 芯片若能开发成功和实现批量产生,相信必能很快占领内存市场的相当份额,打破半导体存储器一统天下的格局并进入一个全新的内存时代.

尽管 MRAM 的发展态势良好,其中依然存在着不少让人困扰的科学上或生产工艺上的问题. 图 1 所示为一个 MRAM 存取存储单元典型的原理性结构,它通过一对相互正交的电流线和一个晶体管之间的相互配合来实现其信息的读出和写入操作;其复杂的布局和精确的定位要求使得其生产需要数百道的工艺流程,而生产工艺的复杂性将极大地影响产品的性能质量和生产成本. 因此,在作为 MRAM 存储单元的磁性隧道结新材料、新结构设计、自旋动力学研究、电流驱动和 MRAM 的新结构设计、工作原理、MTJ 与晶体管和集成电路的匹配等方面,还有大量的挑战性问题亟待解决,以推动 256M 的 MRAM

* 中国科学院知识创新工程重大课题、国家科技部 973 基础研究专项(批准号:2001CB610601)、国家杰出青年基金(批准号:50325104)和国家自然科学基金(批准号:10274103)资助的课题.

† 通讯联系人, E-mail: xfhan@aphy.iphy.ac.cn

芯片的研发和产品化的早日实现。

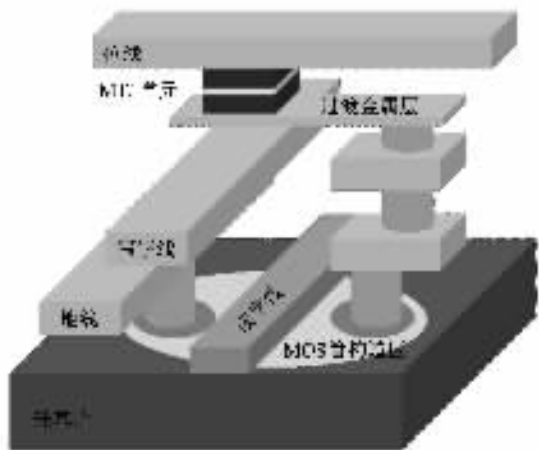


图 1 MRAM 单元的典型结构原理图

2. MTJ 单元在垂直电流作用下的磁化

本文所述 MTJ 中的“垂直电流”是相对于方向与 MTJ 的膜面平行的“平行电流”而言,垂直电流的方向垂直于 MTJ 的膜面并流经整个 MTJ,以“ I_{\perp} ”表示。因此, I_{\perp} 与测量 MTJ 电阻状态的垂直隧穿电流在本质上是相同的。 I_{\perp} 在流经 MTJ 时毫无疑问将在 MTJ 内产生磁场,并且,由于该电流流经磁性薄膜存储单元内部,因此可由相对较小的电流产生较大的磁场。

由于 MTJ 是一种多层膜结构的磁性单元,在其制备过程中可因工艺的不可控因素而引入单元中电阻率分布的不均匀性,因此, I_{\perp} 在流经单元时,理论上可存在点或面分布的电流密度分布形式,前者指电流强度集中于一个或者几个尺度极微小的点上流经 MTJ,这往往是由于单元的薄膜本身具有极大的不均匀性所引起,而这样的单元也不宜作为存储单元来工作,故本文不予考虑点电流的分布形式。在面内分布的电流一般也有几种可能,比如面内平均分布、随机分布等,高频电流时通常发生的趋肤效应在这里也可看作一种面内的不均匀分布,越接近面中心电流密度越小,反之越大。

以 $200\text{nm} \times 400\text{nm}$ 的矩形平面为例,利用毕奥-萨伐尔定律,可计算得到面平均、面随机、趋肤分布三种情况下的 I_{\perp} 产生的磁场分布情况,如图 2 所示。计算结果表明不同的面密度分布的电流,最终都导致了以平面中心为中心的环形磁场分布,且三者的结果极其接近。已有的洛伦兹力磁力显微镜

(LTEM)对磁性隧道结的观测结果表明,在由 I_{\perp} 产生的环形磁场的诱导下,可导致 MTJ 单元在自由层中形成涡旋(Vortex)的磁化状态^[7]。利用能量极小方法的微磁学方法计算也给出了相对应的状如蝴蝶的涡旋型磁化状态的结果^[8,9],如图 3 所示。当垂直隧穿电流通过平行取向沉积的自由层时,可以诱导磁化强度的转动,形成蝴蝶等形状的涡旋磁畴结构。因此,该特性可用于自由层磁矩的电流驱动和翻转。

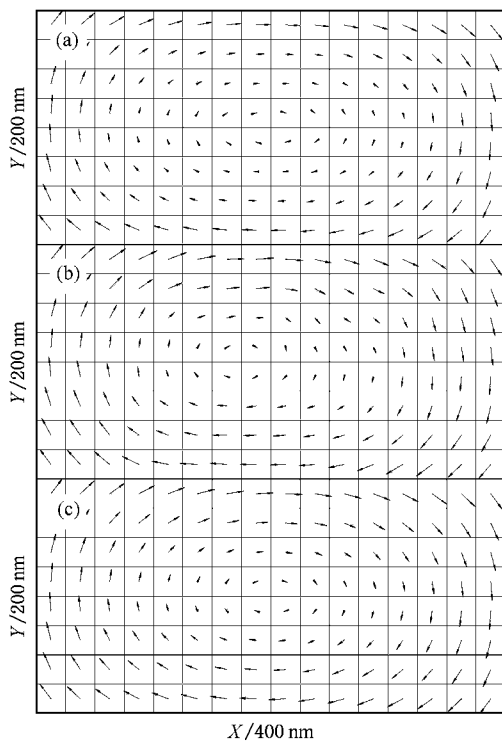


图 2 三种不同面密度分布的电流所产生的磁场矢量分布对比 (a)具有趋肤效应的面内分布 (b)面内随机分布 (c)面内平均分布

3. 利用 I_{\perp} 实现 MTJ 单元的磁化翻转

计算表明,如果在 I_{\perp} 产生的环形分布的磁场上,叠加一个强度相对大一些的恒定外场(H_s),则合成磁场在面内的分布是以外场方向为中心的某一角范围内取向的分布。以趋肤分布为例,图 4 给出一个典型的 I_{\perp} 产生的环形磁场与一强度相对较大的 X 方向 H_s 叠加后的合成磁场在平面内的分布。

如果把图 2 和图 4 中的矩形平面看作是 MTJ 单元的自由层平面(平面形状不一定局限于矩形、圆形或椭圆等形状均可),则显然此时 MTJ 单元是在一个非均匀磁场的作用之下。由于单畴磁性单元在一

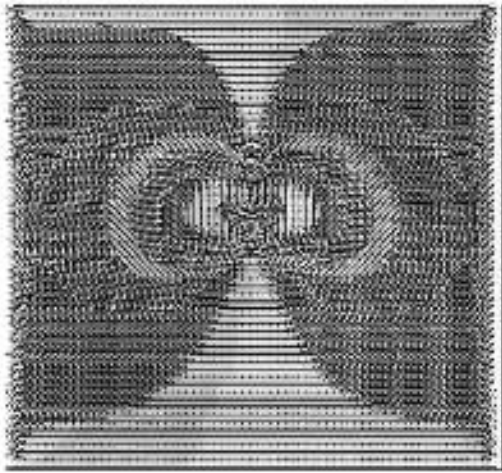


图 3 垂直隧穿电流通过平行取向沉积的自由层时诱导形成的蝴蝶状涡旋磁畴(微磁学计算模拟图)

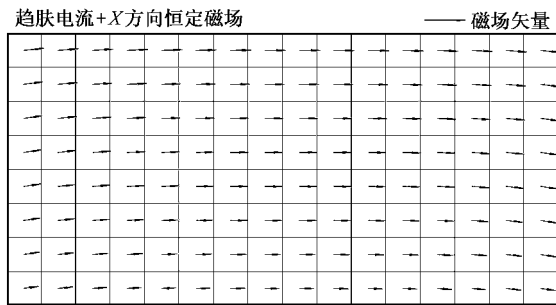


图 4 I_{\perp} 产生的环形磁场与一强度相对较大的 X 方向 H_s 叠加后的合成磁场在平面内的分布

个均匀磁场作用下的磁化翻转行为,可由所谓的反磁化特征曲线(星型线)来描述和分析^[10-12].对于这里的不均匀磁场,可将自由层平面剖分成有限数目的微小单元,并近似认为在单个微小剖分单元内的磁场是均匀的,则该非均匀磁场可描述为以 H_s 方向为中心、在某一张角范围内分布的强度不等的非均匀磁场,如图 5 中的矢量箭头所示.图 5 给出在某一张角分布的非均匀磁场在 MTJ 单元特征星型线中的位置.显然,该张角分布可通过调整 I_{\perp} 和 H_s 的大小来调整.

比较上述张角分布的非均匀磁场在 MTJ 单元的特征星型线中的位置,如图 5 所示,可见只要适当调整非均匀磁场张角分布的范围,可以使非均匀磁场绝大部分矢量的端点处于星型线的外部,这说明可使自由层薄膜的绝大部分区域实现磁化翻转.而如果自由层的全部或大部分区域能够在该非均匀磁场下实现翻转,那么整个自由层的磁化方向也将实

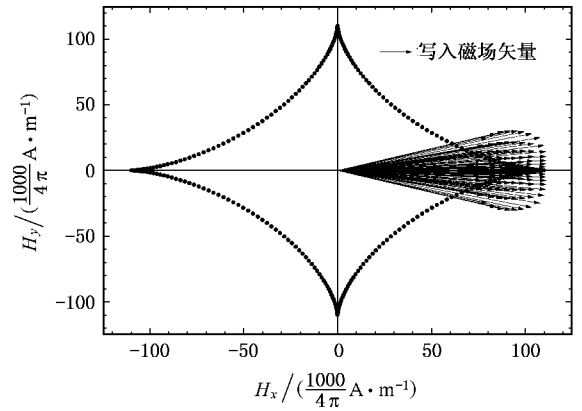


图 5 某一张角分布的非均匀磁场在 MTJ 单元的特征星型线中的位置(MTJ 单元为 $400\text{nm} \times 200\text{nm} \times 5\text{nm}$ 的 NiFe 薄膜; $I_{\perp} = 2\text{mA}$; $H_s = 7427\text{A/m}$; $H_K = 8021\text{A/m}$)

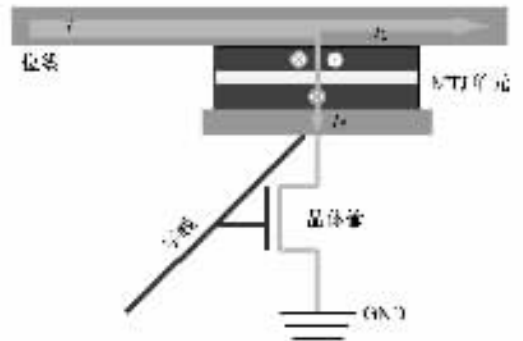


图 6 基于垂直电流写入的 MRAM 单元结构原理图

现翻转.

基于上述原理,我们设计了一种基于垂直电流写入方式的 MRAM 结构,其原理图如图 6 所示,其中位线方向与 MTJ 的易轴垂直.与图 1 相比,本设计的最大特点是两个写入电流由同一条导线(位线)导入,减少了一条写字线,从而可大幅度地简化 MRAM 的制造工艺,降低成本.

在这样的一个 MRAM 中,其读出操作的方法基本相同,即通过选择不同的位线与字线确定选中单元,字线控制晶体管导通使来自位线的读出电流形成到地的回路,从而在位线上取出 MTJ 单元的电阻状态信息并转换为 MTJ 中存储的信息.为了实现基于垂直电流的写入操作,在位线上还需设置一对单向导通的限流机构,其作用是使写入过程中位线上的电流能够有适当大小的一部分电流分流至从 MTJ 单元到地的通路上.这样,当位线 BL 上的电流 I 小于限流机构的限定电流 I_d ($I \leq I_d$) 时,几乎全部的电

流都从位线通过而没有流经 MTJ 单元的分流 I_d 的具体大小由 MTJ 的磁化翻转特性参数来确定,并且使大小为 I_d 的电流产生的磁场不能导致 MTJ 的磁化翻转.当 $I > I_d$ 时,在限流机构的作用下使 $I_1 = I_d$ 且 $I_1 + I_2 = I$,这时就存在两个互相垂直的电流 I_1 和 I_2 ,前者为“平行电流”,而后者为“垂直电流”,如图 6 中所示.由 I_1 产生的磁场在 MTJ 单元的易磁化轴方向上,而由 I_2 产生的磁场则是环形磁场.因此,在合成磁场作用下可以实现 MTJ 的磁化翻转,即 MRAM 中信息的写入.这时 $I_2 = I - I_1 = I - I_d$,它的大小也由 MTJ 的磁化翻转特性参数来确定,并且使大小为 I_2 和 I_d 的电流产生的合成磁场能够导致 MTJ 的磁化翻转.对于 MRAM 阵列外部的驱动电流而言,该 MRAM 的写入电流只有一个,即 $I = I_d + I_2$.

4. 结 论

利用垂直电流隧穿通过磁性隧道结时可以诱导

自由层发生磁化强度翻转的性质,可以在磁随机存储器 MRAM 中结合位线中的“平行电流”,实现 MRAM 存取存储单元中信息的写操作.我们的计算结果充分证明了该种方法的合理性,同时给出了基于垂直电流驱动的一种新的 MRAM 结构图和读写原理,并分析了它的读写操作的具体过程及可行性.利用 MRAM 中通过磁性隧道结时的脉冲垂直电流和位线中的水平电流实现存取存储单元中信息的写操作,不仅可以在 MRAM 中省去写字线,简化 MRAM 整体结构、减少生产工艺程序、降低成本,而且该方法更适合于亚微米、深亚微米和纳米尺度的 MRAM 存取存储单元中信息的写操作,也就是说在更高密度和容量的 MRAM 结构中有潜在的应用价值.结合目前国内在热氧化硅硅片上大面积制备高性能磁性隧道结材料的能力^[13]以及国内半导体 CMOS 集成电路微加工的基础,进一步研制垂直电流驱动的新型 MRAM 演示器件和芯片具有一定的可行性.

- [1] Daughton J M 1997 *J. Appl. Phys.* **81** 3758
- [2] IBM 2000 *Magnetic random access memory (MRAM) array with magnetic tunnel junction (MTJ) cells and remote diodes* Scheuerlein R E US patent US6097625
- [3] Baibich M N , Broto J M , Eert A , Nguyen Van Dau F , Petroff F 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 2472
- Binasch G , Grünberg P , Saurenbach F , Zinn W 1989 *Phys. Rev. B* **39** 4828
- [4] Miyazaki T , Tezuka N 1995 *J. Magn. Magn. Mater.* **139** L231
- Moodera J S , Kinder Lisa R , Wong Terrilyn M , Meservey R 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3273
- [5] Han X F , Oogane M , Kubota H , Ando Y , Miyazaki T 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 283
- [6] Machida K , Hayashi N , Miyamoto Y , Tamaki T , Okuda H , 2001 *J. Magn. Magn. Mater.* **235** 201
- [7] Han X F , Zhao S F , Yu A C C 2004 submitted to *Appl. Phys. Lett.*
- [8] Zhao S F , Han X F , Miyazaki T *et al* 2005 submitted to *Intermag* 2005 (Japan) and *IEEE Trans. Magn.*
- [9] Han X F , Miyazaki T *et al* 2004 *J. Magn. Magn. Mater.* **282** 225
- [10] Peng Z L , Wang W N , Zhu T , Han X F , 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]
- [11] Stoner E C , Wohlfarth E P 1991 *IEEE Trans. Magn.* **27** 3475
- [12] André Thiaville 2000 *Phys. Rev. B* **61** 12221
- [13] Wang T X , Wei H X , Li F F , Zhang A G , Zeng Z M , Zhan W S , Han X F 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 269 (in Chinese) [王天兴、魏红祥、李飞飞、张爱国、曾中明、詹文山、韩秀峰 2004 物理学报 **53** 269]

Perpendicular current-driven magnetization switching in free layer of magnetic tunneling junctions and MRAM^{*}

Peng Zi-Long Han Xiu-Feng Zhao Su-Fen Wei Hong-Xiang Du Guan-Xiang Zhan Wen-Shan

(*Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics National Key Laboratory for Magnetism ,
Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 10080 , China*)

(Received 17 May 2005 ; revised manuscript received 29 June 2005)

Abstract

A new method of readout and writing process driven by perpendicular current in magnetoresistive random access memory (MRAM) based on the magnetic tunneling junction is reported , and its schematic structure and operation are described.

Keywords : perpendicular current , magnetic tunneling junction (MTJ) , MRAM

PACC : 7540M , 7570D , 7590

^{*} Project supported by Funds of the Chinese Academy of Sciences for Key Topics in Innovation Engineering as a Major Project , and the Special Program for Basic Research of the Ministry of Science and Technology , China(973 Project X Grant No. 2001CB610601) and the National Science Fund for Distinguished Young Scholars(Grant No. 50325104) and the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 10274103).

[†] Corresponding author. E-mail: xfhan@aphy.iphy.ac.cn