

2023 年
第 12 期

先进制造 与新材料

ADVANCED MANUFACTURING
& NEW MATERIALS BRIEFING



上海科学技术情报研究所
上海市前沿技术发展研究中心
技术与创新支持中心(TISC)

多铁性材料在信息储存领域应用前景广泛

编者按

多铁性材料 (Multiferroic materials) 是指同时具有铁电性和铁磁性的一类多功能材料,能同时对外加磁场和外加电场进行信号响应,相应于有四个逻辑态 (现有的信息存储材料只有两个逻辑态),可极大地提高信息存储密度,被称为信息存储终极材料,具有重要的理论意义和应用前景。在信息化时代背景下,多铁性材料的研究与应用受到关注,包括美国、日本、中国在内的全球多个国家均在进行多铁性材料研究。

本期《先进制造与新材料》简报对多铁性材料的发展史、技术和应用动态进行介绍。



目 录

发展史.....1

 多铁性材料领域开拓者和领军人物 Sang-Wook Cheong 访谈.1

 电场驱动磁翻转的十年发展史4

技术.....6

 仅靠全光学特征鉴别单层多铁性材料引发争议6

 自支撑多铁性薄膜材料的研究机遇7

 新加坡国立大学专利：用于下一代存储设备的多铁性材料.....9

应用10

 多铁性材料有望成为未来信息存储的领航者10

发展史

多铁性材料领域开拓者和领军人物 Sang-Wook Cheong 访谈

铁磁性材料和铁电性材料都相对常见，但同时具备两者性质的多铁性材料则十分罕见，在最近 20 年左右才得到众多科学家的重视和研究。《国家科学评论》（National Science Review, NSR）对多铁性材料领域的开拓者和领军人物——韩裔美国科学家 Sang-Wook Cheong 进行了专访，本刊摘编如下。Cheong 的实验室位于美国罗格斯大学，这是一所具有 250 余年历史的公立综合性大学。

一、五花八门的多铁性材料

NSR：在多铁性材料的研究历史中，有哪些具有重要意义的发现？

Cheong：20 世纪 60 年代，有科学家发现在低温条件下，某些铁电材料同时也具有磁性，这可以算作是多铁性材料研究领域的起源。欧洲和俄罗斯的几个研究组跟进这一成果，并且发现了一种非常重要的多铁性材料：铋铁氧体（ BiFeO_3 ）。在这之后，多铁性材料领域沉寂下来，直到 21 世纪初两个重要发现的出现。

第一是 CME 效应，也就是庞磁电效应的发现。CME 效应是指，在一些材料中，由外加电场或磁场控制的多铁相变可以引发非常巨大的磁电效应。而磁电效应，也就是材料中磁与电的相互耦合，正是多铁性产生的基础。有了磁电效应，我们就可以用磁场控制材料的电极化性质，或者用电场控制材料的磁化性质。在 TbMnO_3 、 TbMn_2O_5 等第 II 型多铁性材料中，都存在 CME 效应。

第二是 BiFeO_3 材料制备工艺的成熟。2003 年，研究者发现 BiFeO_3 的剩余极化强度很高，是一种实用性能很好的多铁性材料。现在，我们有能力制备高品质的 BiFeO_3 单晶和薄膜，这对于实用多铁性器件的发展具有重要意义。

在我看来，这两个重要发现是这一领域得以发展的关键。

NSR：钙钛矿结构材料（化学式 ABO_3 ）是近年来材料科学领域的明星。很多多铁性材料都是钙钛矿结构，这是为什么？

Cheong：钙钛矿结构有其独特之处。首先，它具有高度的灵活性。我们可以通过元素替代，将各种元素加入钙钛矿结构中，使材料具有包括磁性在内的各种性质。其次，钙钛矿结构是一种立方或准立方晶格结构，具有高度的对称性，



而这种对称性是可以被内部、外部的各种扰动所破坏的。当它的空间对称性被破坏，就能够获得铁电性。我想，这些原因综合起来，使得钙钛矿结构易于获得多铁性。

NSR: 我对有机多铁性材料很感兴趣，有机物如何获得多铁性？和无机多铁性材料相比，它有哪些优势和劣势？

Cheong: 有机材料的柔性很高，它的空间对称性很容易被破坏，也就是可以获得铁电性。如果我们再向其中加入磁性金属离子，又可以使它获得磁性。于是综合这两点，有机材料就可以成为多铁性材料。

有机多铁性材料的优势和劣势都来源于其晶格较高的柔性和灵活性。晶格的柔性和灵活性使我们容易获得各种各样的有机多铁性材料，这是它的优势；同时，高柔性也使得有机材料相对不稳定，这是它的劣势。

所以我认为，对于科学研究来讲，有机多铁性材料是很有趣的研究对象，但如果要用它制备室温、长寿命的器件，目前还有困难。

NSR: 多铁性材料的主要应用有哪些？

Cheong: 多铁性材料可以用于制造需要磁电耦合性能的器件，比如低能耗的存储器件。硬盘等存储器件都是用磁化来记录信息的。使用多铁性材料，就可以通过外加电场来改变材料的磁化性质，完成记录。改变电场所需的能量是很低的——因为只需要改变电压，不需要产生电流，也就不产生能耗——所以整个存储器件所需的能耗就会很低。

另一个应用实例是高频器件，包括高频滤波器、高频电感器等。多铁性材料中，晶格与自旋之间的耦合可以产生高频、可控的震荡，这使得它适用于高频器件。

二、有趣的畴壁

NSR: 您的很多工作都与畴壁相关。“畴”和“畴壁”的概念是什么？

Cheong: 多铁性材料中，自旋和电偶极子会按不同的方向排列。材料中，自旋和偶极子以某一特定方向统一排列的一个区域就叫做“畴”（domain），两个畴之间的交界区域就叫做“畴壁”（domain wall）。

NSR: 畴的尺寸有多大？

Cheong: 畴的尺寸可大可小，通常在微米量级。铁电畴壁的厚度通常小于 1 纳米，大概是几个埃米；而磁畴壁的厚度却可以达到 1 微米。所以，多铁畴壁的厚度在 1 纳米到 1 微米之间不等。在第 II 型多铁性材料中，我们可以通过控制



相变来控制畴和畴壁的大小。事实上，对畴和畴壁尺寸的理解和调控，是一个重要的研究方向。

NSR：我们为什么要研究畴壁？

Cheong：不同的畴具有不同的性质，而作为畴与畴之间的过渡地带，畴壁的性质又与畴的性质不同。目前，我们对于畴的性质了解很多，但畴壁的很多性质还有待探索。

如果一块材料的尺寸超过了单个畴的尺寸，那么它就一定包含多个畴，也包含畴壁。这时候，畴壁的性质就会影响材料的整体性质。所以为了准确研究材料，我们就必须要更深入地了解畴壁。

三、未解之题

NSR：多铁性材料领域中，有哪些重要的问题尚待解决？

Cheong：首先，我们现在还很难从零开始设计出新的多铁性材料。我们现在有能力预测材料的铁电性，但是要预测材料的磁性就难得多，更不用说对多铁性的预测了。其次，多铁相变的动态过程还有待研究。最后，畴壁，包括畴壁网络的性质还有待研究。

NSR：AI 技术发展很快，它可以帮助我们预测和设计多铁性材料吗？

Cheong：AI 技术擅长处理大数据、复杂系统的问题。而多铁性材料符合这些特点。近年来，实验设备快速发展，越来越高的空间、时间分辨率带来了大量的实验数据。而畴壁、畴壁网络的平衡和拓扑结构又十分复杂。所以我认为，与第一性原理、材料基因组等传统计算机方法相比，AI 是一个值得探索的方向。

最近的一次学术会议上，Lehigh 大学的 Joshua Agar 教授就做了相关报告，他希望能够用机器学习方法来预测多铁性材料。相关的研究工作还处于初级阶段，我还不能肯定地说 AI 一定能带来突破，但它一定是值得尝试的。

NSR：您本人最近的研究方向有哪些？

Cheong：我的研究组致力于合成高质量样品，也同时进行材料的表征。如你所知，我主要的兴趣点在于多铁性畴壁。我们利用 AFM/STM 等先进仪器，来研究畴壁相关的诸多问题。

此外，我们还和很多其他研究组合作，包括关注多铁性材料动态过程的研究组、主要做理论的研究组等。我们为他们提供优质样品，共同开展研究。在多铁性材料领域，我的研究组已经算是比较大的组，但是我们依然没有能力开展所有相关课题的研究，所以研究组之间的合作十分必要。



NSR: 您认为在未来几年中, 这一领域可能获得的重要进展有哪些?

Cheong: 首先, 我个人肯定希望在畴壁领域能有进展, 希望我们能够更好地理解畴壁的各种静态、动态和拓扑性质。此外, 在高性能多铁性器件, 尤其是室温、可控性良好的器件的制造领域, 可能会有新的进展。

资料来源: Zhao W .Pas de deux of electricity and magnetism:an interview with Sang-Wook

Cheong[J].国家科学评论: 英文版, 2019(004):006.

电场驱动磁翻转的十年发展史

利用磁电耦合实现电场驱动磁翻转是多铁性材料领域的重要方向, 有望用于大幅降低自旋电子学器件的能耗, 并为解决日益增长的数据处理用电问题提供一种新方案。

虽然电控磁性器件的应用远景非常诱人, 但器件化需要实现往复可控的电场驱动磁畴态翻转, 尤其是 180° 磁翻转, 这一任务困难重重。通常多铁材料磁电耦合都比较弱且工作温度较低, 因此难以在室温下承载有效的磁翻转。为应对这一挑战, 人们通过建构不同结构复合多铁异质结, 并提出了多种耦合机制, 如界面应变/应力耦合、界面电荷媒介耦合、铁磁/反铁磁交换偏置耦合等, 获得了较高的室温磁电耦合, 进而实现初步电控 180° 磁翻转。然而这种 180° 磁翻转并不可控, 虽然可以通过外磁场辅助提高 180° 翻转的可控性, 但在实际器件应用中将增加器件复杂性和难度。而纯电场驱动磁翻转, 尤其是确定性的 180° 磁翻转, 依然困难重重。究其原因这是由于 180° 磁翻转属时间反演操作, 而电 (极化) 翻转属空间反演变, 且两者相互独立, 可以想象通过空间反演撬动确定性时间反演变化难度之大。

近十年来, 得益于对纳米多铁异质结设计和畴翻转动力学的精准调控, 电控磁翻转取得了一系列重要突破。一方面的突破是由于尺度的缩小, 使通过形状各向异性调控和设计磁畴形态及其翻转动力学成为可能。在此基础上, 巧妙地通过施加超快电脉冲时间分步翻转干预畴翻转动力学的过程 (类似打破时间反演对称过程), 最终实现电控 180° 畴翻转。例如, 在应力/应变型磁电耦合的 $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ (PMN-PT) 压电衬底的纳米多铁异质结中, 可通过多步磁翻转法实现纳米磁畴 180° 往复翻转。另外一方面, 在基于界面交换耦合的铁酸铋



(BiFeO_3 , BFO)基多铁异质结（如 BFO 薄膜和微纳 CoFe 磁体体系）中，通过精准调控铁电畴精细翻转方式，可间接带动不同形式的磁翻转（ 90° 或 180° 畴翻转）。在此基础上，通过对 BFO 薄膜进行 La 掺杂降低其矫顽场，还可进一步降低驱动开关电压至 200-500mV 以内，并显示出构筑 aJ/bit 级低能耗器件的可能性。另外，通过引入斯格明子等拓扑畴序构，可实现电场驱动稳定的多拓扑态翻转或精准调控斯格明子数目，为开发新型多态磁电器件提供了新原理。这些重要进展为开发低能耗的磁电器件打下重要基础。然而，为发展能耗接近 aJ/bit 的信息器件，还需进一步降低极化翻转电压，提高超小尺度器件（10nm 尺度）极化翻转的综合性能，并探求电控磁的新机制和新方法等。

资料来源：张兴晨,田国,高兴森.电场驱动磁翻转--面向未来的低耗能磁电信息器件[J].物理, 2023, 52(2):9

技术

仅靠全光学特征鉴别单层多铁性材料引发争议

2022 年 5 月 24 日，来自麻省理工学院的 Riccardo Comin 教授（通讯作者）、宋谦（第一作者）等人在 *Nature* 杂志上报道多铁有序可以存在于单层二维材料中，他们的发现仅仅是基于间接的二次谐波产生（SHG）和线性二色性（LD）方法的全光学实验数据，更严重的是，原论文作者无视了一个不可忽视的事实，即磁序也可以通过打破反演对称性直接导致 SHG 和 LD 信号，而无需诱导 FE 极化。同时，自始至终，该文没有提供任何少层 NiI_2 的磁性数据。

2023 年 7 月 19 日，新加坡国立大学仇成伟教授和电子科技大学彭波教授在在 *Nature* 的 *Matters Arising* 栏目以“Dilemma in optical identification of single-layer multiferroics”为题发文，通过实验和理论对上述成果进行了质疑。主要存在的争议点是 Riccardo Comin 等人将观察到的 SHG 和 LD 信号归因于由磁序诱导的空间反演对称性破缺而不是铁电极化，因此不能支持单层多铁性的发现。单凭全光学表征不能作为“铁电极化”存在的证据，在单层磁序与铁电极化共存时中尤为明显。

新加坡国立大学研究人员认为， NiI_2 单层可能是二维多铁性的候选材料，但除了全光学结果之外，必须需要更直接的证据。原论文中给出的实验数据不足以支持作者的结论，需要更直接的磁和电测量来确认 NiI_2 单层的多铁性。原论文缺乏 SHG 或 LD 域的磁场和电场控制，因此无法确定光信号是由磁序还是铁电极化产生。同时，原论文必须提供单层 NiI_2 的直接磁性证据，如 MOKE 或 RMCD 磁滞回线和磁畴空间成像。因此，根据目前的证据，多铁性单层的发现是值得怀疑的。

随后，Riccardo Comin 和 Qian Song 以“Reply to: Dilemma in optical identification of single-layer multiferroics”为题在《*Nature*》上发文回复质疑。作者表示原文章将重点放在利用 LD 和 SHG 的组合来寻找顺磁基态的证据上。电偶极 SHG（ED-SHG）的存在只能支持反转对称性破缺，而不能支持极性基态。在晶格反转对称性被打破的系统中，ED-SHG 成为允许的，而且在大多数情况下，它是主要的贡献者。然而，在中心对称系统中，ED-SHG 仍然是允许的，相反，



磁结构打破了反转对称性，双层 CrI_3 的反铁磁态就是这种情况。根据计算结果表明晶格 SHG 响应比磁性贡献占主导地位。

尽管如此，论文并没有纯粹根据 ED-SHG 得出 NiI_2 具有极性的结论。相反，作者所采取的方法是基于证明 NiI_2 处于顺磁基态，利用 LD 和 SHG 的组合来分别探测定义这种状态的破碎对称性，即三重旋转对称性和反转对称性。

作者跟踪这些特征的共存情况，直至单层极限，从而为所有研究的层数建立了稳健的低磁基态。因此， NiI_2 的情况与前面提到的双层 CrI_3 和 FePS_3 的情况有本质区别，前者显示 SHG 或 LD，而后者则不同时显示 SHG 和 LD。

在理论方面，作者采用了原子序数方法，在密度函数理论水平上估算了微观自旋电荷耦合。分析表明，电偶极子是由一对自旋之间的广义自旋电流机制诱导的。从微观角度来看，自旋螺旋与电极化之间的耦合是由于自旋轨道耦合，这在 NiI_2 中非常重要。在研究中，自旋轨道耦合的强度是通过磁电 $\mathbf{M}$ 张量进行最先进的密度泛函理论模拟，并从电子结构计算中得到的输入进行量化的。

最后，作者表示他们同意全光测量是检测多铁性状态的间接方法，尽管这种方法很可靠。正如作者在原文末尾所讨论的，通过压电响应力显微镜或高灵敏度热释电电流测量进行进一步表征，对于更深入地观察铁电有序非常重要。

资料来源：Yucheng Jiang, et al. Dilemma in optical identification of single-layer multiferroics.

Nature, 2023, 619:E40–E43. <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06107-3>

自支撑多铁性薄膜材料的研究机遇

当前，多铁性材料在基础及应用研究方面仍存在许多亟待解决的科学技术问题，譬如寻找及制备室温以上铁电/铁磁且具有强磁电耦合效应的多铁性材料，以及解决与半导体的器件集成中的瓶颈问题等。

多铁性材料根据组成的不同，可以分为单相和复合两类：其中，单相多铁性材料以第 I 类多铁性物质 BiFeO_3 和第 II 类多铁性物质 TbMnO_3 为典型代表。第 I 类多铁性物质中铁电性与磁性来源于不同的结构单元，两者之间的耦合较弱，与晶格对称性破缺产生铁电极化不同，第 II 类多铁性物质中的铁电性来源于特定自旋有序态形成的超自旋流和电荷序形成的空间电极化，具有明确的量子调控可能性，但多数材料的居里温度或奈尔温度很低，寻找具有室温以上强磁电耦合效



应的单相多铁性材料仍然是多铁性材料研究所面临的重要挑战。复合多铁性材料则是将具有不同铁性的单相材料进行复合形成人工异质结，通过界面实现不同铁性之间的耦合。界面耦合的方式主要包括应变及电荷调控机制等。在应变调控机制中，可以将具有强压电性的铁电材料与具有强磁致伸缩效应的磁性材料进行复合，利用磁/电相的界面传递应变，可在室温下使材料具有较强的磁电耦合性。在电荷调控机制中，将铁电材料与磁性材料进行复合，利用外电场翻转铁电材料的极化取向，可以改变界面处束缚电荷的积累，并通过场效应进一步影响界面处磁性材料薄层中的载流子浓度及磁性，在此过程中，也往往伴随着铁电畴弹性翻转诱导的应变调控效应。由于室温下存在丰富的单相铁性材料，因此利用材料复合方式制备具有强磁电耦合的室温多铁性材料具有一定优势。按照复合结构来分类，可以将复合多铁性材料分为 0-3（纳米颗粒—块状基底），1-3（纳米柱—块状基底），2-2（薄膜—薄膜）等结构类型。与前两种相比，2-2 型薄膜异质结可以避免由铁电/铁磁序电阻失配造成的漏电流问题，且可实现晶格应变的均匀传递，但受限于宏观刚性基片施加的晶格约束作用，难以通过界面应变机制实现室温强磁电耦合效应。另外，多铁性材料主要为过渡金属氧化物陶瓷块体及薄膜体系，在实际应用层面如何解决晶格匹配以及工艺兼容性方面的限制，实现与半导体的器件集成还存在巨大的挑战。

自支撑多铁性薄膜的出现及其近年来的迅猛发展为解决多铁性材料研究所面临的问题带来了新的突破契机。人们通过各种特殊的方法在不破坏薄膜原子间原有化学键的同时，尝试打破薄膜与衬底之间的键合，将外延薄膜从单晶衬底上剥离出来，获得了结构稳定的自支撑薄膜。自支撑多铁性薄膜由于摆脱了衬底的晶格束缚，可以进行任意的拉伸、弯曲及堆叠，极大地释放了晶格调控自由度进而影响晶格—电荷—轨道—自旋的耦合与调控，为新型磁电功能氧化物低维材料的研究带来了众多新机遇：

- （1）探索氧化物多铁性材料在二维极限下的新物性；
- （2）脱离了衬底的束缚，自支撑薄膜具有极大的应变（应变梯度）自由度，解决了 2-2 型复合多铁性材料的应变传递所受的限制，有望在室温以上实现强磁电耦合效应。同时，单/双轴应变、应变梯度以及周期性应变等诸多加载方式也成为可能，为探索超常应变（应变梯度）状态下的新物性创造了条件；
- （3）将自支撑薄膜进行堆叠，可构建具有新物性的范德瓦耳斯异质结、转角异质结等人工结构，并探索其新物性；



(4) 自支撑薄膜可以自由地转移到不同目标基底上，为解决多铁性材料与半导体微电子器件集成提供了新途径。

目前，人们已成功制备多种（多）铁性自支撑薄膜并在其中发现了许多新颖的物理特性，已逐渐发展成多铁性材料领域的一个备受关注的新兴方向。

资料来源：聂越峰,刘明.自支撑多铁性薄膜材料研究的机遇与挑战[J].物理, 2023, 52(2):10.

新加坡国立大学专利：用于下一代存储设备的多铁性材料

新加坡国立大学开发了一种新的多铁性材料，具体地说，是一种由钼、氧和碲制成的多铁性化合物及其制备方法。除了钼(Mo)之外，还可以使用其他过渡金属，例如钨(W)、铌(Nb)或钒(V)。除了碲(Te)之外，过渡金属氧化物材料还可以掺杂来自第 16 族的其他元素，例如硒(Se)、钋(Po)和铷(Lv)。

氧化碲化钼(MoO_xTey)已被成功证明在室温下具有铁电和铁磁特性。它可以基于气相捕获两步化学气相沉积(VTCVD)生长。在 VTCVD 工艺中，使用 Ar 和 H_2 将混合有胆酸钠和碲粉的 Mo 前驱体（钼酸铵，AHM）带入反应区，在 SiO_2/Si 衬底上生长出高质量的二维大尺寸 MoO_xTey 晶体。材料的超薄膜和厚膜都可以通过调整生长条件来制出。控制相对成分的原理也适用于其他生长方法，例如分子束外延（MBE）、金属有机化学气相沉积（MOCVD）或激光烧蚀沉积。

这种多铁性材料通过实现低能量铁电写入和非破坏性磁读取解决了现有的 FERAM 和 MRAM 问题。

资料来源：National Center for Biotechnology Information (2023). PubChem Patent Summary for WO-2021107868-A1, A multiferroic material and a method of preparing the same. Retrieved July 27, 2023 from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/patent/WO-2021107868-A1>.

应用

多铁性材料有望成为未来信息存储的领航者

近年来，以计算机硬盘为代表的磁性存储设备呈现小型化趋势，要求存储设备在体积变小的同时，容量还要不断增大。这是因为每个磁盘片上存储信息的区域变小，存储密度变大。但由此导致磁信号也随之变弱了。

此时，基于巨磁阻效应（GMR）的读出磁头应运而生。巨磁阻效应可以在磁性材料和非磁性材料相间的薄膜层中观察到。即使在很弱的外加磁场下，这种结构物质的电阻值也可以产生很大的变化量。外加磁场的变化会改变两铁磁层的相对磁化强度取向平行或反平行。当两铁磁层的磁化取向相同（平行）时，通过的电流大电阻小；当两铁磁层的磁化取向相反（反平行）时，通过的电流小电阻变大。这二种不同的磁化状态下的电阻变化可高达 106，因此被称为巨磁阻效应。当巨磁阻效应应用于磁存储设备的高密度读出磁头时，即使是非常微弱的磁场，也可以引起足够的电流变化以便识别数据，从而大幅度提高了数据存储的密度，使存储单字节数据所需的磁性材料尺寸大大减少。因此，巨磁阻效应的发现者也获得了 2007 年的诺贝尔物理学奖。

巨磁阻效应关键之一是铁磁性材料。而铁磁性仅仅是多种“铁性”之一。这里“铁性”就是“铁的基本性质”，包括我们常常听到的“铁电性”、“铁磁性”、“铁弹性”等性能。如果一个材料同时具备其中的两种或者多种性能的“铁性”，这时它便成了“多铁性材料”。

多铁性材料是具有铁电性、（反）铁磁性、铁弹性等两种或两种以上“铁性”而有序共存，并由于多种序参量之间的相互耦合作用产生新的效应的新型材料。概括上讲，一些材料可以随外场（电场、磁场和应力）翻转而分别发生自发极化、自发磁矩或自发应变，并呈现非线性关系而出现电滞回线、磁滞回线或铁弹回线，这样相应的物质称为铁电体、铁磁体和铁弹体。三者可统称为铁性体。

分别具体上讲，某些具有非中心对称结构的电介质材料在一定温度范围内具有自发极化（正负电荷中心发生相对位移），而自发极化方向可随外加电场翻



转的性质称为铁电性；而某些材料在一定温度范围内具有自发磁化，且在很小的磁场下就能磁化到饱和，这类材料具有的磁性称为铁磁性；某些电介质材料在一定温度范围内，应力与应变的关系曲线并非线性，而呈现与铁磁体的磁滞回线及铁电体的电滞回线相似特征的现象，这种材料则具备铁弹性。从经典电磁学的角度，磁场不会改变铁电性（电极化方向），而电场也不会改变铁磁性（电子自旋）。但从量子物理的角度出发，铁电与铁磁耦合将会产生磁电效应，即磁场可以控制材料的电极化，或者电场调控材料的磁性。

近年来，5G、云计算、大数据等新型通信技术和 IT 技术的迅速发展产生了大量的数据，数据的膨胀速度比存储器容量的增大速度快，而目前存储器的主流是上文提到的电流控制磁头进行信息的读写。这会带来相当大的能耗问题。而利用多铁性材料的磁电效应，即用电场替代电流调控磁场是最有希望解决能耗问题的方案之一。多铁隧道结（组成磁头的关键材料）就是具有电场调控磁性功能性的存储器原型器件之一，从而满足人们对低功耗、高密度、快速读写、大容量的非易失存储器日趋紧迫的需求。

多铁隧道结作为多铁性材料应用的典型代表，多为铁磁/铁电(多铁)/铁磁三明治结构，是发展新型信息存储器的重要方向之一。两端的铁磁电极（FM）的磁化方向受磁场控制，而中间的铁电电极（FE）的极化方向受电场控制。由于多铁隧道结同时具备磁性隧道结的 TMR 效应和铁电隧道结的 TER 效应，因此，通过磁场和电场的控制可以达到四种不同的阻态。

TMR 效应（隧穿磁阻效应）：铁磁电极磁化方向平行时，隧道结呈低阻态。铁磁电极磁化方向反平行时，隧道结呈高阻态。**TER 效应（隧穿电致电阻效应）：**铁电势垒极化方向的改变，会使隧道结电阻发生变化，从而分别产生高低阻态。

这要归功于多铁隧道结的铁电/铁磁界面磁电耦合效应：在外加电场的作用下铁电势垒极化方向的改变，或是外加磁场作用下铁磁电极磁化方向的改变都会影响隧道结的电阻，从而产生四种不同的电阻状态。即这四种电阻状态的存在取决于上下电极的磁化方向（平行或反平行以及铁电势垒的极化方向）。

多铁性材料又可分为单相多铁性材料和复合多铁性材料。对于单相多铁性材料，其具有本征磁电效应，但大多数的单相多铁性材料的磁电耦合系数小，



无法在室温下实现强磁电耦合效应，难以应用化。铁酸铋是目前单相本征多铁性材料中唯一在室温下有望实现强磁电耦合效应的材料，其因丰富的物理内涵和潜在的应用价值而受到了广泛的研究。而复合多铁性材料则是通过铁电相与铁磁相的耦合产生磁电效应。因此，探索并研究铁电/铁磁界面磁电耦合的各种物理机制，阐明各个机制之间的相互竞争制约的关系相当重要。

然而迄今为止报道的室温多铁隧道结非常有限，且在室温下的磁电耦合效应还不够强，但是信息集成化存储的发展依然需要多铁性材料的领航。随着“后浪科学家们”的不断努力，也许在不远的未来，多铁性材料领航的新型信息存储器就会出现在每个人的电子设备中。

资料来源：中国科学院上海硅酸盐研究所. 未来信息存储的领航者——多铁性材料. (2020-8-13) [2023-8-20] http://ime.cas.cn/icac/learning/learning_2/202008/t20200813_5654365.html



地址：上海市永福路 265 号
邮编：200031
编辑：温一村
责编：崔晓文
编审：林鹤
电话：021-64455555
邮件：istis@libnet.sh.cn
网址：www.istis.sh.cn