自旋轨道力矩闪存模数转换器

Hamdam Ghanatian[1*]、Luana Benetti[2], Pedro Anacleto[2], Tim Böhnert[2], Hooman Farkhani[1],Ricardo Ferreira[2], Farshad Moradi[1]

尽管模数转换器（ADC）是混合信号集成电路（IC）中的关键组件，但过去十年来，其性能并未显著提升。为实现模数转换器在紧凑性、低功耗和可靠性方面的飞跃式改进，自旋电子学可作为一种合适的候选方案，因为它与互补金属氧化物半导体兼容，并广泛应用于存储、类脑计算等领域。本文设计、制造并表征了一种采用自旋轨道力矩切换机制的面内各向异性磁隧道结（i-MTJ）3位自旋-CMOS闪速模数转换器概念验证原型。所提出的模数转换器以七个宽度各不相同的重金属（HM）条带并联的i-MTJ，取代了传统闪速模数转换器中的电流镜和高功耗比较器。基于实验测量结果的蒙特卡洛仿真表明，工艺偏差/失配将所提出模数转换器的精度限制在2位。此外，最大微分非线性（DNL）和积分非线性（INL）分别为0.739个最低有效位（LSB）和0.7319个最低有效位。

模数转换器将模拟输入转换为数字输出，并在计算系统中发挥着关键作用[1-4]。随着用于实现深度神经网络（DNN）的新兴存内计算（CiM）技术不断发展，对紧凑、低功耗模数转换器的需求日益增长[5-7]。传统模数转换器受工艺微缩影响，在微缩节点上面临较大的工艺偏差和较低的性能。根据近期发布的模数转换器路线图，采用现有技术，未来几年模数转换器在分辨率、面积和功耗方面都不会有明显改善[8]。一种颇具前景的解决方案是从传统的互补金属氧化物半导体（CMOS）技术转向新型混合技术，例如自旋-CMOS技术[9]。

磁隧道结（MTJ）因兼容互补金属氧化物半导体、具有非易失性、较长的保持时间和良好的耐久性，成为适用于多种应用的颇具前景的自旋电子器件[10,11,12]。MTJ由夹在两层铁磁（FM）层之间的氧化物层构成。其中一层铁磁层的磁化方向固定，称为钉扎层（PL）；另一层可沿其易轴切换，称为自由层（FL）。如果自由层和钉扎层的磁化方向平行，器件便处于平行态（P-state），此时MTJ呈现低电阻（逻辑“0”）；而如果自由层的磁化方向与钉扎层相反，器件则处于反平行态（AP-state），呈现高电阻（逻辑“1”）。通过自旋转移转矩（STT）机制，使电荷电流（I_{STT}）流经MTJ，即可调节自由层的磁化方向[13]。然而，这种切换方法的一项挑战是，当器件承受过大的I_{STT} 时，薄氧化物层可能发生击穿，从而降低磁隧道结的可靠性和耐久性[14]。为解决这一问题并提高开关效率，研究人员提出了基于自旋轨道力矩（SOT）的MTJ[15]。在SOT中，大于临界电荷电流（$I_{SOT}I_{SOT,crit}$）的电荷电流流经重金属（HM），并通过自旋霍尔效应（SHE）产生自旋轨道力矩（SOT）来实现切换[16,17]。

近年来，已有多项关于使用基于自旋轨道转矩的磁隧道结设计模数转换器的研究报道[8, 18-21]。Jiang 等人.[8] 开发了一种基于自旋霍尔效应和电压控制磁各向异性（VCMA）的自旋电子模数转换器。为调节每个磁隧道结的$I_{SOT,\ crit}$，他们采用电阻梯为磁隧道结提供不同的电压。这种方法存在功耗开销和可靠性问题[18]。在其他研究中[18-21]，多个磁隧道结共用一条渐缩的重金属层，通过设计重金属层的宽度（w_{HM}）来调节$I_{SOT,\ crit}$。在这类方法中，为感测每个磁隧道结的状态，电流会流经磁隧道结（I_{Sens}）。然而，考虑到共用的重金属层构成了磁隧道结的底部接触，I_{Sens} 只会流经重金属层的一部分。磁隧道结会因其在共用重金属层上的位置不同而具有不同的底部接触电阻。值得注意的是，不同的重金属层宽度显然会导致电流路径上的重金属层电阻不同；对于距离接地重金属端子较远的磁隧道结，该电阻会更大。电流路径上的重金属层电阻越大，磁阻（MR）的劣化就越严重，从而降低读取可靠性。为解决这一问题，一些研究采用侧向读取方法 [18-19]，另一些研究则使用虚设

[1]奥胡斯大学工程系，丹麦奥胡斯 8200。[2]国际伊比利亚纳米技术实验室 (INL)，葡萄牙布拉加，Av. Mestre Jose Veiga s/n，4715-330。

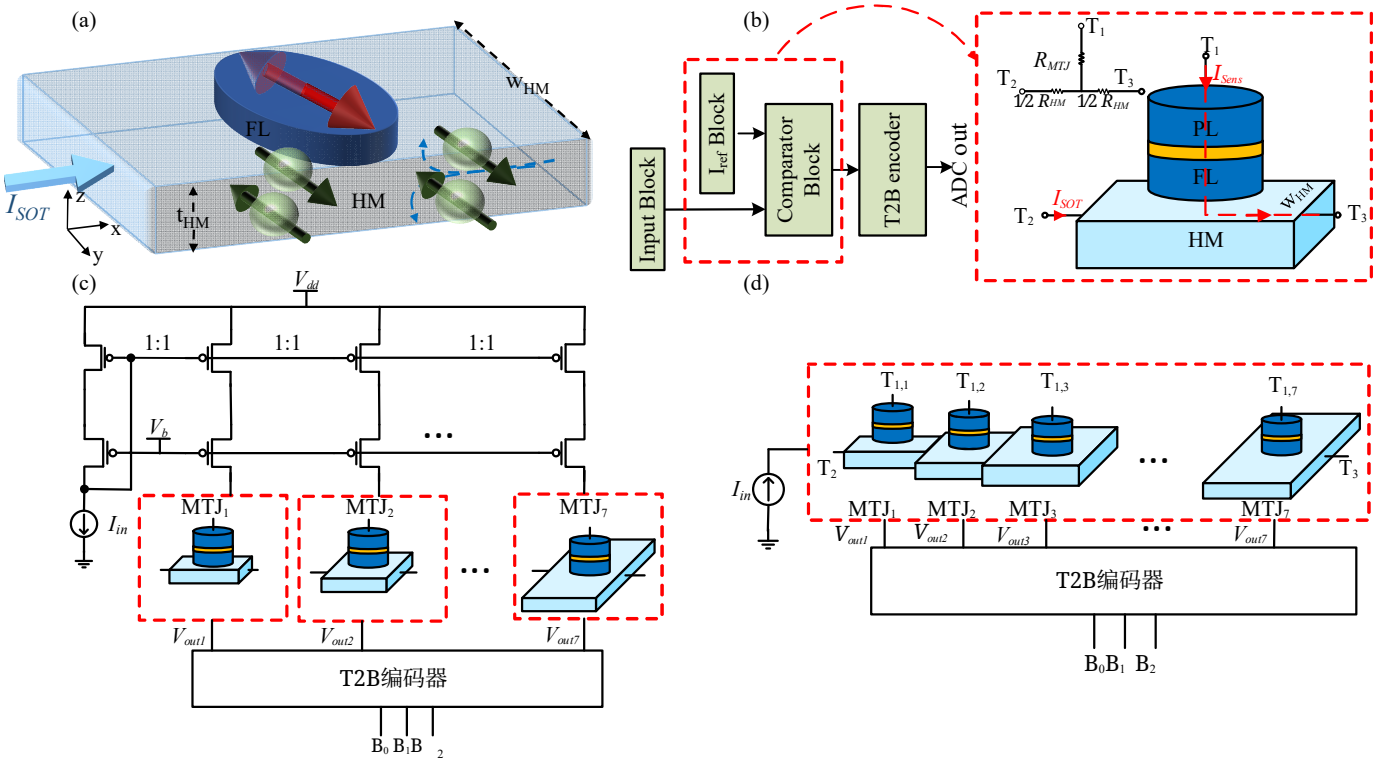

图1 (a) SOT开关的概念 (b) 电流型闪速模数转换器的框图。I_{ref} 和比较器模块可替换为基于自旋轨道转矩的磁隧道结。(c) 3位自旋-CMOS闪存型模数转换器（pa 并行设计）（d）3位自旋-CMOS闪存型模数转换器（串行设计）。

量化器用于感测每个磁性隧道结电阻 [20]。相邻重金属的电阻差异通过调整感测电路中晶体管的尺寸来补偿[21]。然而，在所提出的解决方案中，缓解磁阻退化问题的代价是增加感测电路的复杂度。

本文研究了基于自旋电子器件实现模数转换器的概念验证，为未来的自旋-CMOS 模数转换器提供设计指南。为此，本文提出、设计并表征了一种自旋-CMOS 模数转换器，其中，基于自旋轨道转矩的磁隧道结及其 $I_{SOT,crit}$ 在传统电流型闪速模数转换器中分别用作比较器和参考电流（I_{ref}）。不同于文献 18-20 中提出的结构，该结构将面内各向异性磁隧道结（i-MTJ）置于并联支路中，以减轻磁阻降低问题并简化感测电路。通过比较从文献[19] 提出的结构中提取的测量数据与本文所述方法，展示了重金属电阻对磁阻的影响。测量结果表明，所提出的模数转换器的磁阻值高于文献[19] 中的结构，这意味着所提出结构的读取可靠性得以提高。输入电流（I_{in}）被复制到各个支路；当 I_{in} 高于磁隧道结的 $I_{SOT,crit}$ 时，磁隧道结将发生翻转。因此，每个 i-MTJ 的 $I_{SOT,crit}$ 可发挥电流型 CMOS 闪速模数转换器中 I_{ref} 的作用。所有 i-MTJ 均设为平行态；若 $I_{in} > I_{SOT,crit}$，i-MTJ 就会切换至反平行态。调节重金属的宽度（w_{HM}），使每个磁隧道结的 $I_{SOT,crit}$ 与电流型 CMOS 闪速模数转换器的参考电流（I_{ref}、$2I_{ref}$、$3I_{ref}$.....）相匹配。此外，本文进行了蒙特卡洛仿真，以分析 i-MTJ 和晶体管的工艺偏差/失配对模数转换器参考电流的影响。为此，为每个 i-MTJ 设定一个服从高斯分布的随机变量。该变量的均值和标准差（σ）由 i-MTJ 的测量数据确定。此外，还将 CMOS 电路（I_{in}的电流镜）的偏差纳入考量，以提取 $I_{SOT,crit}$值。

自旋-CMOS 模数转换器自旋轨道力矩的原理

基于自旋轨道转矩的磁隧道结中自由层的切换机制如图1 (a)所示。在此结构中，电荷电流（I_{SOT}）沿 x 方向流经重金属。重金属中的自旋霍尔效应产生沿 z 方向的纯自旋流，其磁化方向沿 y 方向。该纯自旋流产生自旋转移转矩，可在临界自旋电流密度（$J_{s,crit}$）下切换自由层的磁化方向；对于所有名义上相同的磁隧道结，该临界值都相近。电荷电流密度与自旋流密度之间的转换效率由自旋霍尔角 θ 描述。因此，$I_{SOT,crit}$ 可表示为[22-24]

$$I_{SOT,crit} = J_{SOT,crit} t_{HM} w_{HM} = \frac{2e}{\hbar} \frac{J_{s,crit}}{\theta} t_{HM} w_{HM} \tag{1}$$

临界SOT，call change current density (J), the electron 的电荷 e，其中电子的自旋以约化普朗克常数表示 $\frac{\hbar}{2}$，重金属厚度为 t_{HM}。因此，切换所需的电荷电流与 w_{HM}成正 这些器件中调节临界电荷电流相对容易。

由输入端、I_{ref}、比较器以及温度计码到二进制码（T2B）编码器模块组成的电流型闪速模数转换器的原理图如图1（b）所示。闪速模数转换器分为两类：1）电压模式；2）电流模式。

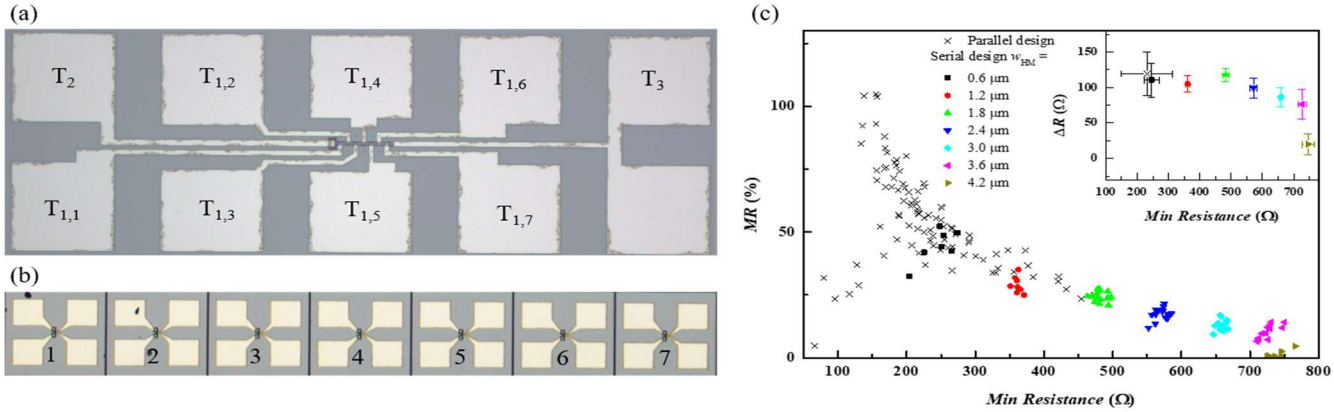

图2 (a) 串行设计和 (b) 并行设计的光学显微镜图像。(c) 不同 w_{HM}，条件下串行和并行设计的磁阻与最小电阻的关系；插图为电阻变化。

与电压型模数转换器相比，电流型闪速模数转换器具有一些优势，例如功耗更低，并且能够在更低的电源电压下工作[21]。输入模块将 I_{in}复制为多个副本，然后比较器模块将这些副本与来自 I_{ref} 模块的参考电流进行比较。比较器模块的输出由 T2B 编码器编码，并生成与输入信号对应的二进制数据，作为模数转换器的输出。因此，对于 n 位电流型互补金属氧化物半导体闪速模数转换器，需要 2^n-1 个权重不同的 I_{ref} 副本（即 I_{ref0}、$2I_{ref0}$、...、$(2^n-1)I_{ref0}$）以及 I_{in} 。本研究提出的主要思路是采用基于自旋轨道转矩的磁隧道结取代用于生成不同 I_{ref} 副本所需的电流镜电路以及比较器模块，如图1（b）所示。由于 I_{ref} 值是 I_{ref0}的倍数，电流镜电路中的晶体管尺寸会逐渐增大。用基于自旋轨道转矩的磁隧道结取代 I_{ref} 和比较器模块，可以缓解面积与失配问题。如图1（b）所示，作为输入电流（I_{in}）的 I_{SOT} 流经重金属层，从 T_2 流向 T_3；如前所述，基于自旋轨道转矩的磁隧道结充当比较器，因此会将 I_{in} 与其 I_{SOT}进行比较$_{crit}$ （充当 I_{ref} 模块）。为感测磁隧道结电阻，电流（I_{Sens}）流经磁隧道结及部分重金属层，从 T_1 流向（T_2/T_3）。图1（c）和（d）分别展示了采用并行设计和串行设计的两种3位自旋-CMOS闪速模数转换器。在这两种设计中，均使用七个基于自旋轨道转矩的磁隧道结构成一个分辨率为3位的模数转换器。通过调整 w_{HM}，可以调节 $I_{SOTcrit}$，使得增大 w_{HM}时，切换基于自旋轨道转矩的磁隧道结所需的电流也会增大[25]。为此，应合理设计每个磁隧道结的 w_{HM} ，以确保基于自旋轨道转矩的磁隧道结$_1$, SOT-based MTJ$_2$, ...、基于自旋轨道转矩的磁隧道结 7 的 $I_{SOTcrit}$分别等于 $I_{SOTcrit}$、$2I_{SOTcrit}$、$3I_{SOTcrit}$、...和 $7I_{SOTcrit}$。在串行设计[18-20]中，基于自旋轨道转矩的磁隧道结通过重金属层串联。如图1（d）所示，采用这种设计可以移除由 I_{in} 镜支路组成的输入模块（见图1（b））。然而，重金属电阻（取决于磁隧道结的位置）会降低磁阻和读取可靠性。例如，如果将 T_2 （图1（d））接地，那么根据图1（b）所示基于自旋轨道转矩的磁隧道结等效电阻网络，从 $T_{1,7}$ 到 T_2 由 I_{Sens} 感测到的电阻为 R_{MTJ7} + 1/2 R_{HM7} + R_{HM6} + ...+ R_{HM1}。因此，基于自旋轨道转矩的磁隧道结1的磁阻为 (R_{MTJ7}(反平行态)-R_{MTJ7}(平行态)) / (R_{MTJ7}(平行态) + 1/2R_{HM7} + R_{HM6} + ... + R_{HM1})，其中，R_{MTJ}(反平行态)和 R_{MTJ}(平行态)分别表示基于自旋轨道转矩的磁隧道结处于反平行态和平行态时的电阻。此外，从各磁隧道结的 T_1 端看到的电阻不同，会增加感测电路的复杂度。为缓解这一问题，本文提出了如图1（c）所示的并行设计。在该结构中，基于自旋轨道转矩的磁隧道结彼此分离；当所有磁隧道结处于相同状态时，从每个磁隧道结的 T_1 端看到的重金属电阻几乎相等。然而，必须通过电流镜（输入模块）复制 I_{in} ，并将其馈入每个基于自旋轨道转矩的磁隧道结。在两种设计中，每个基于自旋轨道转矩的磁隧道结中 I_{in} 与 I_{SOT}的比较结果$_{crit}$ 均以电压信号（V_{outi} ($1 \le i \le 7$)）的形式呈现。T2B编码器模块根据 V_{outi}生成3位数字输出（B_0, B_1, B_2）。基于自旋轨道转矩的磁隧道结状态感测及 T2B 的电路设计细节见[21]。

结果与讨论显微图像的

串行和并行设计分别如图2(a)和(b)所示。图2(c)展示了两种设计中磁阻与最小电阻（当磁隧道结处于平行态时I_{Sens} 所见的电阻）之间的关系。在串行设计中，T_2连接到地。对于串行设计，可以观察到磁阻随 i-MTJ 位置而变化；最低磁阻（对应 MTJ_7）与最高磁阻（对应 MTJ_1）之间相差约 47%。宽度为 4.2 微米的磁隧道结，其磁阻低于其他磁隧道结，因为如前所述，从 $T_{1,7}$ 到 T_2 所见的电阻较大。总体而言，由于重金属电阻较大，串行设计的磁阻低于并行设计。此外，并行设计中磁阻对 i-MTJ 位置的依赖性要小得多，因为从每个磁隧道结的 T_1 到地所见的电阻为R_{MTJ}+R_{HM}/2。

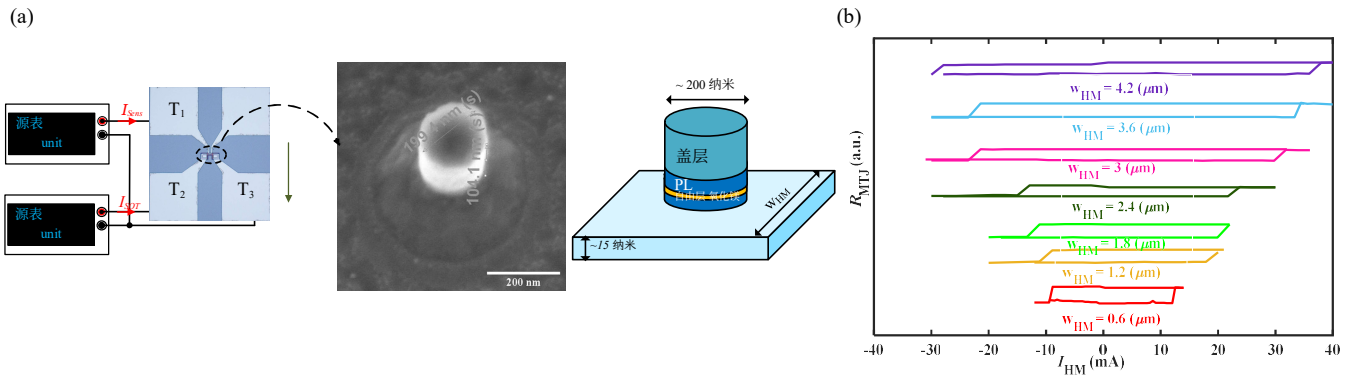

图3 (a) T 用于表征 SOT 的实验装置示意图。（b）不同 w_{HM} 下的电阻-电流回线。

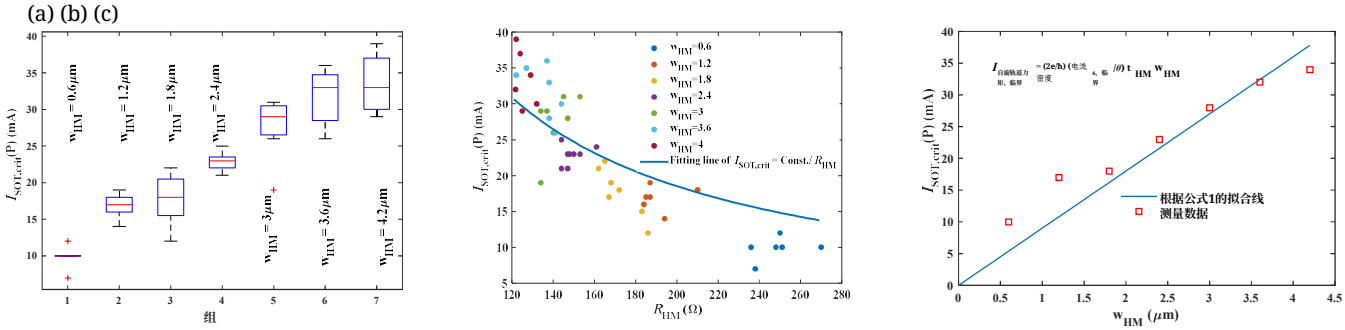

图4 (a) 不同 w 的$I_{SOT,\ ctit}$(P)箱线图 (0.6 微米、1.2 微米、1.8 微米、2.4 微米、3 微米、3.6 微米、4.2 微米)。(b) 各类别的$I_{SOT,\ crit}$(P)和R_{HM} fo的分布 r 7 w_{HM}各类别的(c) I_S平均值 $_{OT,ctit}$ (P) 与 w_{HM} 各类别的标称值 w_{HM}的关系。

可利用并联配置表征所得的测量数据，研究基于自旋电子器件的3位闪速模数转换器的概念验证实现。为此，采用图3(a)所示的实验装置对磁隧道结进行表征。首先，沿+y方向施加幅值为19 mT的外部直流磁场，将所有磁隧道结设为反平行态。随后移除外部磁场，并通过 T_2将 I_{SOT} 注入重金属层。接着，源测量单元施加幅值为100 μA的 I_{Sens}（直流电流），以测量 T_1 与 T_3之间的电阻。根据基于自旋轨道转矩的磁隧道结的等效电阻网络（图1b），该电阻为 R_{MTJ} + 1/2 R_{HM}。据报道，在这项测量中，样品切换前后的电阻变化量（R_{MTJ}(反平行态) - R_{MTJ}(平行态)）和磁阻分别大于68 Ω和20%。图3(b)展示了在没有外部磁场的情况下，7个具有不同 w_{HM} 的基于自旋轨道转矩的磁隧道结的电阻随 I_{SOT} 变化的关系。正（负）电流驱动磁隧道结从平行态切换到反平行态（从反平行态切换到平行态）。本文将平行态视为3位自旋-CMOS闪速模数转换器中磁隧道结的初始状态；在模数转换器[20]的转换阶段，磁隧道结会在称为 $I_{SOT,crit}$(P) 的临界电荷电流下从平行态切换到反平行态。在模数转换器的复位阶段，基于自旋轨道转矩的磁隧道结会在称为 $I_{SOT,crit}$ (AP) 的临界电荷电流下切换回其初始状态，此时电流方向与 $I_{SOT,crit}$ (P) 相反。此外，如所获得的电阻-电流回线所示，随着 w_{HM} 增大，电阻-电流回线的宽度也会增大。这意味着，如公式1所述，随着 w_{HM} 增大，$I_{SOT,crit}$(AP) 和 $I_{SOT,crit}$ (P) 也会增大。

图4(a)展示了七个类别的 $I_{SOT,crit}$ (P) 箱线图。每个类别均代表宽度 w_{HM}相同的 SOT-MTJ，其中类别 1、2、.....和 7 的 w_{HM} 分别为 0.6 微米、1.2 微米、.....和 4.2 微米。如图所示，随着 w_{HM} 增大，$I_{SOT,crit}$ (P) 呈上升趋势。MTJ_1, MTJ_2, ... MTJ_7 的 $I_{SOT,crit}$ 平均值分别为 1.6 mA、1.7 mA、3.45 mA、1.36 mA、4.16 mA、3.77 mA 和 3.94 mA。图4(b)展示了按七组不同 w_{HM} 划分的 $I_{SOT,crit}$ (P) 和 HM 电阻（R_{HM}）的分布。图中可观察到，根据 $I_{SOT,crit}$ (P) = const./ R_{HM} （公式1，且 R_{HM} = const. / (t_{HM} × w_{HM})）的关系，$I_{SOT,crit}$ 随 R_{HM} 增大而增大。如图4(a)和(b)所示，类别1、2和4（w_{HM}分别为0.6微米、1.2微米和2.4微米）的变化最小，而类别3、5、6和7的变化较大，且这些组的分布彼此以及与其他类别的分布相互重叠。这种较大的变化会导致基于磁隧道结的模数转换器设计出现非线性、缺码和精度低等问题。这种随机分布归因于 w_{HM}、t_{HM} 和磁隧道结的变化。尤其是 t_{HM} 较薄，且绝对变化较大，导致实际 HM 电流密度变化很大。反过来说，若考虑标称 HM 厚度，这一误差会导致自旋霍尔角发生变化。磁隧道结的变化主要源于纳米柱尺寸较小，与晶粒尺寸相近，因此会产生随机分布。图4(c)展示了 $I_{SOT,crit}$(P) 随 w_{HM} 的变化，其中方形标记和实线分别表示测量数据和拟合线。图中每个点均为从图 4(a) 提取的对应 w_{HM} 类别的平均数据。对数据进行拟合所得的拟合线决定系数（R^2）为0.8243，表示 $I_{SOT,crit}$ 与 w_{HM} 之间存在线性关系，如公式1所述。这种线性依赖关系使线性模数转换器特性得以实现。根据拟合线，我们可以确定

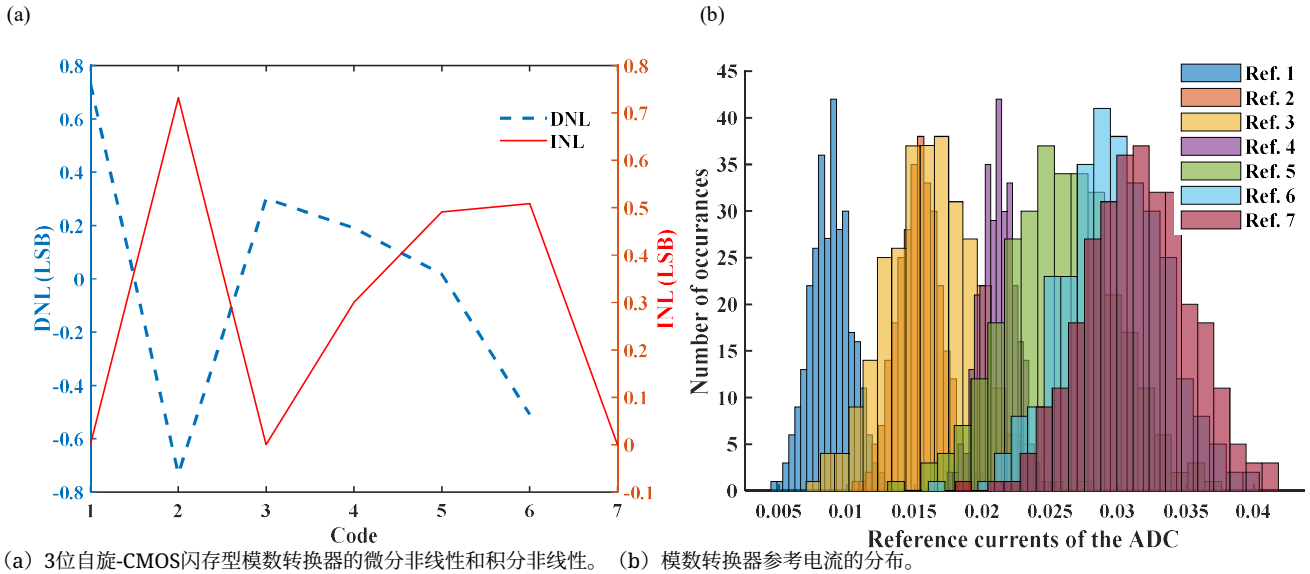

图5（a）3位自旋-CMOS闪存型模数转换器的微分非线性和积分非线性。（b）模数转换器参考电流的分布。

器件的特征临界电流密度 $J_{SOT,\ crit} = 0.6 \times 10^{12}\ \frac{A}{m^2}$，它描述了自旋轨道转矩电流切换磁隧道结的效率，并影响该模数转换器的精度。

所提出的模数转换器的微分非线性（DNL）和积分非线性（INL）特性如图5(a)所示。最大的DNL和INL分别为0.739 LSB（5 mA）和0.7319 LSB。仿真结果通过Verilog-A中的磁隧道结行为模型获得，该模型由测量结果提取而来。在该模型中，对于每个基于自旋轨道转矩的磁隧道结，$I_{SOT,crit}$ 是从图4(c)中提取的各类别均值。CMOS电路（I_{in}的电流镜）采用台积电180 nm工艺，并使用Cadence进行仿真。通过蒙特卡洛仿真评估磁隧道结和CMOS电路的工艺偏差/失配对模数转换器参考电流的影响。图5(b)所示的参考电流分布由300次仿真运行得到。每个图均包含I_{in} 电流镜（图1(c)）中CMOS电路的工艺偏差和失配分布，以及相关磁隧道结的工艺偏差分布。对于每个磁隧道结，均采用包含高斯分布变量的行为模型。该变量的均值和σ 取自图4(a)。仅当采用MTJ_1, MTJ_2, MTJ_4 和MTJ_7 时，±2σ 产率才能得到保证，而MTJ_3, MTJ_5 和MTJ_6 的直方图与其他$I_{SOT,crit}$ 分布高度重叠。因此，根据图4(b)，采用所制备磁隧道结时，所提出的模数转换器可实现的最大精度为2位。MTJ_1, MTJ_2, ...、MTJ_7 的σ 分别为1.5 mA、1.6 mA、3.3 mA、1.3 mA、4 mA、3.7 mA和3.8 mA。从图4(a)提取的σ 数值几乎相同，这意味着与晶体管的工艺偏差和失配相比，磁隧道结的工艺偏差占主导地位。

结论

本文设计、制造并表征了基于自旋轨道力矩的磁隧道结，用于实现3位自旋-CMOS闪存型模数转换器。研究验证了$I_{SOT,\ crit}$ 与重金属层宽度之间的线性关系，基于自旋轨道力矩的磁隧道结的品质因数（$J_{SOT,\ crit}$）为0.6×10^{12} Am^{-2}。本研究采用了七个重金属层宽度各不相同、彼此分离的基于自旋轨道力矩的磁隧道结。在这一结构中，磁隧道结及其$I_{SOT,\ crit}$ 分别充当闪存型模数转换器中的比较器和I_{ref} 模块。因此，电流型闪存CMOS模数转换器中功耗较大的比较器和用于生成I_{ref}的电流镜得以省去。用于感测磁隧道结电阻的电流，只需感测电流路径中一个磁隧道结的重金属电阻，从而显著提高了磁阻和读取可靠性。最大积分非线性和微分非线性分别为0.7319最低有效位和0.739最低有效位。此外，我们进行了蒙特卡洛仿真，以评估磁隧道结和互补金属氧化物半导体晶体管存在工艺变化/失配时模数转换器的精度。仿真结果表明，所提出的模数转换器精度仅为2位；未来可通过改进磁隧道结制造工艺来提高精度。

方法

提出了一种倒置的磁隧道结堆栈，采用三端几何结构，与先前研究中使用的结构类似[22,26-27]。该磁隧道结由 15 W/ 1.4 $CoFe_{40}B_{20}$/ MgO/ 2.2 $CoFe_{40}B_{20}$/ 0.85 Ru/ 2.5 $CoFe_{30}$/ 6 IrMn/ 5 Ru/ 140 Cu/ 30 Ru 组成（厚度单位为纳米），通过磁控溅射沉积在 Si (100)/ 200nm 热氧化 SiO_2 上。氧化镁厚度经过设定，使电阻面积积（R×A）达到 12 Ω.μm^2, ，因为当其低于 10 Ω.μm^2 时会观察到隧道磁阻（TMR）下降[28]。通过面内电流输运测量，该堆栈表现出 14.3 Ω.μm^2 的 R×A 和 144% 的 TMR。选择堆栈中的钨作为重金属，是因为据报道其 β 相具有较高的自旋霍尔角[29]。然而，只有钨厚度为几纳米（< 6 nm）时才可能形成该相[30]；这对器件制造颇具挑战，因为这会缩小柱体刻蚀的停止点裕量。通过调整沉积条件或引入一些缺陷，可以增加厚度

β-W[31-33] 的厚度。在我们的样品中，β-W 的厚度限制为 5 nm，因此我们决定牺牲自旋霍尔角效率，以获得可测量的器件。

纳米制造工艺与 Tarequzzaman等人[26]所述的相同。采用电子束光刻（EBL）制作直径为 200 nm 的纳米柱，并使用离子束铣削系统进行刻蚀。通过集成在刻蚀系统中的二次离子质谱，可以控制刻蚀过程，并在 15 nm 厚的 W层内停止。为确保电隔离和物理稳定性，将纳米柱埋入 800 nm 厚的硅 O_2 中，再通过掠入射离子束铣削进行平坦化，以露出柱顶。还使用 EBL 制作重金属线底电极，其长度为 6 微米，宽度在 0.6 微米至 4.2 微米之间变化。其他光刻步骤则采用直接激光写入，以实现与顶部和底部电极的电接触。

纳米制造完成后，将器件在 300 oC 下退火 2 h，并沿沉积过程中所用磁场的同一轴向施加 1T 磁场，以钉扎合成反铁磁层。退火后，厚度为 1.4 nm 的 $CoFe_{40}B_{20}$ 自由层呈现面内磁各向异性[26]。

数据可用性

支持本研究结论的数据　　可向通讯作者提出合理请求获取　　可根据合理请求向通讯作者索取。

参考文献

1. Zeinali, B., Moosazadeh, T., Yavari, M., & Rodriguez-Vazquez, A. 面向流水线模数转换器的基于均衡的数字后台校准技术。IEEE超大规模集成（

65, 9

& Moradi, F. LAU-NCS：基于激光辅助自旋力矩纳　　备的类脑计算系统。《神经科学前沿》，13, 1429, DOI: 10.3389/fnins.2019.01429 (2020).

27. Tarequzzaman, M., Jenkins, A. S., Böhnert, T., Borme, J., Martins, L., Paz, E., ... & Freitas, P. P. CoFeB/MgO 磁性隧道结中由线性偏

致谢

本研究部分由 SHADE 项目的玛丽·斯克沃多夫斯卡-居里个人奖学金（IF）资助，合同编号为 897733；另部分由欧盟地平线 2020 FETOPEN 计划下的 SpinAge 项目资助，资助编号为 899559。

作者贡献

HGH、HF 和 FM 设计并开展了研究，并与 TB、LB、LB、PA 和 RF 共同撰写了稿件。PA 和 RF 制备了用于测试和表征的磁隧道结样品，相关测试和表征由 HGH、LB、PA、TB 和 RF 完成。

利益冲突

作者声明不存在利益冲突。