腔内自旋与微波相互作用的电检测

柏利慧*, 田玉峰, 康仕寿, 陈延学, 刘国磊, 梅良模, 颜世申

山东大学物理学院, 济南 250100

* 联系人, E-mail: lhbai@sdu.edu.cn

2021-02-08 收稿, 2021-04-29 修回, 2021-04-30 接受, 2021-05-07 网络版发表

国家自然科学基金(11774200)、高等学校学科创新引智计划(B13029)、山东省自然科学基金(ZR2019JQ02)和山东大学青年交叉创新群体项目资助

摘要 聚焦界面自旋动力学和自旋传输特性, 自旋电子学发展针对自旋产生、探测、调控的技术方法, 为自旋电子器件的开发提供了物理基础, 是自旋电子学研究的根本任务. 借鉴腔量子电动力学的思想和方法, 在微波谐振腔内实现室温下的磁子-微波强耦合, 为实现信息和能量在自旋与电磁波之间的相干传输提供了可能, 同时为调控自旋提供了新方法. 本文简要介绍了磁子-微波耦合的概念和机制, 梳理了这一方向的发展脉络, 重点介绍了磁子-微波强耦合中电检测技术及其产生的自旋流的特性.

关键词 自旋动力学, 磁子-微波强耦合, 磁子极化激元, 自旋流

磁子是磁性材料中的一种集体元激发, 它与电磁波发生耦合, 可以形成新的混合模式, 兼具磁子和电磁波的性质, 称为磁子极化激元. 磁子极化激元与声子极化激元具有相似的物理本质^[1], 都是固体中的元激发与光子形成的混合体系. 磁子的特征能量(频率)普遍低于声子, 且磁子极化激元中参与磁子耦合的是电磁波的磁矢量, 而非电矢量, 这两点使得磁子极化激元不同于声子极化激元而具有着独特的性质. 在微波谐振腔中, 磁子极化激元与微波腔模发生耦合^[2~7], 呈现出室温下的磁子-微波强耦合特征, 包括色散反交叉、强度交换、阻尼交叉等. 自旋电子学发展起来的自旋操控和探测方法^[8,9], 可以用来探测和调控磁子-微波强耦合体系, 实现腔电动力学与自旋电子学交叉融合, 成为一个的新方向——腔自旋电子学.

1 磁子-微波强耦合

磁子-微波耦合体系包含两个子系统, 一个是磁子, 另一个是微波谐振腔. 其中, 磁子是磁性材料中的元激

发, 在交换相互作用、偶极相互作用的影响下, 波矢的变化使磁子具有不同的能量, 且波矢与能量表现出特定的色散关系. 与微波耦合的磁子是长波磁子模式, 在该模式下, 材料中磁矩同相位进动, 也被称为铁磁共振模式(ferromagnetic resonance, FMR). 磁矩的进动可由 Landau-Lifshitz-Gilbert(LLG)方程描述, 在小进动线性近似下, 可以得到磁性样品中磁矩对微波磁场的动力学响应, 即动态磁导率张量. 磁矩偏离平衡位置并绕着有效场的方向进动, 本征频率 ω_r 是有效场的函数. 当发生共振时, 即驱动磁子的微波的频率 ω 等于磁子的本征频率 ω_r , 磁矩进动分量达到极大值. 平衡状态下, 净磁矩的大小和方向由外磁场、各向异性场、交换等效场等共同作用下的有效场决定, 因此, 可以通过改变外磁场来调节磁矩进动的频率 ω_r . 进动过程中, 偏离平衡状态的磁矩分量可以驱动自旋角动量从磁性层向邻近非磁层扩散, 形成纯自旋流. 在邻近非磁层中形成的自旋流, 通过逆自旋霍尔效应转化为电荷流, 进而实现电检测, 这是自旋泵浦效应研究的主要内容^[2,10,11]. 电检测

引用格式: 柏利慧, 田玉峰, 康仕寿, 等. 腔内自旋与微波相互作用的电检测. 科学通报, 2021, 66: 2033–2041

Bai L H, Tian Y F, Kang S S, et al. Electrical detection of spin-microwave coupling in a cavity (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 2033–2041, doi: 10.1360/TB-2021-0166

磁子驱动的自旋流成为探测磁子-微波强耦合的一个重要的方法.

磁子-微波强耦合是指磁性材料中的磁振子与谐振腔的腔模发生相干能量交换,使得磁子-微波的混合本征模式相互排斥.利用外磁场调节磁子的共振频率 ω_r ,可以得到反交叉的频率-磁场色散关系.如图1所示,反交叉的混合本征模式色散分开的频率间隔 g ,可以直接用来描述耦合强度.当耦合强度大于磁子的本征耗散速率,同时大于谐振腔腔模的耗散速率时,体系发生了强耦合.当对磁子-微波耦合系统进行例如谐振腔尺寸、填充度等方面的调整时,体系能够发生频率间隔更大的超强耦合^[12,13].磁子-微波强耦合体系可以简单类比成一对耦合的单摆谐振子,可以直观地重现磁子-微波强耦合体系的所有经典物理特征^[14].基于LLG方程和麦克斯韦方程的电磁耦合模型,更准确地描述了磁子-微波强耦合的物理过程.针对强耦合中量子特征的研究也在不断进展之中^[15-19].此外,已有理论和实验工作证实,在磁子-微波强耦合体系中,通过调控耦合强度和耗散可以实现新的非厄密物理效应^[20-22].这一方面的研究也有长足的发展^[7,23-25].游建强课题组^[26]系统地阐述了这一耦合体系非厄米特性方面的研究进展.本文将重点论述磁子-微波强耦合体系及其基于自旋流的电学检测方法.

图1 (网络版彩色)谐振腔中磁子-微波耦合示意图.如虚线所示,外磁场调节磁子共振频率 ω_r 与谐振腔的腔模频率 ω_c 交叉时,强耦合的本征模式呈现出实线所示的反交叉行为.其中频率差 g 是耦合强度,描述了磁子和微波腔模间的能量交换效率

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of magnon-microwave coupling in resonator. As shown in the dotted line, when the resonance frequency (ω_r) of the magnon is crossed with the cavity mode frequency (ω_c) of the cavity, the strongly coupled eigenmodes show the anti-cross behavior of solid line. The frequency difference (g) denotes the coupling strength, which describes the energy exchange efficiency between the magnon and the cavity mode

2 磁子-微波强耦合的意义与发展

光与物质的相互作用是凝聚态物理中一个基础且有趣的课题,它阐述了耦合特性的物理机制,同时也为新概念器件的设计提供了新思路.磁子-微波强耦合将微波和光学领域与自旋电子学和磁性领域结合在一起,是量子信息和自旋电子技术的集成,这个新兴的交叉方向引起了人们的广泛兴趣.

2010年, Soykal和Flatté^[27]在理论上讨论了在铁磁体系中实现混合磁子-微波强耦合的可能性.他们预测,磁性材料中磁子的一致进动模式作为一个宏观“自旋”参与耦合,能够有效地提高耦合强度到MHz量级.人们在实验上观察到磁子-微波的耦合是在2013年.在50 mK的极低温下, Huebl等人^[28]将铁磁绝缘体钇铁石榴石(yttrium iron garnet, YIG)样品放置在超导平面谐振腔上,测量了谐振腔的微波透射信号,耦合模式的反交叉特征证明了磁子和微波腔模发生了强耦合.随后的2014年, Nakamura课题组^[29]在低温下利用三维谐振腔,进一步证实了耦合强度与参与耦合的自旋数目的平方根成正比关系.稍后, Zhang等人^[30]利用YIG小球和高品质因子三维谐振腔,在室温下观察到磁子-微波的耦合.显而易见,室温下的强耦合得益于磁性材料YIG具有高于室温的居里温度. YIG具有超低阻尼和高自旋密度,并且它的高绝缘特性降低了电磁损耗,因此成为腔磁子极化实验的典型磁性材料.目前,人们还在钇铁石榴石^[31]、锂铁氧体^[32]、手性铁磁绝缘体^[33]和坡莫合金^[34,35]中观察到了强耦合.

磁子-微波强耦合的理论和实验研究^[27-30]受到了混合量子信息系统^[36-38]的启发,而磁子-微波强耦合的电探测进一步将这一强耦合推进了自旋电子学领域^[2],形成了一个自旋电子学与腔量子电动力学交叉融合的新方向——腔自旋电子学.自2013年以来,各种各样的腔自旋电子学测量技术的发展为磁子-微波强耦合系统的探索带来丰富的成果,例如,超强耦合区域的探索、自旋波强耦合的观测^[39,40]、多模式腔^[33]和自旋^[41]体系的实现、磁子-微波强耦合系统本征谱的奇异点的发现^[23,42]、完美的相干吸收的实现^[23]以及腔自旋波混合系统的克尔非线性^[24,43]和赝厄密性的研究^[7,25].借助磁光科尔效应,磁子-微波强耦合体系能够实现信息在微波频段与可见光频段的交换,引起了广泛的关注^[7,24,25,44].针对磁子-微波强耦合体系的电压调控^[45]、电磁诱导透明^[46,47]、磁子暗模式梯度存储等特性和调

控方法研究^[19,48-50], 为基于磁子-微波强耦合的器件设计提供了思路。

3 磁子-微波强耦合机制

对磁子-微波强耦合的物理描述主要有Jaynes-Cumming模型^[19,50,51]和电磁耦合模型。Janis-Cumming模型是量子力学模型, 它描述二能级系统与电磁波腔模的相互作用, 最早解释了原子能级与光的相互作用, 也被广泛用于分析磁子-微波强耦合^[28,30,31]。本文着重介绍基于等效电路(描述微波谐振腔)与LLG方程(描述磁子进动)的经典电磁耦合模型^[2,5], 因为这一模型直观地连接了腔量子电动力学和自旋电子学, 在理解腔自旋电子学的物理机制方面(如自旋流的产生和调控)扮演着重要的角色。

对于磁子, 铁磁材料中磁化强度的进动可以由LLG方程描述:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_e - \frac{\alpha}{M_0} \mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt}, \quad (1)$$

其中, γ 是旋磁比; α 是Gilbert阻尼系数; 磁化强度 $\mathbf{M} = \mathbf{M}_0 + \mathbf{m}$, $\mathbf{m}$ 代表动态磁化强度; $\mathbf{H}_e$ 是有效磁场, 包括外加磁场、退磁场和微波磁场等的矢量和。外加磁场 $\mathbf{H} = H\hat{z}$ 施加在样品面内并沿易磁化轴 $\hat{z}$ 方向, 则方程(1)在旋转坐标系下可以简化为

$$(\omega - \omega_r + i\alpha\omega)m^+ + \omega_m h^+ = 0. \quad (2)$$

方程(2)描述了由右旋圆偏振的微波磁场 $h^+(t) = h_x + ih_y(\omega_0/\omega_r) = h e^{-i\omega t}$ 驱动右旋圆偏振进动的磁子强度 $m^+(t) = m_x(\omega_0/\omega_r) + im_y = m e^{-i\omega t}$ 。其中, $\omega_m = \gamma M_0$ 与饱和磁化强度成正比。在YIG薄膜样品中, 磁子共振频率 ω_r 与有效场成正比。在实验中, ω_r 主要依赖于施加的外磁场。

为了简单地描述谐振腔的谐振特性, 将微波谐振腔等效为RLC电路, 其中 R , L , C 分别是谐振腔等效电路中的集总参数电阻、电感和电容, 微波电流 $j(t)$ 由射频电压 V_{app} 产生。由基尔霍夫定律可知

$$V_{app} = Rj(t) + L \frac{dj(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int j(t) dt. \quad (3)$$

通过方程(3)可得到谐振腔中微波电流振荡的简谐振子表达式, 得到谐振频率 $\omega_c = (1/LC)^{1/2}$ 和腔模阻尼 $\beta = R/(2L\omega_c)$ 。

当磁子与谐振腔耦合在一起, 磁子可以被谐振腔

中的微波磁场驱动, 同时磁子的进动在谐振腔中诱导出感生电压, 驱动谐振腔等效电路, 使谐振腔中的微波磁场发生变化。为了描述这一过程, 引入两个耦合参数 K_m 和 K_c , 分别表征谐振腔中的微波电流产生微波磁场(安培定律)和磁子进动产生感生电动势(法拉第定律)。其中, K_m 为微波电流产生微波磁场的参数:

$$\begin{aligned} h_x &= K_m j_y, \\ h_y &= -K_m j_x, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, j_y 和 j_x 相互独立。 K_c 为磁子进动引起交变磁通进而诱导出交变电动势的参数。磁化强度的进动在谐振器中产生的磁感应电压为

$$\begin{aligned} V_{ind,x} &= K_c L \frac{dm_y}{dt}, \\ V_{ind,y} &= -K_c L \frac{dm_x}{dt}. \end{aligned} \quad (5)$$

将磁子进动产生的感应电压代入RLC谐振方程(3)中, 得到与磁子耦合的谐振腔的谐振方程:

$$(\omega^2 - \omega_c^2 + 2i\beta\omega\omega_c)h^+ + K^2\omega^2 m^+ = 0, \quad (6)$$

其中, $K = (K_m K_c)^{1/2}$ 是一个无量纲量, 描述了磁子和微波腔模之间的耦合强度, 与前文中耦合强度 g 是正比关系。根据安培定律, 采用微波磁场 h 代替RLC等效电路中的微波电流 j , 来表达谐振腔中简谐振动的强度量, 因为微波磁场 h 与磁子进动强度 m 具有相同的量纲, 使得耦合方程的形式更简单。磁子-微波的耦合方程可以通过联立方程(2)和(6)得到:

$$\begin{pmatrix} \omega^2 - \omega_c^2 + 2i\beta\omega\omega_c & K^2\omega^2 \\ \omega_m & \omega - \omega_r + i\alpha\omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h^+ \\ m^+ \end{pmatrix} = 0. \quad (7)$$

这一耦合方程中包含了腔模频率 ω_c 、腔模阻尼 β 、铁磁共振频率 $\omega_r(H)$ 、铁磁共振阻尼 α 和耦合系数 K , 这些参数共同决定了系统的耦合特性。令方程(7)中矩阵的行列式为零, 就可以得到耦合体系的色散关系。如果在方程(7)的右端添加非零的驱动力, 就可以得到磁子-微波强耦合体系中磁子和微波的强度解。

当 $K > \alpha, \beta$, 即耦合体系中两个子体系之间的能量交换效率分别大于各个子体系的能量损耗效率时, 这一耦合体系被定义为强耦合^[30]。强耦合下, 磁子-微波强耦合体系可以在更长的时间内保持相位相干特性, 为信息交换和调控提供了更加充足的时间。要实现强耦合, 采用低磁子阻尼的磁性材料、降低谐振腔的阻尼都是必要的考虑, 而调控和提高耦合系数 K 是另一个重

要的研究方向. 已经有大量的实验工作^[5,15,30,52,53]尝试了调控耦合强度, 例如, 通过改变磁性样品的尺寸^[9], 通过改变磁性样品在谐振腔中的位置^[30], 都演示了对耦合强度的调控. 经典电磁耦合模型告诉我们, 利用外磁场改变磁矩方向相对于微波磁场的夹角, 就可以调节微波驱动磁子的力矩大小, 进而改变耦合效率. 我们在实验上验证了利用外磁场实现对耦合系数的远程调控^[5].

4 电检测强耦合

图2总结了几种实验探测磁子-微波强耦合的实验方法, 包括微波传输法^[28]、自旋泵浦电检测方法^[2]、布里渊光散射测量方法^[54]、法拉第效应测量方法^[42]. 其中, 最常用的测量方式是利用矢量网络分析仪(vector network analyzer, VNA)测量耦合系统的透射和反射系数, 可以直接对微波谐振腔的性质进行标定, 例如腔模频率、腔的固有阻尼、品质因子等. Klingler等人^[54]利用布里渊光散射法研究了YIG薄膜与微波谐振环之间的耦合, 测量到了磁子-微波的耦合, 同时观察到了磁子进动的本征模式. Hisatomi等人^[42]基于磁光法拉第效应观察到了磁子与光子的耦合, 并实现了光学光子与微波光子间的相互转换.

磁子-微波耦合体系的电学检测方法有利于该耦合系统及其与其他系统的集成, 因此具有重要意义^[2]. 如图2(b)所示, 在磁子-微波强耦合体系中, 铁磁层中磁矩

图2 (网络版彩色)磁子-微波腔耦合测量方法示意图. (a) 微波传输法^[28]; (b) 自旋泵浦电检测方法^[2]; (c) 布里渊光散射测量方法^[54]; (d) 法拉第效应测量方法^[42]

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of magnon-microwave cavity coupling measurement methods. (a) Microwave transmission method^[28]; (b) spin pumped electrical detection method^[2]; (c) Brillouin light scattering measurement method^[54]; (d) Faraday effect measurement method^[42]

进动产生自旋流, 并注入到邻近的非磁重金属层. 在重金属中, 这一自旋流被逆自旋霍尔效应转化为电荷流, 并在金属两端积累电荷产生电压. 通过测量重金属两端的电压, 可以观察到磁子-微波强耦合体系中磁子的信号^[31]. 下面介绍探测强耦合体系的自旋流, 并对比微波透射测量结果, 演示磁子-微波强耦合系统对自旋流的调控.

图3(a)是磁子-微波耦合系统实验测量的示意图. 首先用VNA测量耦合体系微波传输, 通过数据分析可以得到模式的色散(图3(b))和阻尼(图3(c))随外加磁场的变化. 可以看出, 模式的色散在腔模与磁子模式交叉处发生分裂, 表现为明显的反交叉现象, 并且模式阻尼有明显的交叉. 通过求解方程(7), 得到在固定磁场下的复数本征频率, 并将共振频率(复数本征频率实部)和归一化阻尼(复数本征频率虚部与实部的比值)分别与实验数据进行对比, 发现当耦合强度值 $K=0.016$ 时, 方程(7)的理论预测与实验测量结果吻合得非常好.

电检测磁子-微波强耦合系统中的自旋流是用一个固定频率的微波驱动耦合系统, 扫描磁场的同时测量自旋流的电信号, 这完全借鉴了自旋泵浦的测量方法^[9]. 通过改变微波频率得到微波频率-磁场色散关系. 对比微波透射的测量结果, 电检测磁子-微波强耦合的实验结果表现出明显且独特的耦合特征. 图3(d)显示, 磁子共振色散图在腔模处出现了明显的拐点, 这正是磁子与谐振腔强耦合的直接证据. 图3(e)显示, 磁子的共振线宽在谐振腔腔模处显著升高, 不再满足非耦合时共振线宽与微波频率之间的线性关系 $\Delta H = \Delta H_0 + \alpha \omega / \gamma$. 显而易见, 磁子与谐振腔的强耦合改变了磁子共振的色散和线宽, 这需要从耦合模型中得到合理的物理解释. 利用耦合方程(7), 通过给定一个微波频率, 可以得到复数的共振磁场表达式, 其中实数解表达了微波频率磁场色散关系:

$$\gamma H_r = \omega - \text{Re} \left[\frac{K^2 \omega^2 \omega_m}{\omega^2 - \omega_c^2 + 2i\beta \omega \omega_c} \right]. \quad (8)$$

这一解析解可以计算出强耦合下的磁子色散关系, 如图3(d)中实线所示. 在微波频率远低于腔模频率时, 耦合下的磁子模式趋近孤立磁子的色散; 随着微波频率的升高, 磁子模式向高磁场侧偏离原来的色散; 并且在微波频率超过腔模频率时, 磁子模式向低磁场侧偏离原来的色散, 而后逐渐趋近. 可以看到, 模型的预测结果与实验数据非常吻合.

图3 (网络版彩色)磁子-微波耦合的测量. (a) 磁子-微波耦合系统实验装置原理图; 微波传输法得到的磁子-微波耦合系统色散(b)和归一化半宽(c); 自旋泵浦电检测得到的磁子-微波耦合系统色散(d)和归一化线宽(e). 空心符号表示实验测量结果, 实线表示数值计算结果^[2]

Figure 3 (Color online) Measurement of magnon-microwave coupling. (a) Schematic diagram of experimental setup of magnon-microwave coupling system; dispersion (b) and normalized half-width (c) of magnon microwave coupling system obtained by microwave transmission method; dispersion (d) and normalized line-width (e) of magnon-microwave coupling system obtained by spin pumped electrical detection. Hollow symbols represent experimental measurement results, and solid lines represent numerical calculation results^[2]

虚数解是对磁子共振线宽的描述:

$$\Delta H(\omega) = \Delta H_0 + \frac{\alpha\omega}{\gamma} + \frac{\omega^2\omega_m}{\gamma} K^2 |\text{Im}(S)|. \quad (9)$$

式(9)比 $\Delta H = \Delta H_0 + \alpha\omega/\gamma$ 多出的第三项与微波谐振腔的模式 S 有关, 这正是谐振腔中磁子辐射阻尼的表达形式. 这里, 谐振腔的腔模 S 可以通过使用VNA测量谐振腔得到, 它反映了谐振腔中的光子态密度分布. 耦合系数 K 体现了磁子共振辐射阻尼在谐振腔中的效率, 而且辐射阻尼与谐振腔中的光子态密度函数 S 正相关. 该阻尼值甚至会大于YIG的本征吉尔伯特阻尼.

5 强耦合调控自旋流

自旋流是自旋电子器件的信息载体, 信息处理依赖于对自旋流的精确控制, 通常借助自旋轨道相互作用或者交换相互作用来控制自旋流, 这两种方式对自旋流的调控都发生在纳米尺度的超短距离内. 基于电

检测磁子-微波强耦合研究, 以谐振腔为媒介, 可以实现厘米量级的远距离调控自旋流.

基于自旋泵浦效应的电检测方式, 可以局域地测量强耦合体系中的磁子, 这是微波传输测量不能实现的. 实验中, 磁子样品是两个一样的YIG/Pt双层膜, 自旋流扩散到金属Pt中由逆自旋霍尔效应转化为电荷流, 测量到的自旋泵浦电压 V_{SP} 与自旋流 I_{S} 成正比^[6]. 与样品进行耦合的腔是具有固定尺寸的圆柱形谐振腔, 如图4(a)所示, 此实验选择了该腔内场分布较为简单的 TM_{011} 模. 将两个样品分别命名为YIG1和YIG2, YIG1被固定在圆柱形腔的可旋转顶盖上, YIG2则固定在腔的底部, 外加磁场在面内且与YIG2上的Pt条垂直, 以便于测到最大的逆自旋霍尔效应电压, TM_{011} 模的磁场分布为沿圆柱形腔中心轴均匀分布且绕中心轴的同心圆. 因此, 在外加静磁场方向不变的情况下, 通过旋转腔顶盖就可以改变YIG1上微波磁场和外加磁场的角度 θ , 从而

图 4 (网络版彩色)通过改变 θ 角, 直接调控YIG1中的自旋流, 并实现远距离操纵YIG2中的自旋流. (a) 两个YIG与微波谐振腔的耦合系统示意图. YIG1(b)和YIG2(c)的自旋泵浦电压信号. YIG1(d)和YIG2(e)中自旋流随YIG1上外磁场与微波磁场角度 θ 的变化^[6]

Figure 4 (Color online) Direct control of spin current from YIG1 and remote manipulation of spin current from YIG2 by changing angle θ . (a) Schematic diagram of the coupling system of two YIGs and microwave resonator. Spin pump voltage signal of YIG1 (b) and YIG2 (c). Spin current in YIG1 (d) and YIG2 (e) changes with the angle θ of magnetic field and microwave magnetic field of YIG1^[6]

直接调控YIG1中自旋泵浦产生的自旋流.

在腔模附近, 利用固定频率微波来驱动耦合体系, 通过扫描磁场, 能够在YIG1和YIG2上同时检测到反对称洛伦兹线型的电压信号, 这意味着两个样品上都有自旋流产生. 保持YIG2样品上的磁矩方向和微波磁场分布不变的条件下, 通过旋转YIG1使微波场 h 与外磁场 H 之间的夹角 θ 从 0° 到 90° 变化, 此时局域微波场对YIG1的力矩会明显增强, 这会导致YIG1的自旋泵浦电压增加, 如图4(b)所示. 同时, 由YIG2产生的自旋流则随着 θ 的增加而明显降低, 如图4(c)所示. 在这个过程中, YIG2与YIG1在空间上是分离的, 且相对位置并没有发

生任何改变. YIG1和YIG2中产生的电压信号随 θ 的变化关系见图4(d)和(e), 可以看出, 二者自旋流的变化均满足 $|\sin\theta|$ 的依赖关系, 且二者的变化是相反的, 即 $|I_{S1}|$ 的最大值对应 $|I_{S2}|$ 的最小值, 反之亦然. 由此, YIG2中产生的自旋流可以通过控制YIG1与谐振腔的耦合来进行远距离的调控. 两个磁子与谐振腔的耦合可以通过方程(7)的简单拓展来实现^[31], 这一耦合系统的色散是整个体系的整体特性. 在借助谐振腔实现远距离控制自旋流的实验中, 需要强调的是, 自旋流不仅仅体现出模式频率调谐相关的整体特性, 而且依赖于耦合体系的磁

子局域特性, 这体现在两个自旋流的强度变化相关且趋势相反。

6 总结与展望

本文介绍了磁子-微波强耦合体系和电学检测技术。借助交换相互作用, 磁子-微波强耦合体系提高了自旋与光子的耦合强度, 实现了室温下的强耦合, 并为强耦合体系的探测、调控提供了新物理和新方法。基于LLG方程和谐振腔电路, 讨论了磁子与微波谐振腔的经典电磁耦合模型, 重点讨论了强耦合体系中磁子

驱动自旋流的探测技术, 并且借助与谐振腔的强耦合, 展示了对自旋流远程调控的实验方法。

腔自旋电子学融合自旋电子学与腔量子电动力学的思想和方法, 借助磁子-微波强耦合展示出丰富的物理特性, 如磁子阻尼的Purcell效应^[31,32]、电磁波的非互易性^[55]、PT不对称特性^[23,24]、非线性效应等研究^[55,56], 为自旋电子学的发展提供了广阔的拓展空间。磁子-微波强耦合研究中, 耦合器件小型化^[19,35]、强耦合的电调控、耦合中的量子信息^[16-18,57-59]都是磁子-微波强耦合体系未来发展的重要方向, 有待进一步研究。

参考文献

- Huang K, Han R Q. Solid State Physics (in Chinese). Beijing: People's Education Press, 1979. 111–115 [黄昆, 韩汝琦. 固体物理学. 北京: 人民教育出版社, 1979. 111–115]
- Bai L, Harder M, Chen Y P, et al. Spin pumping in electro-dynamically coupled magnon-photon systems. *Phys Rev Lett*, 2015, 114: 227201
- Cao Y, Yan P, Huebl H, et al. Exchange magnon-polaritons in microwave cavities. *Phys Rev B*, 2015, 91: 094423
- Bourhill J, Kostylev N, Goryachev M, et al. Ultrahigh cooperativity interactions between magnons and resonant photons in a YIG sphere. *Phys Rev B*, 2016, 93: 144420
- Bai L, Blanchette K, Harder M, et al. Control of the magnon-photon coupling. *IEEE Trans Magn*, 2016, 52: 1000107
- Bai L, Harder M, Hyde P, et al. Cavity mediated manipulation of distant spin currents using a cavity-magnon-polariton. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 217201
- Wang Y P, Zhang G Q, Zhang D, et al. Bistability of cavity magnon polaritons. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 057202
- Saitoh E, Ueda M, Miyajima H, et al. Conversion of spin current into charge current at room temperature: Inverse spin-Hall effect. *Appl Phys Lett*, 2006, 88: 182509
- Bai L, Hyde P, Gui Y S, et al. universal method for separating spin pumping from spin rectification voltage of ferromagnetic resonance. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 217602
- Mosendz O, Pearson J E, Fradin F Y, et al. Quantifying spin Hall angles from spin pumping: Experiments and theory. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 046601
- Kajiwara Y, Harii K, Takahashi S, et al. Transmission of electrical signals by spin-wave interconversion in a magnetic insulator. *Nature*, 2010, 464: 262–266
- Lambert N J, Haigh J A, Ferguson A J. Identification of spin wave modes in yttrium iron garnet strongly coupled to a co-axial cavity. *J Appl Phys*, 2015, 117: 053910
- Yao B M, Gui Y S, Xiao Y, et al. Theory and experiment on cavity magnon-polariton in the one-dimensional configuration. *Phys Rev B*, 2015, 92: 184407
- Harder M, Bai L H, Match C, et al. Study of the cavity-magnon-polariton transmission line shape. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2016, 59: 117511
- Goryachev M, Farr W G, Creedon D L, et al. High-cooperativity cavity QED with magnons at microwave frequencies. *Phys Rev Appl*, 2014, 2: 054002
- Lachance-Quirion D, Wolski S P, Tabuchi Y, et al. Entanglement-based single-shot detection of a single magnon with a superconducting qubit. *Science*, 2020, 367: 425–428
- Yuan H Y, Yan P, Zheng S, et al. Steady bell state generation via magnon-photon coupling. *Phys Rev Lett*, 2020, 124: 053602
- Yu M, Shen H, Li J. Magnetostrictively induced stationary entanglement between two microwave fields. *Phys Rev Lett*, 2020, 124: 213604
- Yuan H Y, Zheng S, Ficek Z, et al. Enhancement of magnon-magnon entanglement inside a cavity. *Phys Rev B*, 2020, 101: 014419
- Grigoryan V L, Shen K, Xia K. Synchronized spin-photon coupling in a microwave cavity. *Phys Rev B*, 2018, 98: 024406
- Yu W, Wang J, Yuan H Y, et al. Prediction of attractive level crossing via a dissipative mode. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 227201
- Harder M, Yang Y, Yao B M, et al. Level attraction due to dissipative magnon-photon coupling. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 137203
- Harder M, Bai L, Hyde P, et al. Topological properties of a coupled spin-photon system induced by damping. *Phys Rev B*, 2017, 95: 214411
- Zhang D, Luo X Q, Wang Y P, et al. Observation of the exceptional point in cavity magnon-polaritons. *Nat Commun*, 2017, 8: 1368
- Zhang G Q, You J Q. Higher-order exceptional point in a cavity magnonics system. *Phys Rev B*, 2019, 99: 054404
- Shen R C, Zhang G Q, Wang Y P, et al. Research progress of cavity spin wave mixing system (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2019, 68: 7–15 [沈瑞昌,

- 张国强, 王逸璞, 等. 腔自旋波混合系统的研究进展. 物理学报, 2019, 68: 7–15]
- 27 Soykal Ö O, Flatté M E. Strong field interactions between a nanomagnet and a photonic cavity. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 077202
 - 28 Huebl H, Zollitsch C W, Lotze J, et al. High cooperativity in coupled microwave resonator ferrimagnetic insulator hybrids. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 127003
 - 29 Tabuchi Y, Ishino S, Ishikawa T, et al. Hybridizing ferromagnetic magnons and microwave photons in the quantum limit. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 083603
 - 30 Zhang X, Zou C L, Jiang L, et al. Strongly coupled magnons and cavity microwave photons. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 156401
 - 31 Maier F H, Harder M, Klingler S, et al. Tunable magnon-photon coupling in a compensating ferrimagnet—From weak to strong coupling. *Appl Phys Lett*, 2017, 110: 132401
 - 32 Goryachev M, Watt S, Bourhill J, et al. Cavity magnon polaritons with lithium ferrite and three-dimensional microwave resonators at millikelvin temperatures. *Phys Rev B*, 2018, 97: 155129
 - 33 Abdurakhimov L V, Khan S, Panjwani N A, et al. Magnon-photon coupling in the noncollinear magnetic insulator Cu_2OSeO_3 . *Phys Rev B*, 2019, 99: 140401
 - 34 Li Y, Polakovic T, Wang Y L, et al. Strong coupling between magnons and microwave photons in on-chip ferromagnet-superconductor thin-film devices. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 107701
 - 35 Hou J T, Liu L. Strong coupling between microwave photons and nanomagnet magnons. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 107702
 - 36 Schuster D I, Sears A P, Ginossar E, et al. High-cooperativity coupling of electron-spin ensembles to superconducting cavities. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 140501
 - 37 Chiorescu I, Groll N, Bertaina S, et al. Magnetic strong coupling in a spin-photon system and transition to classical regime. *Phys Rev B*, 2010, 82: 024413
 - 38 Abe E, Wu H, Ardavan A, et al. Electron spin ensemble strongly coupled to a three-dimensional microwave cavity. *Appl Phys Lett*, 2011, 98: 251108
 - 39 Zhang X, Zou C, Jiang L, et al. Superstrong coupling of thin film magnetostatic waves with microwave cavity. *J Appl Phys*, 2016, 119: 023905
 - 40 Goryachev M, Kostylev M, Tobar M E. Strong coupling of 3D cavity photons to travelling magnons at low temperatures. 2017, arXiv: 1710.06601
 - 41 Haghshenasfard Z, Cottam M G. Hybrid modes of a cavity photon coupled with multiple magnons in ferromagnetic nanostructures. *Phys Rev B*, 2020, 101: 144438
 - 42 Hisatomi R, Osada A, Tabuchi Y, et al. Bidirectional conversion between microwave and light via ferromagnetic magnons. *Phys Rev B*, 2016, 93: 174427
 - 43 Wang Y P, Zhang G Q, Zhang D, et al. Magnon Kerr effect in a strongly coupled cavity-magnon system. *Phys Rev B*, 2016, 94: 224410
 - 44 Osada A, Hisatomi R, Noguchi A, et al. Cavity optomagnonics with spin-orbit coupled photons. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 223601
 - 45 Kaur S, Yao B M, Rao J W, et al. Voltage control of cavity magnon polariton. *Appl Phys Lett*, 2016, 109: 032404
 - 46 Kaur S, Yao B, Gui Y S, et al. On-chip artificial magnon-polariton device for voltage control of electromagnetically induced transparency. *J Phys D-Appl Phys*, 2016, 49: 475103
 - 47 Tay Z J, Soh W T, Ong C K. Observation of electromagnetically induced transparency and absorption in yttrium iron garnet loaded split ring resonator. *J Magn Magn Mater*, 2018, 451: 235–242
 - 48 Yang Y, Wang Y P, Rao J W, et al. Unconventional singularity in anti-parity-time symmetric cavity magnonics. *Phys Rev Lett*, 2020, 125: 147202
 - 49 Xu J, Zhong C, Han X, et al. Floquet cavity electromagnonics. *Phys Rev Lett*, 2020, 125: 237201
 - 50 Xie J, Ma S, Li F. Quantum-interference-enhanced magnon blockade in an yttrium-iron-garnet sphere coupled to superconducting circuits. *Phys Rev A*, 2020, 101: 042331
 - 51 Jaynes E T, Cummings F W. Comparison of quantum and semiclassical radiation theories with application to the beam maser. *Proc IEEE*, 1963, 51: 89–109
 - 52 Boventer I, Dörflinger C, Wolz T, et al. Control of the coupling strength and linewidth of a cavity magnon-polariton. *Phys Rev Res*, 2020, 2: 013154
 - 53 Shim J, Kim S J, Kim S K, et al. Enhanced magnon-photon coupling at the angular momentum compensation point of ferrimagnets. *Phys Rev Lett*, 2020, 125: 027205
 - 54 Klingler S, Maier-Flaig H, Gross R, et al. Combined Brillouin light scattering and microwave absorption study of magnon-photon coupling in a split-ring resonator/YIG film system. *Appl Phys Lett*, 2016, 109: 072402
 - 55 Nair J M P, Zhang Z, Scully M O, et al. Nonlinear spin currents. *Phys Rev B*, 2020, 102: 104415
 - 56 Elyasi M, Blanter Y M, Bauer G E W. Resources of nonlinear cavity magnonics for quantum information. *Phys Rev B*, 2020, 101: 054402
 - 57 Wang Y P, Rao J W, Yang Y, et al. Nonreciprocity and unidirectional invisibility in cavity magnonics. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 127202
 - 58 Grigoryan V L, Xia K. Torque-induced dispersive readout in a weakly coupled hybrid system. *Phys Rev B*, 2020, 102: 064426
 - 59 Yu W, Yu T, Bauer G E W. Circulating cavity magnon polaritons. *Phys Rev B*, 2020, 102: 064416

Summary for “腔内自旋与微波相互作用的电检测”

Electrical detection of spin-microwave coupling in a cavity

Lihui Bai^{*}, Yufeng Tian, Shishou Kang, Yanxue Chen, Guolei Liu, Liangmo Mei & Shishen Yan

School of Physics, Shandong University, Jinan 250100, China

^{*} Corresponding author, E-mail: lhbai@sdu.edu.cn

Via exploring the spin dynamics and transport properties at interfaces of magnetic material/non-magnetic metal bilayers, spintronics advanced many techniques on generation, detection, and manipulation of spin currents, which laid down a foundation for designing spintronic devices. New ideas and methods for manipulating spin are required in the spintronics community. Merging with cavity quantum electrodynamics, magnetic resonance in ferromagnets inside of a microwave cavity, realizes a strong magnon-microwave coupling at room temperature, opening an avenue to manipulate spin and spin current for the spintronics community. Spin-microwave coupling strength was significantly improved by replacing a few spins in a paramagnetic spin system with magnetization in ferromagnetic materials. Thus, a strongly coupled magnon-microwave system offers a hybrid quantum platform with many measures to tune the coupled system, such as an exchange magnetic field, an anisotropy field, controlled coupling strength, controlled damping parameters, and so on. Many devices were proposed and demonstrated with potential applications. In this review, we briefly introduce the concept and mechanism of magnon-microwave coupling, a classical electrodynamic coupling model for the coupling, spin currents produced by the coupled magnon, and manipulation of the spin current via the strong coupling.

In ferromagnets, magnons can couple to a microwave mode as a magnon-polariton propagating in the materials. The strongly coupled magnon-microwave system is a magnon-polariton in a cavity where the microwave was confined as a resonance mode with a high quality factor. Using the Landau-Lifshitz-Gilbert equation and Maxwell equations, we introduce the classical electrodynamic coupling model and reveal that the magnon is driven by a torque produced by the microwave magnetic field on the magnetization and the microwave is feedback via Faraday's law. Therefore, the coupling strength of the magnon-microwave system can be controlled by changing the torque.

Magnon-microwave coupling is experimentally studied using many techniques, such as microwave transmission, Brillouin light scattering, Faraday rotation measurement, and spin pumping electrical detection. Spin pumping is well explored in the spintronics community as a spin current produced by magnon and detected as a voltage via inverse spin Hall effect in a novel metal. Combining with microwave transmission of the coupled microwave subsystem, spin pumping electrical detection by directly detecting the spin current produced by the magnon subsystem in the coupled system, illustrates a more complete profile of the coupled magnon-microwave system.

In addition, the strongly coupled magnon-microwave system offers a new technique to manipulate spin currents. We experimentally demonstrate that spin currents produced by the strongly coupled system are correlated with each other mediated by the microwave cavity, and can be manipulated remotely. Two almost identical magnet samples are used to couple to a cavity and the coupling strengths between each magnet and the cavity are tunable individually. By using electrical detection to locally detect each magnet sample respectively, we find that the spin currents produced by two magnet samples are coherently correlated. By tuning the coupling strength of one magnet sample to the cavity, the spin current produced by the second magnet sample is manipulated distantly over a few centimeters, which is far longer than the distance of spin-orbit interaction or exchange interaction. This distant control is only limited by the coherence length of the microwave and the dimension of the cavity. This flexibility opens the door to improve spin current generation and manipulation for cavity spintronic devices.

spin dynamics, magnon-microwave strong coupling, magnon-polariton, spin current

doi: [10.1360/TB-2021-0166](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0166)