

论坛二：量子材料论坛

分论坛主席：段文晖 彭新华 宋成

2-01

主题：强关联氧化物

关联电子体系在磁场中的莫特物理

李建新

南京大学物理学院、固体微结构物理国家重点实验室

电子间的强相互作用将使半满的量子材料体系成为莫特绝缘体。莫特绝缘体中，电子的电荷自由度因库伦相互作用 U 打开莫特能隙而被冻结，但自旋自由度不受莫特能隙影响，从而表现为电子的电荷和自旋自由度分离。其中，自旋交换相互作用由 $J = 4t^2/U$ (t 跃迁常数) 给出，通常比 U 小近二个数量级。通常的莫特绝缘体中 U 具有电子伏特的量级，所以目前所能达到的外加磁场只调控其自旋结构。典型例子包括磁场驱动 Kitaev 材料的磁基态由磁有序态转变为量子磁无序态[1]，以及自旋阻错量子磁体中磁场驱动的分数量化磁化平台等[2]。而莫特绝缘体在磁场中其电荷动力学的演化尚未研究。

近年来发展的转角莫尔体系因平带的出现为研究这一问题提供了机遇，其中转角过渡金属硫化物中平带带宽及相应的 U 可以调控至 10 毫电子伏特量级。由此，我们理论研究了莫尔哈伯德模型在磁场中的电荷动力学性质。利用集团微扰理论计算其相互作用准粒子谱，我们发现磁场同时塞曼劈裂莫特绝缘体中上下哈伯德带中自旋上下子带。由于系统固定在半满，上下哈伯德带总自旋电子占据几率守恒导致不同自旋方向电子在两个带间发生谱权重转移，从而使系统在磁场中表现为奇特的莫特绝缘体-金属-莫特绝缘体相变[3]。与实验合作，在转角 WSe_2 观察到相同的相变[3]。谱权重转移是莫特物理的本质体现，但以前只在掺杂莫特绝缘体中被发现[4]。我们的工作揭示了一类新的谱权重转移现象，即磁场驱动的未掺杂莫特绝缘体中上下哈伯德带间自旋劈裂子带谱权重的相互转移。

[1] J. Zheng et al., Phys.Rev.Lett. 119, 227208 (2017)

[2] Y. Shangguan et al., Nature Phys. (2023) 10.1038/s41567-023-02212-2

[3] LingNan Wei, et al., to be published; Z.L. Gu et al., to be published

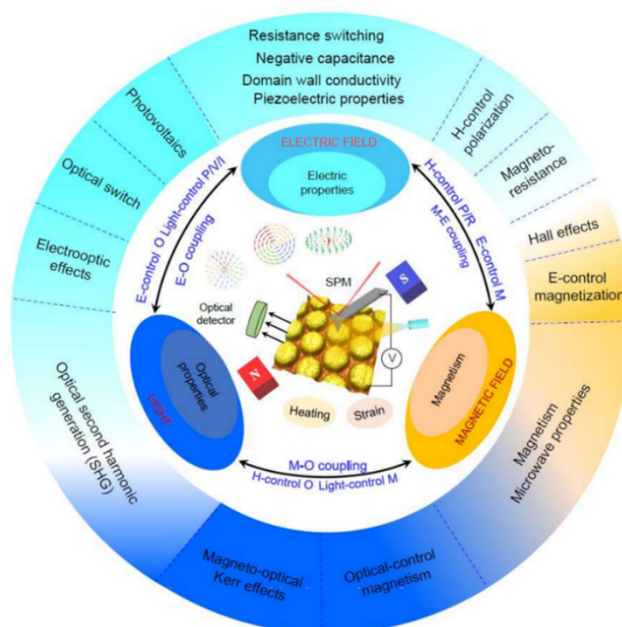
[3] P. Phillips, Rev. Mod. Phys. 82, 1719 (2010); W.H. Leong, S.Y. Yu, T. Xiang, and J.X. Li, Phys.Rev.B 90, 245102 (2014)

铁电与多铁性拓扑畴结构与新功能

刘俊明

南京大学物理学院

本报告将呈现过去十多年来我们课题组在铁电微纳结构中 (1) 如何实现拓扑畴, (2) 如何对其进行拓扑保护的结构和功能操控, (3) 如何将这些拓扑畴结构推向具有应用前景的器件原型验证。与此同时, 我们还在铁电 - 铁磁异质结结构中实现电控磁畴反转和电控磁 Skyrmion 的操控。这些工作构成了将传统铁电和多铁异质结材料推向量子材料层面研究的一种尝试, 也是验证所谓“针尖实验室”研究理念的一种尝试。



关联电子体系对称性的人工操控

张金星

北京师范大学 多尺度自旋物理教育部重点实验室

实现物质对称性的调控是研究凝聚态物理和创造新奇现象的重要基础。半个世纪以前, 物理学家安德森就提到凝聚态物质的研究即是对称性的研究, 朗道的唯象理论也特别指出物质相变的发生必然伴随着对称性的破缺。近年来的理论和实验研究发现, 同时打破空间和时

进而人工设计全新的量子现象和衍生功能。本报告我将重点介绍一种有效调控关联电子材料对称性和 DM 相互作用的手段：通过构筑具有非对称界面的氧化物超晶格，实现了时间反演和空间反演对称性的破缺，进而带来了由界面 DM 相互作用诱导的磁电相变。针对这种普适的对称性超控手段以及所衍生的物理现象，我还跟大家共同探讨在新概念传感、自旋电子学等领域的潜在应用。

关联氧化物界面上的反常量子振荡

程光磊

中国科学技术大学

关联氧化物界面上丰富的演生现象在量子工程中具有巨大潜力，有可能可以在单一材料平台中实现一些奇异量子态。然而，这种材料体系往往不具备量子工程所必需的高载流子迁移率。在这个报告中，我们提出了一种新的生长超洁净 $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ 界面量子材料的方法，揭示了一种高迁移率的次能带 ($\mu \sim 46,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)，其行为可以由一个量子修正多带模型描述。这种次能带导致了极低场非周期反常量子振荡，其具有异常轻的有效质量、 π 贝里相和对磁场的敏感性。所有实验证据指向输运在一维铁弹性畴壁上进行，并受时间反演对称保护。我们的发现统一了 SrTiO_3 电子系统中一维和二维物理现象的理解，为量子工程展示了一个良好平台。

主题：超快磁光

拓扑光学超材料

郭清华，项元江，文双春

湖南大学

拓扑物理是近年来兴起的一个新兴交叉学科，主要研究物理系统中受拓扑保护的、在连续变换下能够保持不变的各种特殊物理性质。拓扑光子学进一步将拓扑物理研究扩展到电磁波系统，开辟了光与物质相互作用的新领域。拓扑光子学体系不仅为实现各种奇异拓扑态提供了良好的研究平台，也为传统光学器件应用开拓了新颖的研究思路。超构材料是人工制造的结构单元远小于波长的光子结构材料，其光学性质可以通过有效均匀介质理论来描述。与由原子或分子有限变化组成的天然材料不同，超构材料可以通过对结构单元的设计表现出很多常规材料所不能提供的电磁特性，例如负折射率，双曲色散，以及显著的光学手性和双各向异性等等，为拓扑光子学研究提供了非常理想的平台。由于电磁波在超材料中的良好局域性，为各种拓扑物理新现象的实验表征提供了极大的方便。同时，超材料也为观察各种非周期性拓扑效应提供了一个强大的平台。在超材料的基础上，我们理论提出并实验证明了各种有深远意义的拓扑相，如光学外尔点、外尔面、狄拉克点、节线和节线链等。未来，更多新颖有趣的拓扑特性将会在超材料中被实现以及推向应用。

二氧化钒薄膜中的超快结构相变研究

钱冬

上海交通大学

二氧化钒 (VO_2) 在室温附近存在一个显著的绝缘体到金属的转变, 与之相伴的是晶体结构从单斜结构转变为金红石结构。这种电子结构和晶体结构的转变也可以由超快激光脉冲触发, 相变的时间尺度可以在飞秒尺度。在超快相变过程中, 一些奇异的瞬态被研究者所提出, 最著名的是不伴随晶体结构相变的瞬时金属态。上述特点让 VO_2 在热开关器件和光子器件中具有巨大的应用潜力。在过去十年间, 虽然已经做出了巨大的努力, 但在超快光诱导的相变过程中原子移动的途径仍然不太清楚。在这个工作中, 我们制备了无支撑的准单晶 VO_2 薄膜, 并利用兆电子伏特超快电子衍射研究了其超快光诱导的结构相变过程。有益于高信噪比和高时间分辨率, 我们首次从实验上发现 VO_2 中 V-dimer 及 V-zigzag 链的消失与晶体整体晶格对称性的转变并不是同时发生。光激发后, 初始晶体结构在 200 飞秒内发生强烈改变, 形成了没有 V-dimer 和 V-zigzag 链的瞬态单斜结构。然后, 它在大约 5 皮秒内继续演化到最终的金红色四方结构。此外, 在我们的准单晶样品中, 实验上只观察到引发结构相变发生的入射飞秒激光功率阈值, 而不是以往在多晶样品研究中建议的可能存在两个阈值。我们的发现[1]为全面理解 VO_2 中光诱导的超快相变提供了重要信息。

参考文献:

[1] Chenhong Xu, Cheng Jin, Zijong Chen, Qi Lu, Yun Cheng, Bo Zhang, Fengfeng Qi, Jiajun Chen, Xunqing Yin, Guohua Wang, Dao Xiang & Dong Qian, Nat. Comm. 14:1265 (2023).

Topological Quantum Optics: witness of topological phase transition and point-gap topology

吕新友

华中科技大学

In this presentation, I will firstly introduce the background of topological quantum optics and its applications. Secondly, I mainly introduce detecting topological phase transitions via an experimentally observable out-of-time-order correlation (OTOC). Specifically, the distinguishable OTOC dynamics appears in the topological trivial and nontrivial phases due to the topological locality, which is still valid even in the presence of disorder. Lastly, I will introduce our recent work regarding point-gap topology in quadratic bosonic system (QBS). We theoretically predict the

squeezing-induced point-gap topology in a QBS. A Z_2 skin effect, extremely sensitive to local perturbations, is found in the Hermitian system for the first time, which surpasses the Bloch's theorem. We also find a squeezing-induced unconventional topological phase where both the point-gap and line-gap topologies are nontrivial, and it is experimentally detectable. Our works is of fundamental interest in enriching the topological physics by introducing the OTOC and quantum squeezing, and has potential applications for the engineering of new-type quantum detecting technology and symmetry-protected sensors based on skin effect.

参考文献:

- [1] Q. Bin, L.-L. Wan, F. Nori, Y. Wu, and X.-Y. Lü*, Out-of-time-order correlation as a witness for topological phase transitions, **Phys. Rev. B (Letter)** 107, L020202 (2023).
[2] L.-L. Wan and X.-Y. Lü*, Quantum-squeezing-induced point-gap topology and skin effect, *Phys. Rev. Lett.*, 130, 203605 (2023).

超低损耗异质集成氮化硅光芯片：技术和应用

刘骏秋¹

¹深圳国际量子研究院

无论是经典的光通信还是量子信息技术，未来的信息系统将不得不面对日益增长的数据量和处理需求。传统的光纤技术将会在解决这些挑战上遇到瓶颈。近年来，随着半导体材料生长和微纳加工技术的发展，集成光学正在成为解决信息系统瓶颈的核心技术，并将产生数十亿至数千亿美元的市场需求。目前，除了硅和三五族半导体，许多材料已经被用于集成光学，包括氮化硅，氮化铝，铌酸锂，砷化铝镓，碳化硅，金刚石等。其中，由于氮化硅在通讯 1550 nm 波段没有双光子吸收，同时也是继硅和磷化铟之后集成光学第三主流平台，氮化硅已成为成熟的光芯片材料平台之一。更重要的是，目前氮化硅片上波导的光损耗可以低至每米 1 dB 甚至更低。毫无疑问，氮化硅光芯片正在成为一项关键技术，有望在未来对数个领域产生重要影响。本报告将介绍近年来超低损耗异质集成氮化硅光芯片技术的发展和其在量子信息、精密测量和传感、激光雷达、光计算等的前沿应用，并着重介绍报告人在本领域的一些列重要成果。

超快光激发反铁磁中电荷流的产生

黄琳¹、廖立杨²、邱红松³、潘峰¹、金飏兵³、宋成¹

¹清华大学，材料科学与工程学院先进材料教育部重点实验室，北京 100084

²东京大学，固体物理研究所，日本

³南京大学，电子科学与工程学院超导电子研究所，江苏，南京 210023

反铁磁具有太赫兹的固有频率和对外部干扰场的高稳定性，是开发新型存储和逻辑器件

的主要候选材料之一。反铁磁的高固有频率为超快自旋电流和产生超快电荷电流提供了机会。例如，在 AFM/HM 双层膜结构中，通过检测逆自旋霍尔效应 (ISHE) 转换的电压信号，观察到亚太赫兹自旋泵浦过程[1, 2]。基于这种自旋泵浦效应，实现了基于反铁磁的太赫兹发射源，并可通过 ISHE 产生超快电荷电流[3, 4]。Néel 自旋轨道转矩允许电荷电流脉冲有效地操纵反铁磁中的 Néel 矢量，这为高速超高密度信息存储提供了独特的机会。然而，反铁磁中 Néel 自旋-轨道转矩产生超快电荷电流的逆过程尚未得到证实。

本研究报道了利用超快光激发反铁磁性金属 Mn_2Au 单层膜从而产生电荷电流的过程。 Mn_2Au 是一种具有磁性亚晶格对称性破缺的反铁磁金属，当飞秒激光照射在薄膜表面时，飞秒激光脉冲触发 Mn_2Au 中 Néel 矢量的振荡，导致 Mn 亚晶格上的局部非平衡自旋极化 ($\sigma_A = -\sigma_B$) 出现相反的符号。由于局部逆对称性破缺，电子的交错自旋极化通过自旋-轨道耦合直接转化为电荷电流。磁荷电流可表示为 $J \propto \sigma_{(A,B)} \times \hat{z}$ ，其中电荷电流 J 与自旋极化 $\sigma_{A,B}$ 正交，这被称为 Néel 自旋轨道转矩的逆现象，并在室温下检测到太赫兹波的发射。由磁振子振荡产生的反铁磁电流可作为反铁磁太赫兹发射的有利组成部分，并为从 Onsager 互易的角度深化对 NSOT 的理解提供了一个有利的平台，还将推动反铁磁太赫兹发射极的发展。

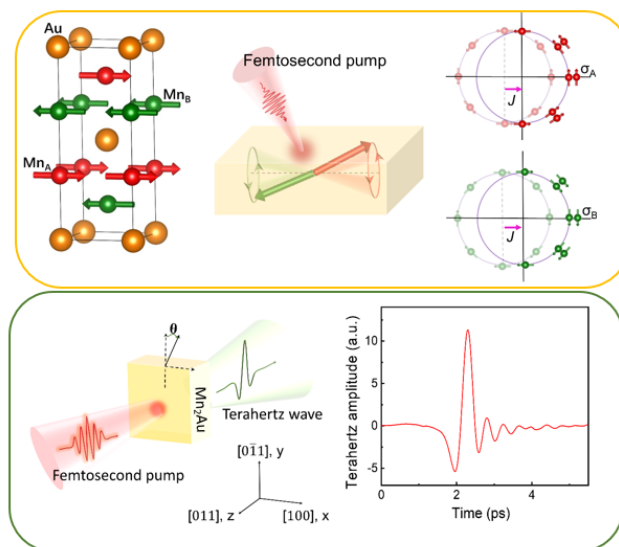


图 1. 上图： Mn_2Au 中磁荷电流产生的原理图。下图：实验装置示意图和太赫兹发射频谱。

关键词：反铁磁、太赫兹发射、磁振子

参考文献：

- [1] J. Li, C. B. Wilson, R. Cheng, M. Lohmann, M. Kavand, W. Yuan, M. Aldosary, N. Agladze, P. Wei, M. S. Sherwin, J. Shi, Nature 578, 70–74 (2020).
- [2] P. Vaidya, S. A. Morley, J. van Tol, Y. Liu, R. Cheng, A. Brataas, D. Lederman, E. D. Barco, Science 368, 160–165 (2020).
- [3] H. Qiu, L. Zhou, C. Zhang, J. Wu, Y. Tian, S. Cheng, S. Mi, H. Zhao, Q. Zhang, D. Wu, B. Jin, J. Chen, P. Wu Nat. Phys. 17, 388–394 (2021).
- [4] E. Rongione, O. Gueckstock, M. Mattern, O. Gomonay, H. Meer, C. Schmitt, R. Ramos, T. Kikkawa, M. Mićica, E. Saitoh, J. Sinova, H. Jaffrès, J. Mangeney, S. T. B. Goennenwein, S. Geprägs, T. Kampfrath, M. Kläui, M. Bargheer, T. S. Seifert, S. Dhillon, R. Lebrun, Nat. Commun. 14, 1818 (2023).

2-02

主题：自旋波

从微电子学到自旋电子学和磁子学

韩秀峰

中国科学院物理研究所

物理学家布洛赫(F. Bloch, 1905–1983, Nobel Prize in 1952)早在 1930 年提出了自旋波及其量子化激元-磁激子(简称磁子)的物理概念,随后在 1957 年被实验物理学家伯特伦·布罗克豪斯(B. Brockhouse, 1918–2003, Nobel Prize in 1994)采用非弹性中子散射实验所证实。这种存在于磁有序系统中的自旋波(磁子),像光波一样也具有波粒二象性,可以用来定向且长距离地传输自旋信息。然而,在过去长达近 90 年的时间里,具有应用价值且可与现有 CMOS 电路相互兼容和集成的层状垂直式微纳尺度磁子型元器件却少有报道,是国际前沿的一个极具挑战性的未解难题。借鉴过去 70 余年半导体微电子学的发展路径和成功经验,可以对比看出目前经过 30 年黄金发展期的自旋电子学以及目前正在兴起的新兴学科-磁子学,会给未来信息科学技术的可持续发展带来强劲的发展动力和崭新的技术途径。

报告人及其研究团队近几年通过持续研究,在国际上率先采用室温亚铁磁-钇铁石榴石 Y₃Fe₅O₁₂ (YIG)等磁性绝缘体作为磁性电极、非磁性金属 Au/Pt 或反铁磁绝缘体 NiO、CoO、Cr₂O₃ 等作为间隔层、Pt 作为电极,利用磁控溅射方法制备出了高质量的 YIG/Au/YIG 和 YIG/Pt/YIG 磁子阀、YIG/NiO/YIG 和 YIG/CoO/YIG 磁子结、Pt/YIG/Pt 磁子异质结(即磁子发生器和探测器)、YIG/NiO/Pt 和 YIG/CoO/Pt 及 YIG/Cr₂O₃/Pt 磁子异质结等关键磁子元器件。率先发现或提出了 6 种新奇的磁子量子效应:包括磁子阀效应(MVE)、磁子结效应(MJE)、磁子阻塞效应(MBE)、磁子非局域自旋霍尔磁电阻(MNSMR)效应、磁子共振隧穿(MRT)和共振透射(MRT)效应、磁子趋肤效应(MSE)等。还实验观测到并证实了其它 2 种磁子学专家理论上预测的磁子转移力矩(MTT)效应和磁子媒介的电流拖拽(MECD)效应等。基于上述磁子量子效应调控的新型磁子器件,在微纳米尺度上可以构成纯电学调控的磁子发生器/探测器和电荷隔离器、磁子晶体管以及磁子流开关与调控等关键元器件,是未来发展第三大类无电荷流和焦耳热的固态磁子学材料及磁子晶体管、逻辑、存储及处理的磁子型电路关键元器件。为发展新一代自旋信息材料和器件及其电路,拓展了新的发展技术路径、奠定了新的器件物理基础。

参考文献:

- [1] V. V. Kruglyak, S. O. Demokritov and D. Grundler, Magnonics. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** (2010) 264001.
- [2] A. A. Serga, A. V. Chumak and B. Hillebrands, YIG magnonics. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** (2010) 264002.
- [3] A. V. Chumak, V. I. Vasyuchka, A. A. Serga and B. Hillebrands, Magnon spintronics. *Nat. Phys.*

11 (2015) 453-461.

- [4] A. Barman, G. Gubbiotti, S. Ladak, A. O. Adeyeye, M. Krawczyk, and V. I. Vasyuchka et al. The 2021 Magnonics Roadmap. *J. Phys.: Condens. Matter* **33** (2021) 413001, Topical Review.
- [5] X. F. Han, et al. Electron and Magnon Resonant Tunneling: Materials, Physics and Devices. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **56** (2023) 443001, Topical Review.
- [6] X. F. Han *et al.* From microelectronics to spintronics and magnonics. *Chinese Phys. B* **31**(2022) 1175041, Topical Review.
- [7] H. Wu and X. F. Han *et al.* Magnon valve effect between two magnetic insulators. *Phys. Rev. Lett.* **120** (2018) 097205.
- [8] C. Y. Guo, C. H. Wan and X. F. Han *et al.* Magnon valves based on YIG/NiO/YIG all-insulating magnon junctions. *Phys. Rev. B.* **98** (2018) 134426.
- [9] W. Q. He, H. Wu, and X. F. Han et al, Magnon junction effect in $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{CoO}/\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ insulating heterostructures. *Appl. Phys. Lett.* **119** (2021) 212410.
- [10] Z. R. Yan, C. H. Wan and X. F. Han, Magnon blocking effect in an antiferromagnet-spaced magnon junction. *Phys. Rev. Applied* **13** (2020) 044053.
- [11] C. Y. Guo, C. H. Wan and X. F. Han *et al.* A nonlocal spin Hall magnetoresistance in a platinum layer deposited on a magnon junction. *Nature Electronics* **3** (2020) 304.
- [12] C. Y. Guo, C. H. Wan, X. F. Han et al. Spin-orbit torque switching in perpendicular $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Pt}$ bilayer. *Appl. Phys. Lett.* **114** (2019) 192409.
- [13] C. Y. Guo, C. H. Wan and X. F. Han *et al.* Switching the perpendicular magnetization of a magnetic insulator by magnon transfer torque. *Phys. Rev. B.* **104** (2021) 094412.
- [14] P. Tang and X. F. Han, Magnon resonant tunneling effect in double-barrier insulating magnon junctions and magnon field effect transistor. *Phys. Rev. B* **99** (2019) 054401.
- [15] Z. R. Yan, Y. W. Xing and X. F. Han, Magnonic skin effect and magnon valve effect in an antiferromagnetically coupled heterojunction. *Phys. Rev. B* **104** (2021) L020413.
- [16] Y. W. Xing, Z. R. Yan, and X. F. Han. Magnon valve effect and resonant transmission in a one-dimensional magnonic crystal. *Phys. Rev. B.* **103** (2021) 054425.
- [17] Y. W. Xing, Z. R. Yan, and X. F. Han, Comparison of spin-wave transmission in parallel and antiparallel magnetic configurations, *Phys. Rev. B* **105** (2022) 064427.
- [18] Z. R. Yan, Y. W. Xing, and X. F. Han, Inverse design of magnonic filter. *J. Magn. Magn. Mater.* **563** (2022) 169976.
- [19] T. Y. Zhang and X. F. Han. Full quantum theory for magnon transport in two-sublattice magnetic insulators and magnon junctions. *Phys. Rev. B.* 2023, at print, arXiv-2304.01930v1.
- [20] Y. Z. Wang, T. Y. Zhang, C. H. Wan, and X. F. Han et al. Voltage-controlled magnon transistor via tunneling interfacial exchange coupling. 2023, arXiv 2301.05592.

单自旋波量子的相干调控

游建强

浙江大学物理学院，杭州 310027

Non-classical quantum states are the pivotal features of a quantum system that differs from its classical counterpart. However, the generation and coherent control of quantum states in a macroscopic spin system remain an outstanding challenge. Here we experimentally demonstrate the quantum control of a single magnon in a macroscopic spin system (i.e., 1 mm-diameter yttrium-iron-garnet sphere) coupled to a superconducting qubit via a microwave cavity. By tuning the qubit frequency in situ via the Autler-Townes effect, we manipulate this single magnon to generate its non-classical quantum states, including the single-magnon state and the superposition of single-magnon state and vacuum (zero magnon) state. Moreover, we confirm the deterministic generation of these non-classical states by Wigner tomography. Our experiment offers the first reported deterministic generation of the non-classical quantum states in a macroscopic spin system and paves a way to explore its promising applications in quantum engineering.

参考文献：

- [1] Y. Tabuchi, S. Ishino, A. Noguchi, T. Ishikawa, R. Yamazaki, K. Usami, and Y. Nakamura, Coherent coupling between a ferromagnetic magnon and a superconducting qubit, *Science* 349, 405 (2015).
- [2] D. Xu, X. K. Gu, H. K. Li, Y. C. Weng, Y. P. Wang, J. Li, H. Wang, S. Y. Zhu, and J. Q. You, Quantum control of a single magnon in a macroscopic spin system, *Phys. Rev. Lett.* 130, 193603 (2023).

磁子法布里-珀罗谐振器与波导中自旋波的低损耗操纵

Huajun Qin¹ and Sebastiaan van Dijken²¹ School of Physics and Technology, Wuhan University² Department of Applied Physics, Aalto University

低功耗磁子运算和基于磁子的量子耦合与调控是当前磁子学的研究重点。在微纳尺度上有效操控磁子的传播是实现磁子芯片和磁子基量子器件的基础[1]。本报告将介绍如何实验设计并制备纳米磁子法布里-珀罗谐振器和磁子波导来完成微米波长自旋波的低损耗操纵。这两种新型的磁子器件均由超低阻尼 YIG 薄膜和铁磁金属纳米结构组成。由于 YIG 薄膜和铁磁金属 (FM) 层之间存在手性磁偶极相互作用，这导致 YIG/FM 双层结构中的自旋波具有不对称的色散曲线，从而使得自旋波的传播具有很强的非互易性[2]。在磁子法布里-珀罗谐振器

中，铁磁金属纳米线两边缘构成 YIG 薄膜中自旋波反射的两个磁性界面，短波长自旋波在两平行界面间的共振传播能够将谐振器缩小到纳米量级[3]。通过改变谐振器的数量和控制磁矩方向，我们在微纳尺度上实现了自旋波传播的完全非互易性及其传播的可重构调控。在纳米磁子波导中，由于无刻蚀 YIG 薄膜而保留了纳米波导的低损耗特征，我们实现了手性自旋波在直线和转角波导中的低损耗传播[4]。基于磁子法布里-珀罗谐振器和磁子波导，我将简要讨论传播磁子模式与超导和量子比特的耦合，展望基于传播磁子模式的量子调控。

参考文献：

- [1] A.V. Chumak *et al.*, IEEE Transactions on Magnetics 58 (6), 1-72 (2022)
- [2] H.J. Qin *et al.*, Nat. Commun. 12, 2293 (2021)
- [3] A. Talapatra *et al.*, Appl. Phys. Lett. 122, 202404 (2023)
- [4] H.J. Qin *et al.*, Nano Lett. 22, 5294 (2022)

主题：光—原子体系

高克林： 传感器—原子光钟的应用思考

张卫平： Quantum interference and technology based on atom-photon interface

波导量子电动力学体系中的拓扑量子物态

李朝红

深圳大学

波导电动力学体系，作为波导与原子耦合的混合量子体系，是量子信息传输、存储与处理的基本组成单元和关键节点，成为了研究量子拓扑物态和光与原子相互作用理想平台。在波导电动力学体系，由于激发子能带分裂为两个不连续的分支，使拓扑能带理论不再适用。我们需要发展新的理论来研究拓扑量子物态及其对光子散射的影响。为了解决这一问题，我们提出了反能带的新概念：激发子能量的倒数作为晶格动量的函数。我们通过计算反能带的拓扑相位揭示了光子频率驱动的拓扑相变，发现了标度不变的局域态，平带以及由平带支持的暗瓦尼尔态。由于暗瓦尼尔态没有频率移动、具有超长寿命和超窄线宽，可以用于量子信息存储以及精密频率测量。因为该体系存在辐射衰减，所以，即使在拓扑非平庸的情况下，边界上不存在拓扑边缘态。然而，该体系存在独特的体边对应关系。在拓扑非平庸的情况下，标度不变的局域态分布在单个反能带；而在拓扑平庸的情况下，标度不变的局域态分布在两个反能带。最后，我们发现光子散射的缠绕数不仅取决于其中的亚辐射反能带的拓扑相位，还依赖原胞数的奇偶性。

2-03

主题：量子输运

Simulating Parity Magnetic Effect with Superconducting Qubits

Yu Zhang¹, Yan-Qing Zhu², Wen Zheng¹, Jianwen Xu¹, Dong Lan¹, G. Palumbo³, N. Goldman⁴, Shi-Liang Zhu⁵, Xinsheng Tan¹, Z. D. Wang², Yang Yu¹,
南京大学

A highly tunable diamond energy diagram is constructed with four coupled transmons. We parametrically modulate their tunable couplers, mapping the momentum space to parameter space and realizing 4D Dirac-like Hamiltonian with fourfold degenerate points. Then we apply an additional pump microwave field to manipulate the energy of tensor monopoles, providing an effective magnetic and pseudo-electric field. By using non-adiabatic response methods we obtain the fractional second Chern number. Our experiments pave the way to explore the higher-dimensional topological states of matter and deepen our understanding of the topological effects.

参考文献：

1. National Laboratory of Solid State Microstructures, School of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China
2. Guangdong-Hong Kong Joint Laboratory of Quantum Matter, Department of Physics, and HKU-UCAS Joint Institute for Theoretical and Computational Physics at Hong Kong, The University of Hong Kong, Pokfulam Road, Hong Kong, China
3. School of Theoretical Physics, Dublin Institute for Advanced Studies, 10 Burlington Road, Dublin 4, Ireland
4. Center for Nonlinear Phenomena and Complex Systems, Universite Libre de Bruxelles, CP 231, Campus Plaine, B-1050 Brussels, Belgium
5. Guangdong Provincial Key Laboratory of Quantum Engineering and Quantum Materials, School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China

分子束外延生长平面半导体-超导杂化马约拉纳纳米线器件

何珂

清华大学物理系 低维量子物理国家重点实验室

北京量子信息科学研究院

界面对器件，尤其是用于拓扑量子计算实现的半导体-超导杂化器件的功能和性能起着关键作用。超高真空环境下的分子束外延生长技术可以获得原子级清洁、平整、锐利、可控的界面，但往往只能用于制备薄膜或垂直方向的异质结构，而传统微纳结构和器件加工技术的低真空和溶液环境很容易影响对界面极其敏感的低维或拓扑量子材料的性能。如果能在超

高真空环境下用分子束外延技术直接生长出平面微纳结构和器件，并对其进行保护，将有可能获得很高的器件质量。此报告将介绍我们结合选区分子束外延生长技术和片上阴影墙分子束外延生长技术制备 PbTe-Pb 平面半导体-超导杂化纳米线器件方面的工作。通过这些工作，我们已可以制备出高迁移率半导体纳米线和高界面质量的半导体-超导纳米线器件，实现了达 10 微米的相位相干长度，并观测到近邻超导硬能隙。这些结果为实现高质量拓扑量子比特器件打下基础。

Pair density wave state in a monolayer high-Tc iron-based superconductor

Jian Wang

Peking University, Beijing, China

The pair density wave (PDW) is an extraordinary superconducting state where Cooper pairs carry nonzero momentum. Theoretically, the PDW order is hypothesized to play a fundamental role in high-temperature (high-Tc) cuprate superconductors, wherein experimental evidence of the PDW state has been reported. However, the evidence of PDW order is scarce in iron-based high-Tc superconductors and low dimensional superconductors. Here, using scanning tunneling microscopy/spectroscopy, we report the discovery of the PDW state in monolayer iron-based high-Tc Fe(Te,Se) films grown on SrTiO₃(001) substrates [1]. The PDW state with a period of $\lambda \sim 3.6a_{\text{Fe}}$ (a_{Fe} is the distance between neighboring Fe atoms) is observed at the domain walls by the spatial electronic modulations of the local density of states, superconducting coherence peak height and gap energy. Moreover, the π -phase shift boundaries of the PDW state are observed near the vortices of the induced secondary charge density wave state, further demonstrating that the PDW state at the domain wall is a primary state. The discovery of the primary PDW state in the monolayer Fe(Te,Se) film provides a low-dimensional platform to study the PDW state and its interplay with the topological electronic states and unconventional high-Tc superconductivity.

参考文献:

[1] Yanzhao Liu, Tianheng Wei, Guanyang He, Yi Zhang, Ziqiang Wang, and Jian Wang. Nature 618, 934-939 (2023).

基于拓扑量子材料体系的自旋电子学应用

寇煦丰，姚岐，陈鹏，刘久铭，黄浦阳，刘馨琪

信息科学与技术学院，上海科技大学，上海 201210

针对当前自旋电子学应用方面的科学问题，深入了解自旋轨道耦合（spin-orbit coupling, SOC）的内在机理，并构筑合理的材料体系来实现其效应的增强，会为实现电子自旋态的高效调控带来新的突破。在本次讲座中，我将就课题组近年来基于拓扑量子材料 $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ 的磁性异质结以及 MnBi_2Te_4 相关的超晶格体系生长制备、多场调控以及器件开发等工作进行介绍，揭示通过能带剪裁与界面磁近邻效应的引入，可以实现对自旋轨道耦合和磁交换耦合的独立多场调控与优化。在这一基础上，我们进一步利用窄禁带半导体异质结 InSb/CdTe 界面形成的内建电场和界面 Rashba 效应对载流子自旋态进行有效极化，进而通过界面磁电效应获得室温下电子自旋态的稳定传输与高效转换，最终展示基于界面自旋轨道扭矩和自旋非互易传输等特性的几类自旋电子原型器件。相关研究成果将会为实现室温工作的低功耗非易失性自旋电子器件提供了新的思路和范例，有助于推动拓扑量子体系在“超越摩尔定律”时代的发展。

参考文献：

- [1] P. Chen, Q. Yao,..., Y.M Yang, and **X.F Kou**, *Nature Electronics* 6, 18–27 (2023)
- [2] X.Q Liu, P.Y Huang,..., Q. Yao, and **X.F Kou**, *Advanced Functional Materials* 2304454 (2023)
- [3] L. Li, Y.Y Wu, ..., R.C Che, and **X.F Kou**, *Advanced Materials* 2207322 (2022)
- [4] F.H Xue, Y. Zhang, ..., Y.M Yang, and **X.F Kou**, *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM 2021)* 32.5.1-32.5.4 (2021)
- [5] P. Chen, Y. Zhang,..., S.L Zhang, and **X.F Kou**, *Nano Letters* 20, 1731-1737 (2020)
- [6] Y. Zhang, F.H Xue, ..., C. Song, and **X.F Kou**, *ACS Nano* 14, 17396-17404 (2020)

主题：量子通讯

许凯 基于超导比特的量子模拟

基于稀土离子掺杂晶体的固态量子存储器实验研究

李传锋

中国科学技术大学

量子存储器是量子信息领域的重要元件，可以用于量子通信和量子计算等过程。能实现量子存储器的物理系统有原子系综、腔内单原子和稀土离子掺杂晶体等。本报告将介绍基于稀土离子掺杂晶体的固态量子存储器的研究进展，包括提升存储保真度、信道容量、存储时间，以及用来实现多模式量子中继和可搬运量子存储器等。

参考文献：

- [1] C. Liu, T.-X. Zhu, et al., PRL 125, 260504 (2020)
- [2] T.-X. Zhu, et al., PRL 128, 180501 (2022)
- [3] D.-C. Liu, et al., PRL 129, 210501 (2022)
- [4] Yu Ma, et al., Nature Commun. 12, 2381 (2021)
- [5] You-Zhi Ma, et al., Nature Commun. 12, 4378 (2021)
- [6] Xiao Liu, et al., Nature 594, 41 (2021)

量子直接通信进展

龙桂鲁

清华大学物理系、北京量子信息科学研究院

量子计算机的发展严重威胁 RSA 等非对称密码算法，急需新的安全通信技术。量子通信基于量子原理，具有高度的安全性。量子密钥分发和量子直接通信是其两个重要模式，量子密钥分发使用量子态来协商高度安全的密钥，但本身不携带信息。龙桂鲁提出的量子直接通信使用量子态直接传输信息，兼容既有通信网络，并简化保密通信的业务流程，兼具入侵感知和防窃听传输特性。

量子直接通信采用块传输方法，将窃听检测流程从传统的“传输后”提前到“传输中”，能在信息泄露前发现入侵行为，并通过数据重传、路由切换等方式保持通信畅通，实现入侵感知和防窃听传输的双重功效。首个量子直接通信协议——基于两维纠缠的高效协议——在 2000 年提出，之后提出了基于两维纠缠的两步协议、高维纠缠的高维协议和单光子的 DL04 协议等系列协议，实现了“通信即安全”。量子直接通信的成果纳入了中央军委《2035 年前 xx 路线图》、《北京市“十四五”时期国际科技创新中心建设规划》、《北京市促进未来产业创新发展实施方案》等国家、军队和北京市顶层规划。

量子直接通信系列关键技术被逐步攻克，成功研制了国际首个原理样机，实现了光纤中 4 kbps@10km 安全通信功能演示，作为重大成果在 2020 年中关村论坛发布并引起广泛关

注；通过掩膜增容和单向传输技术，信道容量大幅提高，最新成功研制的量子直接通信实用化系统的通信速率达到了 5kbps@100km，技术指标国际领先，已具备在既设通信网络叠加部署实现文件、代码和语音信号的桌面级、网络化安全传输的功能。百公里量子直接通信被评选为 2022 年中国光学领域十大社会影响力事件，和中国通信学会十大信息通信领域重大科技进展。

中国移动成都研究院应用该系统实现关键信令的安全加密传输，实网验收测试表明满足 5G 保密专网跨域部署技术演进的需求。华夏银行使用该系统传输重要客户数据，扩大了信贷规模，取得重要的社会效益，成果被评为 2022 年金融信息化十大事件。该系统用于国防科大光通信网络系教学并取得良好效果。经某部队测试表明该系统功能和指标可满足语音指挥调度等业务传输需求。

金刚石量子器件与微纳电磁探测技术

王亚

中国科学技术大学

金刚石量子技术具有重要应用前景，比如金刚石中的氮空位色心单自旋体系已发展出成熟的扫描纳米磁成像技术。金刚石量子器件的性能进一步提升将促进其在量子技术多个方向的突破。本报告将介绍我们在金刚石量子器件人工制备上的研究进展，并由此带来的在单电荷探测和极端压力磁探测技术上突破及初步应用。

Multi-level quantum simulation and metrology

Yiheng Lin(a,b,c*), Yue Li(a,b), Xu Cheng(a,b,c), Lingna Wang(d), Xingyu Zhao(a,b,c), Waner Hou(a,b), Yi Li(a,b), Kamran Rehan(a,b), Mingdong Zhu(a,b), Lin Yan(a,b), Xi Qin(a,b,c), Xinhua Peng(a,b,c), Zehua Tian(a,b), Haidong Yuan(d,**), Jiangfeng Du(a,b,c,e,***)

(a)CAS Key Laboratory of Microscale Magnetic Resonance and School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

(b)CAS Center for Excellence in Quantum Information and Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

(c)Hefei National Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230088, China

(d)Department of Mechanical and Automation Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Shatin, Hong Kong;

(e)Institute of Quantum Sensing and School of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

*yiheng@ustc.edu.cn

****hdyuan@mae.cuhk.edu.hk**

*****djf@ustc.edu.cn**

Recent years have seen rapid progress in controlling multi-level quantum system (qudits) and demonstration of novel applications. Trapped ion system, with a combination of electron spin, nuclear spin, metastable electronic orbit, ionic vibration and even with rotations with molecular ions, is one of the ideal platforms to study multi-level quantum system. We experimentally demonstrate various techniques of quantum control, simulation and metrology with trapped ions, ranging from logic gates, simulation of Unruh effect, to enhancing detection precision with motional squeezing. We hope these experiments would help in further exploration of quantum applications with multi-level systems.

2-04

主题：磁存储

基于新材料和机理的 SOT-MRAM 研究

聂天晓

北京航空航天大学集成电路科学与工程学院

随着计算机技术的不断发展，数据存储的需求不断增加，各种类型的存储器技术应运而生。在众多非易失存储器方案中，MRAM 具备高速、低功耗和抗辐照等优势，是解决“后摩尔时代”集成电路功耗瓶颈的可能技术方案。当前，MRAM 已发展至第三代——SOT-MRAM，它可以实现亚纳秒数据写入，功耗低至 0.1 pJ/bit，且器件寿命高于 1×10^{13} ，有望替代 SRAM，是当前学术界和工业界关注的重点。然而，目前 SOT-MRAM 在小尺寸下存在数据保存困难和外磁场干扰等问题，限制了其性能的进一步提升。反铁磁材料具有零杂散场、高稳定性和太赫兹进动频率等特点，可以提供更高的存储密度、更高速的数据写入和更好的数据稳定性，被认为是下一代存储器技术的潜在候选者，因此我们首先深入研究了反铁磁材料 IrMn 的电学写入和读取，我们实现了 800 皮秒的数据写入速度，并利用磁隧道结完成了对反铁磁的数据读出，成功将器件尺寸缩小至 41 纳米，并有望进一步将缩小至 10 纳米以下¹。除此之外，我们还把目光聚焦到了二维材料上，其中二维磁性材料兼具二维材料高集成度和自旋电子材

料低功耗的优点，因此构筑新型的二维 SOT-MRAM 器件，有望突破“尺寸微缩”和“功耗墙”两大瓶颈，实现更高性能的新型存储器件。我们利用分子束外延设备成功生长了 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ 异质结构，并利用拓扑绝缘体的邻近效应将 Fe_3GeTe_2 的居里温度提高到了室温以上，并基于此成功实现了首个全二维异质结构的室温自旋轨道矩诱导磁化翻转²。我们的研究揭示了反铁磁材料及二维铁磁材料在自旋电子学领域的巨大潜力，为进一步构建高存储密度、低功耗和高稳定性的新型存储芯片打下了坚实的基础。

参考文献：

- 1 Du, A. *et al.* Electrical manipulation and detection of antiferromagnetism in magnetic tunnel junctions. *Nature Electronics* **6**, 425-433, doi:10.1038/s41928-023-00975-3 (2023).
- 2 Wang, H. *et al.* Room temperature energy-efficient spin-orbit torque switching in two-dimensional van der Waals Fe_3GeTe_2 induced by topological insulators. *Nature Communications* **14**, 5173, doi:10.1038/s41467-023-40714-y (2023).

产业视角下的磁存储技术发展现状和机遇

叶力

华为海思半导体有限公司

磁性是材料自旋量子特性的显著宏观结果，磁性材料展现的现象丰富、物理机制复杂，是学术研究的热门领域。二十多年来从学术研究中孵化的磁隧道结器件也落地产业，服务于存储、传感等领域。本报告将尝试从计算、存储这两个规模 ICT 行业视角介绍磁存储技术的应用机会、国内外发展现状、以及在“卡脖子”约束下的特殊机遇

大规模高密度自旋轨道矩磁存储器研究与集成

蔡凯明^{1, 2}

1. 华中科技大学物理学院；2 华中科技大学集成电路学院.

在自旋电子学领域，基于自旋的磁性随机存储器（MRAM）具备高速、低功耗和非易失性等优势，有望成为突破集成电路“后摩尔时代”瓶颈的解决方案之一。目前，基于自旋转移矩（spin-transfer torque, STT）的第二代磁性存储器 STT-MRAM 已经实现全面量产，并开始嵌入系统中投入使用，以提升数据存储和计算速度。同时，新一代自旋轨道矩（spin-orbit torque）的磁性存储器以更低功耗、更快速度和更长使用寿命，有望替代传统 SRAM，成为下一代磁性存储器的解决方案，也是当前学术界和工业界共同追逐的焦点。自从 SOT 效应的早期研究[1, 2]到 SOT-MRAM 器件的初步集成[3]。在过去十余年，研究人员提出了多种

自旋轨道矩的器件设计方案，分别优化器件效率和材料结构等，并展示了优越的操作速度、使用寿命等。然而，截至目前尚未获得有效的解决方案，以全面满足工业生产的各项性能指标。在工业产品设计中，还需要考虑 CMOS 兼容性、性能可靠性、生产成本等诸多限制因素。此次报告，根据 SOT-MRAM 工业研究中几个亟需解决的困难，关联学术研究，重点介绍从改进自由层 BEOL 兼容性[4]，降低写入电流和提升集成密度的器件设计[5]以及无外加磁场翻转的解决方案[6, 7, 8]等相关阶段性结果。

参考文献：

- [1] L. Liu. *et al.* *Science* 336, 555–558 (2012)
- [2] I. M. Miron *et al.* *Nature* 476, 189–193 (2011).
- [3] K. Garello *et al.*, *IEEE Symp. On VLSI Circuit*, 81–82 (2018)
- [4] S. Couet *et al.*, *IEEE Symposia on VLSI Technology and Circuits*, T11 (2021)
- [5] K. Cai *et al.*, *IEEE Symp. On VLSI Technology*, 375–376 (2022).
- [6] K. Cai *et al.*, *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, 36.2.1–36.2.4 (2022)
- [7] K. Garello *et al.*, *IEEE Symp. On VLSI Technology*, 194–195 (2019).
- [8] V. Kateel *et al.*, *Nano Letters* 23, 12, 5482–5489 (2023)

True Random Number Generator Based on Spin-Orbit Torque Magnetic Tunnel Junctions

X. H. Li¹, M.K. Zhao¹, C.H. Wan^{*,1} and X. F. Han^{*,1}

¹Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100190, China

Email: wancaihua@iphy.ac.cn; xfhan@iphy.ac.cn

True random number generators (TRNGs) play a pivotal role in solving NP-hard problems, neural network computing, and hardware accelerators for algorithms such as the simulated annealing. In this work, we focus on TRNG based on high-barrier magnetic tunnel junctions (HB-MTJs) with identical stack structure and cell geometry, but employing different spin-orbit torque (SOT) switching schemes. We conducted a comparative study of their switching probability as a function of pulse amplitude and width of the applied voltage. Through experimental and theoretical investigations, we have observed that the Y-type SOT-MTJs exhibit the gentlest dependence of the switching probability on the external voltage. This characteristic indicates superior tunability in randomness and enhanced robustness against external disturbances when Y-type SOT-MTJs are employed as TRNGs. Furthermore, the random numbers generated by these Y-type SOT-MTJs, following XOR pretreatment, have passed the National Institute of Standards and Technology (NIST) SP800-22 test. This comprehensive study demonstrates the high performance and immense potential of Y-type SOT-MTJs for the TRNG implementations.

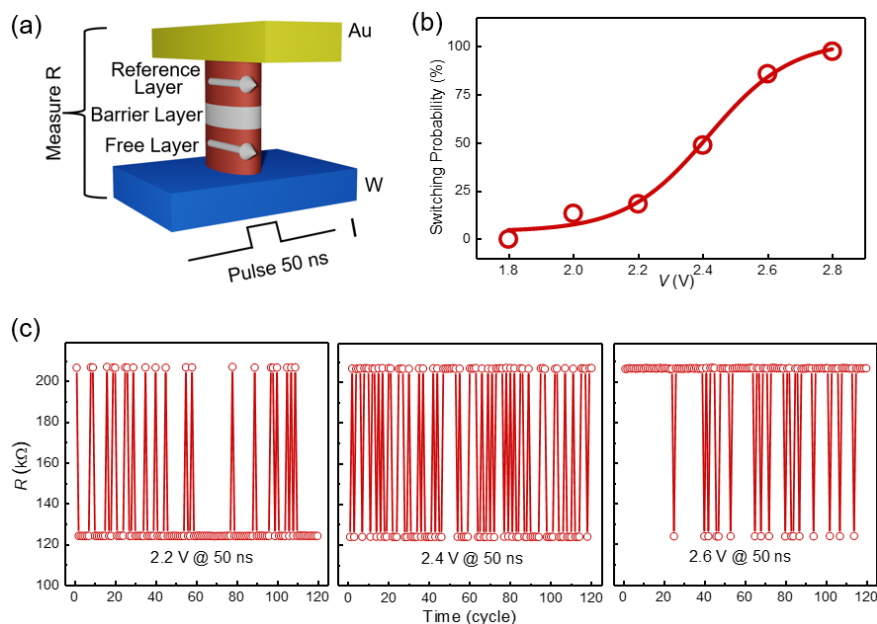


Fig.1 (a) The stack structure of SOT-MTJs. (b) Switching probability as a function of V_{in} with a sigmoid curve. (c) Resistance of the Y-type SOT-MTJ at $V_{in} = 2.2$ V, 2.4 V and 2.6 V after 120 writing pulses.

主题：磁结构与自旋轨道力矩

磁斯格明子材料与器件

杜海峰

中国科学院强磁场科学中心

磁性斯格明子 (Magnetic Skyrmion) 是一种纳米级磁性结构，具备手性自旋的特性。它因其高度拓扑稳定、低驱动电流密度、以及对磁场、电场、温度等多种物理场的可调性而备受研究者青睐。利用磁斯格明子独特的性质，科学家们正在积极探索各种低功耗磁电子学器件的开发，包括磁斯格明子晶体波导、磁斯格明子逻辑门和磁斯格明子存储器。这些器件有望在未来的量子计算和信息存储领域发挥重要作用。然而，尽管磁斯格明子材料和器件在理论上具有巨大的潜力，但面临一系列挑战，包括高质量器件结构单元的制备、磁斯格明子的精确控制和操纵等方面。本报告将重点介绍针对这些挑战的解决方案以及磁斯格明子材料和器件的最新研究进展。

参考文献：

1. H. Du, et al. *Physical Review Letters* 120, 197203 (2018)
2. F. Zheng, et al. *Nature Nanotechnology* 13, 451 (2018)
3. J. Tang et al., *National Science Review* 8, nwaa200 (2021)
4. W. Wei et al., *Advanced materials* 33, 2101610 (2021)
5. J. Tang et al., *Nature Nanotechnology* (2021)

6. W. Wang, *et al.*, *Nature Communications* 13, 1593 (2022)
7. J. Tang *et al.*, *Advanced Materials* DOI: 10.1002/adma.202306117 (2023)

杂化半导体中的自旋量子态调控

翟亚新

湖南师范大学物理与电子科学学院

自旋光电子器件将自旋量子信息通过光子的圆偏振态来表达, 信息处理能力较传统电子设备大大增强, 是光量子通信电路的重要组成部分。基于传统半导体的自旋光电子器件造价较高, 近年来有机-无机杂化半导体因高光电转化效率、低成本、易制备等优势成为最具商业应用前景的新一代半导体, 同时也为自旋光电子学开辟了新的方向。然而, 杂化半导体自旋光电器件的研究才刚刚起步, 纯自旋量子态的产生效率还很低, 缺乏系统调控自旋和提升器件性能的有效方法。我们发展了使用超快光谱学研究自旋相关能级结构和自旋动力学的新技术, 提出了利用手性诱导的自旋选择效应(CISS)操控电子自旋的新方法, 实现了在室温零磁场下的高效自旋极化注入和圆偏振光子发射[1], 揭示了钙钛矿表面光致载流子的迁移和复合过程[2, 3], 证实了存在反演非对称和强自旋轨道耦合半导体量子体系中的自旋能级劈裂[4], 为高性能自旋光电子器件的设计提供理论指导和技术支撑。

参考文献:

1. Y. Kim#, Y. Zhai#, H. Lu#, X. Pan, E. A. Gaulding, S. P. Harvey, L. M. Wheeler, J. J. Berry, Z. Vally Vardeny, M. C. Beard, J. M. Luther, Chiral Induced Spin Selectivity Enabling a Room Temperature Spin-LED, *Science*, 371, 1129 (2021).
2. Y. Zhai, K. Wang, F. Zhang, C. Xiao, A. Rose, K. Zhu and M. C. Beard, "Individual Electron and Hole Mobilities in Lead Halide Perovskites Revealed by Noncontact Methods", *ACS Energy Lett.* 5, 47-55 (2020).
3. J. Xue, R. Wang, X. Chen, C. Yao, X. Jin, K.-L. Wang, W. Huang, T. Huang, Y. Zhao, Y. Zhai, D. Meng, S. Tan, R. Liu, Z.-K. Wang, C. Zhu, K. Zhu, M. C. Beard, Y. Yan and Y. Yang, "Reconfiguration of the Band-edge States of Photovoltaic Perovskites by Conjugated Organic Cations", *Science*, 371, 636-640 (2021).
4. Y. Zhai, S. Baniya, C. Zhang, J. Li, P. M. Haney, C.-X. Sheng, E. Ehrenfreund, Z. V. Vardeny, "Giant Rashba-splitting in 2D organic-inorganic halide perovskites measured by transient spectroscopies", *Sci. Adv.* 3, e1700704 (2017).

稀土石榴石铁氧体异质结的极化中子反射和电流驱动的磁化翻转

朱涛 1*, 白鹤 2

1 中国科学院物理研究所, 北京 100190

2 散裂中子源科学中心, 中国科学院高能物理研究所, 东莞 523803

稀土石榴石铁氧体凭借极低衰减因子、较长磁振子传输距离、绝缘体本质等优势，在自旋电子学器件研究中被普遍应用。通过调控衬底和应力之间的磁弹各向异性，克服形状各向异性，得到的稀土石榴石铁氧体薄膜可以具有垂直磁各向异性。稀土石榴石铁氧体异质结中自旋轨道矩(SOT)诱导磁矩翻转效率与稀土石榴石铁氧体薄膜质量有直接关系，因此高质量的具有垂直磁各向异性的稀土石榴石铁氧体薄膜亟待深入探究。在这个报告中，我们将介绍采用极化中子反射对一系列稀土石榴石铁氧体薄膜的结构和磁性的研究 [1-3]。利用磁控溅射技术在 YSGG 衬底上生长了高质量、具有垂直磁各向异性的外延 $\text{Ho}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (HoIG) 薄膜。极化中子反射结果表明 YSGG/HoIG 界面扩散层仅有 1.2 nm，意味着磁性死层仅有 0.6 nm [3]，远低于文献中的一些报道。极化中子反射结果还表明 HoIG 饱和磁化强度为 68 emu/cm^3 ，非常接近块体值 (70 emu/cm^3)。HoIG/Pt 异质结中，可以实现 SOT 诱导的磁矩翻转，临界翻转电流密度为 $1.4 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$ ，最小辅助场为 10 Oe [3]。进一步，我们研究了垂直磁化的 YIG/PtN_x 异质结临界翻转电流密度随 N 含量的变化关系，发现 PtN_x 可以进一步降低临界翻转电流密度 [4]，临界翻转电流密度最大可以降低 40%。

参考文献:

- [1] H. Bai et al., *Appl. Phys. Lett.* 115, 182401 (2019).
- [2] H. Bai et al., *Phys. Rev. Appl.* 13, 064043 (2020).
- [3] H. Bai et al., *Appl. Phys. Lett.* 119, 212406 (2021).
- [4] H. Bai et al., (submitted).

电场驱动下的离子运动对自旋轨道矩的调控

崔彬¹、安泰宇¹、褚瑞月¹、胡季帆¹

¹ 山东大学，济南 250100

Email: bincui@sdu.edu.cn

目前限制自旋轨道矩 (SOT) 器件应用的瓶颈在于自旋流或 SOT 的产生效率仍然较低且难以调控，器件的能耗仍然偏高。近年来，在对更高性能的追求下，出现了许多关于 SOT 调制的实验工作，例如，通过退火、引入不同插层、界面氧化和应变调控来调制 SOT。利用电场手段调控 SOT 具有动态调控、可逆性好和能耗低的优势，对于开发高性能自旋电子学存储器和逻辑器件至关重要。

研究团队使用 H_2O 掺杂的离子液体门电压，在 Pt/Co/Pt/TaN 异质结中，实现了对重金属 Pt 自旋霍尔效应的可逆和非易失性操控，获得了自旋霍尔角近 50% 的大范围调控。结合实验和理论研究发现，自旋霍尔角的变化与正负电压下氢离子在金属 Pt 表面上的吸附与脱附密切相关，表面吸附了氢离子的 Pt 具有显著增强的自旋霍尔电导率^[1]。研究还发现，Pt 自旋霍尔角的提高有利于能够大大降低驱动畴壁运动的临界电流密度，对于降低赛道存

储器件的能耗具有实际意义。此外，通过改变表面 TaN 保护层的厚度，能够选择性地操控电场下氧离子和氢离子的进入，不但降低了驱动磁化翻转的临界电流密度，更通过引入反铁磁 CoO_x 实现了无辅助磁场的 SOT 驱动磁化翻转^[2]。

基于轨道霍尔效应和界面 Rashba 效应，轻金属氧化物/磁性金属异质结中可以获得轨道电流。轨道电流携带极化的轨道角动量，可以注入到铁磁层中，对铁磁层磁化产生力矩，起到与自旋电流类似的操控磁性效果。然而，在轻金属氧化物中实现轨道电流和 SOT 的高效动态调控仍然具有挑战性。研究发现，在 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{CuO}_x/\text{TaN}$ 异质结构中，轨道电流相关的磁电阻与 CuO_x 层的氧化水平密切相关；通过离子液体门电压驱动 CuO_x 层内部氧离子的迁移，能够实现 CuO_x 内部氧离子分布的重构以及界面氧化状态的改变，进而达成了对轨道电流相关的磁电阻和 SOT 产生效率的可逆调控^[3]。利用 TaN 层厚度的变化，可以切换氧离子内部重构和外部交换两种调控模式。这些结果不但为 SOT 的动态控制提供了一种方法，还有望推动离子型自旋电子器件的发展。

关键词：自旋轨道矩，电场调控，轨道流

参考文献：

- [1] Ruiyue Chu, Liang Liu, Bin Cui*, Weikang Liu, Taiyu An, Xue Ren, Tingting Miao, Bin Cheng, Jifan Hu* E Electrical Control of Spin Hall Effect in Pt by Hydrogen Ion Adsorption and Desorption. *ACS Nano* **16**, 16077 (2022).
- [2] Ruiyue Chu, Bin Cui*, Liang Liu, Weikang Liu, Tingting Miao, Xue Ren, Bin Cheng, Xiangxiang Zhao, Xinyi Wu, Shuyun Wu, Jifan Hu* Electrical Control of Spin Hall Efficiency and Field-Free Magnetization Switching in W/Pt/Co/Pt Heterostructures with Competing Spin Currents. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2023, 15, 29525 (2023)
- [3] Taiyu An, Bin Cui*, Mingfang Zhang, Fufu Liu, Shaobo Cheng, Kuikui Zhang, Xue Ren, Liang Liu, Bin Cheng, Changjun Jiang, Jifan Hu* Electrical manipulation of orbital current via oxygen migration in $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{CuO}_x/\text{TaN}$ heterostructure. *Advanced Materials* **35**, 2300858 (2023).

垂直磁化的 Co/Pd 多层膜中的反常逆自旋霍尔效应

杨满¹，缪冰锋^{1,*}，程军¹，何康¹，杨希¹，曾钰伦¹，王自强¹，孙亮¹，王向荣^{2,3,*}，Antonio Azevedo⁴，

Subhankar Bedanta⁵，丁海峰^{1,*}

¹固体微结构物理国家重点实验室，物理学院，南京大学，人工微结构科学与技术协同创新中心，江苏南京

²物理系，香港科技大学，香港

³香港科技大学深圳研究院，深圳

⁴物理系，伯南布哥联邦大学，巴西伯南布哥累西腓

⁵纳米磁性和磁性材料实验室(LNMM)，物理科学学院，国家科学教育和研究所 (NISER)，Homi Bhabha 国家研究所 (HBNI)，印度

自旋霍尔效应(SHE)和逆自旋霍尔效应(ISHE)在电荷流与自旋流的相互转换中起着至关重要的作用。对于 SHE 和 ISHE 来说, 电荷流、自旋流与电子自旋极化三个矢量之间需满足相互垂直的关系[1]。利用自旋流与电荷流转换的普遍张量要求分析可以得出, 在引入磁化强度 M 这一新的序参量之后, 电荷流、自旋流和电子自旋极化三个矢量之间的关系会出现新的可能性[2]。本文中, 我们利用了自旋泵浦 (spin pumping) 的方法测量了垂直磁化的 Ti (3 nm)/Co (0.6 nm)/Pd (2 nm)/[Co (0.4 nm)/Pd (2 nm)]₄ 多层膜 (简称为 Co/Pd 多层膜) 中自旋流到电荷流的转换。我们观察到了 Co/Pd 多层膜中电荷流与电子自旋极化共线现象的反常逆自旋霍尔效应 (AISHE)。其中, AISHE 的符号和大小都可以被 Co/Pd 多层膜的垂直磁化强度线性地调节。此外, 在自旋泵浦测量中观察到的 AISHE/ISHE 比值与施加的微波频率无关, 表明了反常逆自旋霍尔角是材料本征的参数[3]。

参考文献:

- [1] J. E. Hirsch, Phys. Rev. Lett. **83**, 1834 (1999).
- [2] X. R. Wang, Commun. Phys. **4**, 55 (2021).
- [3] M. Yang, Phys. Rev. B. **105**, 224426 (2022)