

对称磁多层结构纳米自旋传输矩微波振荡器

董浩^{a,b,c}, 陈培毅^{a,b,c}, 邓宁^{a,b,c}

(清华大学 a. 微电子学研究所; b. 清华信息科学与技术国家实验室(筹);
c. 微纳电子系, 北京 100084)

摘要: 提出一种新型的电流驱动对称磁多层结构纳米自旋传输矩微波振荡器结构。由两个铁磁膜组成, 具有相同厚度, 中间被一薄的非磁层隔开。纳米磁多层柱的上、下都有金属层作为电极。一个恒定不变的直流电流垂直通过该磁多层结构时, 产生自旋极化和自旋传输矩, 并施加自旋矩于每一磁层。当电流超过临界值时, 引起两个磁膜的磁化矢量交替翻转方向, 并导致磁多层电阻的周期性变化, 从而产生稳定的微波振荡。振荡频率与电流呈线性关系, 变化范围 1 ~ 100 GHz。微波功率也可以用电流调节, 范围在 1 μ W ~ 1 mW。

关键词: 自旋传输矩振荡器; 磁多层; 自旋传输矩; 磁化矢量; 自由层

中图分类号: O482.5; O488 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4776 (2010) 01-0001-05

Spin Transfer Torque Nano-Oscillators with Symmetrical Magnetic Multi-Layers

Dong Hao^{a,b,c}, Chen Peiyi^{a,b,c}, Deng Ning^{a,b,c}

(a. Institute of Microelectronics; b. Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology;
c. Department of Micro Nano Electronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A novel structure of the spin transfer torque nano-oscillator with symmetrical magnetic multilayers was presented. It consisted of two ferromagnetic films with the same thickness separated by a thin non-magnetic film. There were two metal electrodes at the top and bottom of the magnetic multilayers. When the current passed vertically through the magnetic multilayers, the spin polarization and spin transfer torque were generated, and spin transfer torque would affect the magnetization of each free layer. When the current exceeded the critical value, the magnetization vector directions of both magnetic films were alternately switched without external magnetic field. The resistance of the magnetic multilayers was periodically changed, and the steady microwave oscillation was generated. There is a line relationship between the oscillation frequency and the current at 1 - 100 GHz. The microwave power can be modulated by the current, and the range is 1 μ W - 1 mW.

Key words: spin transfer torque oscillator; magnetic multilayer; spin transfer torque; magnetization vector; free layer

DOI: 10.3969/j.issn.1671-4776.2010.01.001 **EEACC:** 3110M; 3120J; 3120N

收稿日期: 2009-10-19

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060003067); 973 重大科学研究计划资助项目(2006CB921106); 自然科学基金资助项目(60606021); 国家高技术研究发展计划(2006AA03Z317)

通信作者: 陈培毅, Email: chenpy@tsinghua.edu.cn

2010年1月

微纳电子技术第47卷第1期

1

0 引言

1996年 J. C. Slonczewski^[1]和 L. Berger^[2]分别提出电流感应磁化翻转 (current induced magnetic switching, CIMS) 效应, 即在不需外加磁场的情况下, 当一个自旋极化的直流电流垂直通过一个非对称纳米磁三明治 (厚的固定层、薄的自由层被超薄的中心非磁夹层所隔开) 自旋阀结构时, 会产生自旋传输矩 (spin transfer torque, STT), 并引起自由层磁化方向和大小的改变。它会产生两个重要的效应: 电流感应磁开关^[3]和自旋传输振荡器^[4] (spin transfer torque oscillators, STO)。前者提供了一个新的磁开关结构, 有望发展成为新一代的磁随机存储器; 后者会产生稳定的微波发射, 在片上微波源和移动通信领域有着潜在的应用前景。它的微波频率可达 100 GHz^[5], 线宽最小仅 2 MHz, 而且微波频率可以方便地用电流调节, 具有相当高的频率调节范围和品质因数^[6]。

长期以来, 自旋传输振荡器 STO 的发展一直受制于两个因素:

一是 STO 对外磁场的依赖。由于历史上对于电流驱动磁化翻转 (CIMS) 器件的研究先于 STO, 为了使磁开关稳定工作, 通常采用非对称纳米磁三明治结构。由于固定层和自由层厚度不同, 实际上只有自由层的磁化方向可以随电流改变。在这种结构中, 为了获得大的微波发射功率就必须维持大角度稳定的磁化矢量的进动, 一般是用较强的偏置磁场 (500 ~ 2 000 Oe) 来实现的。目前, 有报道采用固定层和自由层磁化方向垂直的结构, 实现了无外磁场的自旋波发射^[7]。

二是提高微波发射功率很困难。因为非对称纳米磁三明治结构的固定层和自由层基本是平行的, 它们的易磁化轴的偏角很小, 一般只有几度。微波发射功率决定于磁化矢量偏离易磁化轴的进动。同时全金属结构的 CIMS 器件的电阻变化很小, 一般只有百分之几。对于 STO 来说, 振荡器并不引起磁化方向的翻转, 则电阻变化更小, 致使这种振荡器的功率效率小于万分之一, 这就限制了它在实际中的应用。当施加的电流提高到本征临界电流的数倍到十倍, 自旋波的发射功率的最佳值一般也只有 0.1 nW^[8], 比实用要求的最小微波发射功率 1 μ W

相差 10 000 倍, 远不能满足实际需要的要求。解决的办法之一是采用同步振荡的纳米振荡器阵列来提高器件振荡功率, 这需要采用比较复杂的锁相技术。目前, 利用耦合自锁相方法, 只实现了两个磁多层纳米柱的同步振荡^[8], 实际应用至少需要成千上万个这样的振荡器同步振荡。此外, 要使各子振荡器的本征频率相同也是一个难题, 这对器件性能的一致性要求非常高。第二种解决办法是设法提高单个器件的振荡功率或振荡器的效率。对于纳米全金属自旋阀结构, 典型的直流功耗为 100 μ W, 如果振荡器的效率提高到百分之几, 微波发射功率可以达到数微瓦, 基本可以满足实际应用的要求。但是一般固定层和自由层磁化平行或反平行结构的器件, 由于易磁化轴夹角很小, 使振荡器的效率大为降低, 不能满足以上要求。

采用固定层和自由层磁化方向垂直的结构是一种可能的解决举措, 它不需要外加磁场。在垂直于易磁化轴平面的自由层磁化矢量的进动振幅为^[5]: $m = m_0 \exp(i \omega t) (\sin \omega t / 2)$, 其中, m 是自由层磁化矢量的横向分量; ω 为磁化矢量的进动频率; t 为时间。进动振幅与 m_z 相关, 而 m_z 是在 0 与 m_s 之间变化, 即频率在 0 与 ω_0 之间变化, 频谱的线宽变得很大, 这使振荡器的品质因数大为降低。提高微波功率的第三种方法是采用磁隧道结结构 (magnetic tunnel junction, MTJ), 磁电阻变化一般为数千欧数量级, 只要 1 mA 的电流, 直流功耗可以达到数毫瓦的水平, 由于此结构的磁电阻变化可以超过 100%, 振荡器效率达到百分之几并不难, 这主要取决于固定层与自由层磁化之间的夹角, 则微波发射功率可以达到数十微瓦的数量级, 完全可以满足实际应用的需要。但是由于它的电阻及电阻比都很大, 功耗必然也大, 需要防止过度的温升使器件失效。不过由于 MTJ 结构的临界电流一般比全金属结构低 1 ~ 2 个数量级, 低的临界电流可以适当降低功耗至允许的范围内, 但是固定层与自由层磁化之间的夹角是很难控制的, 器件性能的一致性得不到保障。

1 基于磁化矢量进动的 STO 的性能比较

振荡器结构主要有三种^[3,9]: 纳米自旋阀结

构，磁场平行磁化方向；纳米磁多层结构，自由层和固定层磁化方向彼此垂直；纳米自旋阀结构，外磁场垂直于膜平面。

它们产生微波振荡的条件是^[9]：有电流垂直通过膜平面，存在自旋的横向分量传输，常常需要外磁场。三种磁多层纳米振荡器的实验结

果的性能比较见表1。从表1可以看出，纳米自旋阀结构 STO 的输出微波功率都很小，最大也不过 10 nW。自由层和固定层磁化方向彼此垂直的磁多层结构器件的性能有所改进，微波输出功率达到 90 nW，但是仍然不能满足实际应用的需要。

表 1 不同结构自旋阀的自旋波发射特性比较

Table 1 Comparison of spin wave emitting performances in different device structures

研究小组	器件结构	f/GHz	线宽/ MHz	品质因数	P_{out}/nW
S. I. Kiselev ^[10]	平行	5 ~ 25	-	-	1 ~ 10
S. I. Kiselev ^[11]	磁场垂直	5 ~ 35	250 ~ 700	-	~ 0.3
W. H. Rippard ^[12]	点接触	5 ~ 40	58	200 ~ 800	~ 10
Q. Mistral ^[13]	平行	12	3.2 ~ 100	-	~ 0.01
V. S. Pribiag ^[6]	平行	1 ~ 34	0.28 ~ 60	4 000	0.1 ~ 3
T. Devolder ^[7]	磁化垂直	5 ~ 11	25 ~ 200	280	~ 90

2 对称磁多层结构纳米微波振荡器基本结构

本文的目的在于提供一种新的磁多层纳米微波振荡器结构，如图 1 所示。它与通常的 CIMS 器件结构不同，CIMS 的典型结构主要由两个铁磁层组成：固定层和自由层。固定层较厚，它的磁化矢量方向是固定不变的；自由层较薄，它的磁化矢量方向可以随电流改变。提出的新结构中的两个铁磁膜具有相同厚度，是一种对称纳米磁三明治自旋阀结构，两磁层中间被一薄的非磁层隔开。纳米磁多层柱的上、下都有金属层作为电极。当一个恒定不变

的直流电流垂直通过磁多层结构，产生自旋极化和自旋矩传输，并施加自旋矩于每一磁层，上下两个磁层的磁化方向都可能翻转，所以称之为双自由层结构。当电流超过临界值时，引起两个磁膜的磁化矢量交替翻转方向，并导致磁多层电阻的周期性变化，从而产生稳定的微波振荡。在工作原理上完全不同于典型的 STO，由于它具有最大的电阻变化，器件的微波发射效率很高。

3 工作原理及性能分析

对自由层界面处自旋极化率的分析可以得到，对于对称磁多层纳米微波振荡器，由两个厚度相同的自由层组成，所以需要考虑 4 个界面。如图 2 所

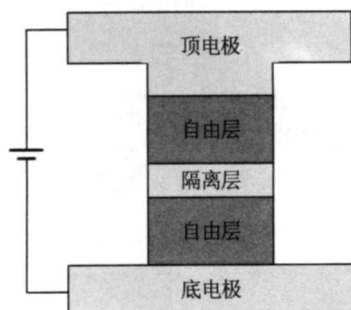


图 1 电流驱动对称磁多层结构纳米自旋传输矩微波振荡器结构
Fig. 1 Structure of the spin torque nano-oscillator with symmetrical magnetic multilayers

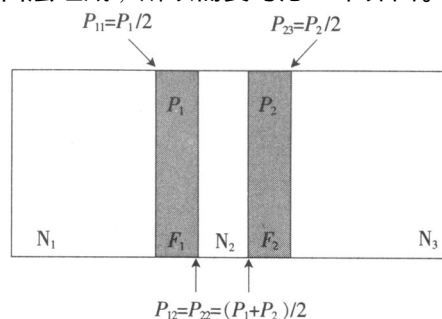


图 2 对称磁多层结构微波振荡器界面极化率
Fig. 2 Spin polarization of current at the interfaces of STO with symmetrical magnetic multi-layers

示, 令 P_1 和 P_2 代表两个自由层 F_1 和 F_2 的自旋极化率。简化可以得到, N_1 与 F_1 界面的自旋极化率为 $P_{11} = P_1/2$, N_3 与 F_2 界面的自旋极化率为 $P_{23} = P_2/2$, 隔离层 N_2 与两个自由层界面处的自旋极化率为 $P_{12} = P_{22} = (P_1 + P_2)/2$ 。如果两个自由层材料和厚度都相同, 可以令 $|P_1| = |P_2| = P$, 但是它们的极性可以相反。在 F_1 内的净积累为 $-P_2/2$, 在 F_2 内的净积累为 $P_1/2$ 。

3.1 工作原理

图 3 和表 2 对基于开关理论的微波振荡模式进行了说明: 定义电流正向 ($I > 0$) 时, 电子流方向为从左到右, 且电流的大小满足 $I > I_c$, I_c 为本征临界电流。它们的初始磁化矢量彼此是平行的。器件的工作不需要外磁场, 这样可以得到平稳、对称的振荡特性。

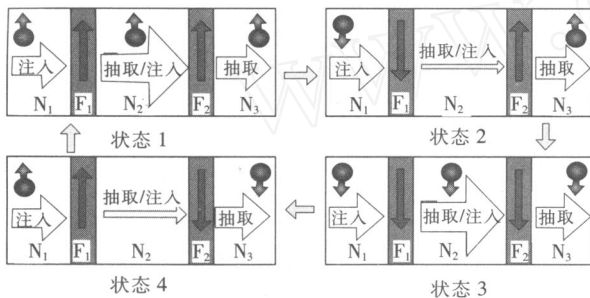


图 3 基于开关理论的微波振荡器工作模式

Fig. 3 Operating modes of the switching-based STO

表 2 基于开关理论的微波振荡器工作的 4 种状态

Table 2 Four operating states of the switching-based STO

$I > 0$	P_{11}	$P_{12} = P_{22}$	P_{23}	F_1	F_2
状态 1	$P/2$	P	$P/2$	翻转	不翻转
状态 2	$-P/2$	0	$P/2$	不翻转	翻转
状态 3	$-P/2$	$-P$	$-P/2$	翻转	不翻转
状态 4	$P/2$	0	$-P/2$	不翻转	翻转

对于状态 1: 自由层 F_1 和自由层 F_2 的初始磁化矢量彼此平行, 且向上, 当电子从自由层 F_1 流向自由层 F_2 , 且 $I > 0$ 时: $P_{22} = P_{12} = P > P_{11} = P_{23} = P/2$ 。对于自由层 F_2 , 注入大于抽取, 产生与自由层初始磁化方向相同的净积累正比于 $P/2$, 由于 F_2 磁化已经饱和, 电流对其无影响, 因此自

由层的磁化方向不变, 不会发生磁化翻转。而对于自由层 F_1 , 注入小于抽取, 产生与自由层初始磁化方向相反的净积累正比于 $-P/2$, 所以电流使 F_1 的磁化矢量 z 分量减小, 直至翻转。 F_1 磁化翻转后, 系统由状态 1 转到状态 2。

对于状态 2: $P_2 = -P_1 = P$, $P_{22} = P_{12} = 0$, F_2 的自旋向上电子被抽取, 会产生与自由层初始磁化方向相反的净积累, 因此 F_2 的磁化最终会发生翻转。而 F_1 有自旋向下电子的注入, 会产生与自由层初始磁化方向相同的净积累, 因此 F_1 的磁化不变。 F_2 磁化翻转后, 系统由状态 2 转到状态 3。

对于状态 3: 分析与状态 1 相同, F_2 的磁化不变, 而 F_1 磁化最终会发生翻转。 F_1 磁化翻转后, 系统由状态 3 转到状态 4。

对于状态 4: 分析与状态 2 相同, F_1 的磁化不变, 而 F_2 磁化最终会发生翻转。 F_2 磁化翻转后, 系统由状态 4 转到状态 1。

周而复始, 形成磁电阻稳定的微波振荡。

3.2 性能分析

根据上述分析, 器件振荡频率为 $f = 1/(I)$, (I) 是与电流相关的磁开关的开关时间, 它可以通过解铁磁层磁化矢量的磁动力学方程得到^[14]。当 $I/I_{c0} \gg 1$ 时 ($I_{c0} = 4Vm_s^2(\alpha + 2)/\hbar\tau$, 为本征临界电流), 得到微波振荡角频率 $\omega = \hbar I/4Vm_s$ (由于本文篇幅所限, 详细的数学推导将在另文发表), 微波振荡频率一般在数吉赫兹左右, 它的频谱线宽很小, 只由 m_s 的热起伏决定, 初步估计 Q 值在 1 000 ~ 3 000 的范围。微波振荡功率 $P_m = I^2 R/2$, 这里 R 是反平行态电阻和平行态电阻的差, 近似常数, 等于平均电阻 R_0 乘以有效磁阻 r_g 。有效磁阻定义为 $r_g = (R_{ap} - R_p)/(R_{ap} + R_p)$, R_p 为平行态电阻, R_{ap} 为反平行态电阻, 平均电阻 $R_0 = (R_{ap} + R_p)/2$ 。新结构器件的效率提高了 100 倍以上。对于全金属结构, 器件的典型功耗为 100 μ W, 器件的振荡效率可以达到百分之几, 即振荡功率在数微瓦的量级。新结构全金属器件基本满足实际应用的功率要求。而对于 MTJ 结构器件, 同样的功耗, 振荡功率可以达到百微瓦的数量级。

新结构的纳米微波振荡器不需要外加磁场, 工作电流必须大于本征临界电流, 振荡的频率和功率

都可以由电流调节。频率随电流增大线性地增长, 由公式 $f = \hbar I / 4 V m_s$ 决定; 而功率随电流的平方增大, 表示为 $P = I^2 R / 2 = r_g R_0 I^2$ 。如果限制电流 I / I_{c0} 在 $0 \sim 10$ 的范围变化, 则相对工作电流 I_0 的微波功率和频率分别为 P_0 和 f_0 , 器件的振荡功率的变化为 $P_0 \sim 100 P_0$, 振荡频率变化为 $f_0 \sim 10 f_0$ 。对于全金属结构器件, P_0 约为 $1 \mu\text{W}$; 对于 MTJ 结构器件, P_0 约为 $10 \mu\text{W}$ 。设 MTJ 结构器件的临界电流比全金属结构器件小一个数量级。微波振荡器的效率 $k = P / W$, W 代表平均功耗, 表示为 $W = I^2 R_0$, 则 $k = r_g$, 即振荡器的功率效率等于有效磁阻。对于全金属结构器件, r_g 约为 4% ; 对于 MTJ 结构器件, r_g 约为 30% 。

4 结 论

本文提出一种新型的电流驱动对称磁多层结构微波振荡器结构。新结构的纳米微波振荡器不需要外加磁场, 工作电流必须大于本征临界电流, 振荡的频率和功率都可以由电流调节, 与电流呈线性关系, 调节范围 $1 \sim 100 \text{ GHz}$ 。微波功率也可以用电流调节, 范围在 $1 \mu\text{W} \sim 1 \text{ mW}$ 。振荡器的效率较高: 全金属结构为 4% , 磁隧道结结构为 30% 。此结构可以用微、纳米加工技术批量制作, 可在微波通信应用领域作为微波源使用; 还可以作为片上微波源, 与其他元件实现单片集成, 形成微型通信系统。

参考文献:

- [1] SLONCZEWSKI J C. Current-driven excitation of magnetic multilayers [J]. J Magn Magn Mater, 1996, 159 (1-2): L1-L7.
- [2] BERGER L. Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current [J]. Phys Rev: B, 1996, 54 (13): 9353-9358.
- [3] 任敏, 陈培毅, 张磊, 等. 一种新的自旋量子效应——电流感应磁化翻转 [J]. 微纳电子技术, 2006, 43 (12): 553-557, 581.
- [4] FULLERTON E, MOUGIN A, RAVELOSONA D, et al. Topical issue on new trends in spin transfer physics [J]. Eur Phys J: B, 2007, 59 (4): 413-414.
- [5] HOEFER M A, ABLOWITZ M J, ILAN B, et al. Theory of magnetodynamics induced by spin torque in perpendicularly magnetized thin films [J]. Phys Rev Lett, 2005, 95 (26):

267206-1 - 267206-4.

- [6] PRIBIAG V S, KRIVOROTOV I N, FUCHS G D, et al. Magnetic vortex oscillator driven by d. c. spin-polarized current [J]. Nature Physics, 2007, 3 (7): 498-503.
- [7] DEVOLDER T, MEFTAHA A, ITO K, et al. Spin transfer oscillators emitting microwave in zero applied magnetic field [J]. J Appl Phys, 2007, 101 (6): 063916-1-063915-5.
- [8] KATINE J A, FULLERTON E E. Device implications of spin-transfer torques [J]. J Magn Magn Mater, 2008, 320 (7): 1217-1226.
- [9] REN M, ZHANG L, HU J, et al. Symmetry ensemble theory of spin wave emitting effect driven by current in nanoscale magnetic multilayer [J]. Chinese Physics: B, 2009, 18 (5): 2006-2011.
- [10] KISELEV S I, SANKEY J C, KRIVOROTOV I N, et al. Microwave oscillations of a nano-magnet driven by a spin-polarized current [J]. Nature, 2003, 425 (6956): 380-383.
- [11] KISELEV S I, SANKEY J C, KRIVOROTOV I N, et al. Current-induced nanomagnet dynamics for magnetic fields perpendicular to the sample plane [J]. Phys Rev Lett, 2004, 93 (3): 036601-1-036601-4.
- [12] RIPPARD W H, PUFALL M R, KAKA S, et al. Direct-current induced dynamics in $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ point contacts [J]. Phys Rev Lett, 2004, 92 (2): 027201-1-027201-4.
- [13] MISTRAL Q, KIM J V, DEVOLDER T, et al. Current-driven microwave oscillations in current perpendicular-to-plane spin-valve nanopillars [J]. Appl Phys Lett, 2006, 88 (19): 192507-1-192507-3.
- [14] DONG H, REN M, ZHANG L, et al. Thermal effect on current induced magnetic switching [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58 (10): 7176-7182.



作者简介:

董浩 (1981—), 男, 北京人, 清华大学微电子学研究所在读博士研究生, 主要研究方向是自旋电子学和纳米器件;



陈培毅 (1944—), 男, 江苏人, 清华大学微电子学研究所教授, 博士生导师, 长期从事 SiGe 器件研究, 目前研究方向为微电子学、自旋电子学和纳米器件。