

专题: 应用磁学

基于磁性薄膜的磁声耦合频率梳*

杨芝^{1) #} 刘长江^{2) #} 姚永正²⁾ 张悦^{2) †}

1) (武汉城市学院, 武汉 430074)

2) (华中科技大学集成电路学院, 武汉 430074)

(2026 年 1 月 16 日收到; 2026 年 5 月 26 日收到修改稿)

磁频梳作为一种重要的非线性动力学现象, 在精密频率计量、信号处理及片上磁电子器件中具有重要应用前景, 但传统磁频梳通常依赖强微波驱动和体块磁性材料, 存在功耗高、尺寸大及集成度受限等问题. 本文基于微磁学仿真, 研究了磁性薄膜体系中由表面声波激发的磁声耦合频率梳机制. 通过在具有较大磁弹耦合系数的磁性薄膜上引入驻波声场, 磁振子模式与声子模式发生非线性相互作用, 在无强微波激励条件下形成稳定的磁频梳结构. 系统分析了声波振幅、声波频率、传播方向与磁各向异性轴夹角以及各向异性强度对频率梳特性的影响. 结果表明: 声波频率决定频率梳的齿间距, 声波振幅存在产生频率梳的阈值; 当声波传播方向与磁化稳定方向满足特定角度关系时, 磁弹耦合显著增强, 频率梳强度达到最大; 适中的磁各向异性有利于获得梳齿数量多、频率覆盖范围宽且强度分布均匀的频率梳. 上述研究为实现可调谐、低功耗和高集成度的片上磁频梳器件提供了新的思路.

关键词: 磁频梳, 声表面波, 磁声耦合, 微磁学仿真**DOI:** 10.7498/aps.75.20260087**CSTR:** 32037.14.aps.75.20260087

1 引言

磁频梳 (magnetic frequency comb, MFC) 是一类源于非线性磁振子动力学的新兴频率调制现象, 近年来因其在精密频率计量、微波光谱学和片上自旋波通信等领域的潜在应用而受到广泛关注^[1-3]. MFC 与光学频率梳类似, 可产生等间距的频率模式, 具有优异的时间与频率分辨能力, 为实现片上高精度频率标准和新型量子测量手段提供了重要途径^[4-7].

传统的 MFC 主要依赖磁振子的非线性相互作用实现, 如三磁子散射、四磁子耦合及磁振子-Skyrmion 相互散射等非线性过程^[2,8-10]. 然而, 由于磁振子固有的非线性效应通常较弱, 需要强微波

驱动以触发多模能量交换^[11,12]. 近年来有实验研究报道了在 YIG 球形谐振腔中通过强微波激励实现的 MFC^[13,14], 但这种强驱动不仅导致系统功耗增大与频率漂移, 还可能引入热效应与磁噪声, 从而削弱频梳的稳定性和可控性^[15].

当前基于体块 YIG 器件的腔磁系统仍存在若干关键瓶颈: 1) YIG 材料的磁弹系数极小, 难以实现强耦合效应; 2) 系统尺寸较大、加工复杂, 不适合集成电路兼容工艺; 3) 非线性响应阈值高, 需强声波或微波场激励, 这限制了其在低功耗片上应用中的可行性^[16].

近年来, 随着声磁耦合 (magnetoacoustic coupling) 与磁弹性相互作用的研究兴起^[17-20], 研究者们提出利用声表面波 (surface acoustic wave, SAW) 或体声波 (bulk acoustic wave, BAW) 实现磁频梳

* 武汉城市学院预研项目 (批准号: 2024CYYYJJ02)、湖北省教育厅科学研究计划指导性项目 (批准号: B2023431) 和国家自然科学基金 (批准号: 12574119) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: yue-zhang@hust.edu.cn

的新的可能性. 最近有研究报道了基于 BAW-磁振子混合系统中实现宽带磁声混合频梳, 揭示了 Kerr 非线性效应在模式同步与频率锁定中的关键作用^[21]. 声波激励的磁频梳具有以下潜在优势: 1) 可通过改变声波频率实现梳齿间距的可调谐性; 2) 低功耗驱动条件下实现稳定频率输出; 3) 依托 MEMS/CMOS 兼容工艺实现高集成度片上应用.

本文利用微磁学仿真, 研究磁性薄膜中由 SAW 激励形成的驻波与磁振子模式之间的非线性交互. 通过在 CoFeB 磁性薄膜中引入 Rayleigh 型驻波声场, 实现磁振子模式的周期性调制与能量分裂, 通过磁子模式与驻波声子模式的强耦合形成驻波 MFC. 并进一步系统研究了声波频率、振幅、传播方向及各向异性强度等参数对频率梳形成的影响. 本研究不仅为磁频梳的微纳集成提供了新思路, 也为发展新型磁声混合系统与片上自旋波计算平台奠定了理论基础. 基于磁性薄膜的 MFC 有望实现可调谐、高稳定性的片上频梳器件, 在精密频谱测量、超灵敏检测等领域具有潜在应用价值.

2 仿真模型

本研究采用微磁学仿真软件 Mumax3^[22]. 模型基于具有较高磁弹系数的 CoFeB 薄膜体系, 通过施加 Rayleigh 型 SAW 驻波激励, 模拟声学谐振器中驻波对磁性薄膜的作用过程, 仿真模型如图 1 所示. 声学结构由单端谐振器及其两侧的反射栅组成, 声波经反射栅多次反射和干涉, 在压电衬底表面形成稳定驻波. CoFeB 薄膜沉积于叉指电极之间, 在声波激励下通过磁声耦合产生磁频梳. 仿真所用材料参数取值如下^[23-27]: 饱和磁化强度 $M_S = 1.031 \times 10^6$ A/m, 交换常数 $A_{ex} = 2.07 \times 10^{-11}$ J/m, 各向异性常数 $K_u = 3 \times 10^4$ J/m³, 阻尼因子 $\alpha = 0.006$, 磁弹性常数 $b_1 = b_2 = 1.35 \times 10^7$ J/m³.

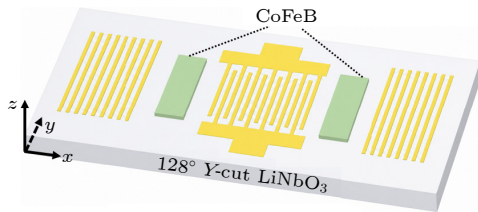


图 1 基于 CoFeB 薄膜的磁声耦合磁频梳模型示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the magneticacoustic-coupled magnetic frequency comb model based on CoFeB film.

使用 2.5 ps 的采样步长, 总仿真时间为 15 ns. CoFeB 薄膜的尺寸设为 $1000 \text{ nm} \times 1000 \text{ nm} \times 5 \text{ nm}$, 单胞尺寸 $1 \text{ nm} \times 1 \text{ nm} \times 5 \text{ nm}$, 小于交换长度. 在薄膜边界设置宽度 30 nm、阻尼因子靠近边界而梯度增大的区域, 用于吸收自旋波. 吸收边界以外区域设置为 SAW 作用区. Rayleigh 波的应变分量以纵向应变 ε_{xx} 分量为主, 仿真只考虑 ε_{xx} 贡献, 其驻波表达式为

$$\varepsilon_{xx} = A \cos(kx) \cos(\omega t), \quad (1)$$

其中 A 为应变振幅, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, $\omega = 2\pi f$ 为 SAW 的角频率, SAW 在薄膜上的传播速度设置为 4000 m/s.

3 结果与讨论

3.1 磁性薄膜的频率响应

为获得 CoFeB 薄膜的本征磁振响应, 在整个薄膜范围施加 sinc 函数形式的外磁场 $\mathbf{H}(t) = h_0 \text{sinc}(\omega_H t) \mathbf{e}_y$, 其中, $h_0 = 10$ mT, 截止频率为 $\omega_H/(2\pi) = 100$ GHz, 用于激发整个薄膜体系的本征频谱. 通过对每个单元的磁化动态进行快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT), 并对所有网格单元结果取平均, 得到薄膜系统的本征频谱响应, 如图 2(a) 所示. 结果显示频谱中存在单一特征峰, 中心频率约为 8 GHz, 对应于 CoFeB 薄膜的铁磁共振 (ferromagnetic resonance, FMR) 模式. 根据 Kittel 公式^[28]估算:

$$f = \frac{\gamma}{2\pi} \sqrt{H_k (H_k + M_S)}, \quad (2)$$

式中旋磁比 $\gamma = 1.76 \times 10^{11} \text{ s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$, 各向异性场 $H_k = 2K_u/\mu_0 M_S$, 真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$. 计算得到的共振频率为 7.86 GHz, 与仿真结果接近, 差异主要源于 FFT 频谱的分辨率 (0.07 GHz).

随后, 在 SAW 激励区域引入纵向应变分量 ε_{xx} 的 Rayleigh 型驻波, 频率为 2 GHz, 应变振幅为 0.002. 提取磁化强度分量 M_x 随时间的变化并对其进行 FFT, 然后取空间平均, 即可得到磁振子的频谱图, 如图 2(b) 所示. 可以清晰地看到等间距为声子频率 ($\omega_b/(2\pi) = 2$ GHz) 的频率梳结构. 以基频 2 GHz (第 1 级频峰) 为中心, 逐次向高频范围分裂产生高阶谐波的频率峰.

当将磁弹耦合设置为 0 ($b_1 = b_2 = 0$) 时, 仿真结果显示 SAW 激励无法产生频率梳结构, 验证

了MFC的形成源于声波与磁振子之间的磁弹性耦合机制。

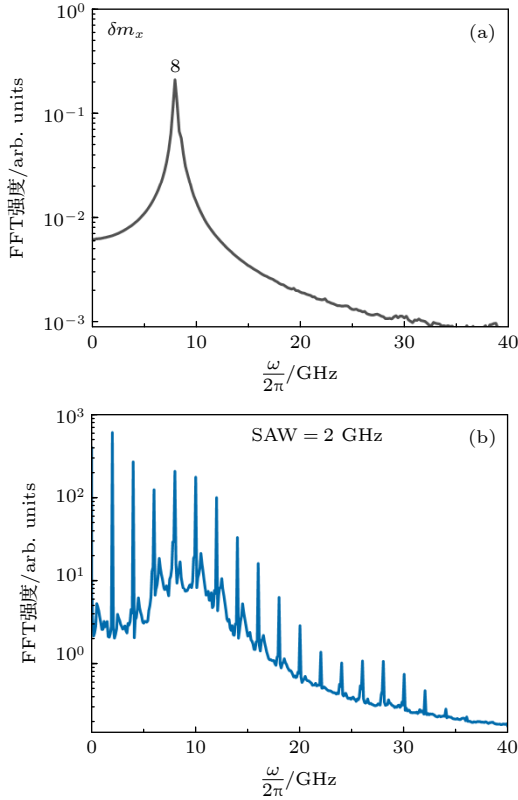


图2 (a) CoFeB薄膜的本征频谱; (b) 2 GHz SAW激励下的频率梳

Fig. 2. (a) Intrinsic spectrum of the CoFeB film; (b) frequency comb under 2 GHz SAW excitation.

3.2 SAW振幅对频率梳的影响

为研究磁弹性调制强度对磁声耦合频率梳形成的影响, 设置SAW的频率为2 GHz, SAW传输方向与单轴各向异性易轴方向夹角为 75° . 通过改变SAW振幅 A , 分析其对磁频梳结构的影响。

如图3(a)所示, 当SAW应变振幅为2‰时, 可观察到以2 GHz为基频、以声波频率为间隔的磁频梳结构. 磁声耦合调制产生的频谱强度分布符合相位调制边带的贝塞尔函数分布特征: 低阶项($n = 0, \pm 1, \pm 2$)幅度较大, 低阶磁振子能量较强; 而高阶项($n \gg 1$)幅度逐渐减小, 导致远离主频的频率分量能量显著降低, 与图中频峰强度递减规律一致。

当SAW应变振幅减小至0.1‰以下时, 磁弹性调制显著减弱, 频率梳结构几乎消失, 仅能观察到与SAW频率相同的2 GHz模式及弱的合频信号(4 GHz和6 GHz). 由于高阶边带的非线性耦

合较弱, 同时受到磁阻尼与频谱展宽效应影响, 更高阶模式难以维持持续级联, 因此难以形成稳定频率梳结构。

为进一步分析振幅效应, 对SAW应变振幅在0.1‰—2‰范围内进行仿真. 在0—40 GHz的频率范围内, 以声波频率2 GHz为间隔, 对各模式的磁振子FFT强度积分求和, 得到频谱总能量, 其与应变振幅的关系如图3(b)所示. 可以看出随着应变振幅的减小, 频谱的总能量也随之降低。

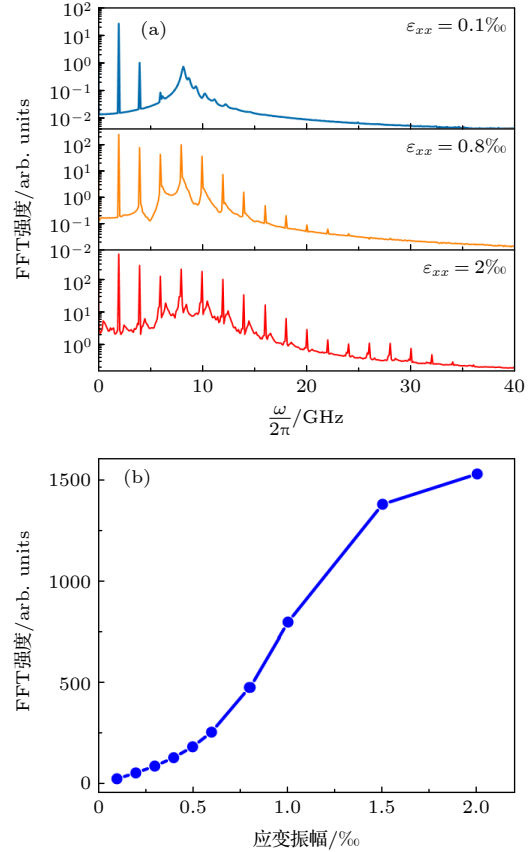


图3 SAW应变振幅对频率梳的影响 (a) 应变幅度分别为0.1‰、0.8‰以及2‰时频率梳的变化; (b) 频谱总能量随应变振幅的变化

Fig. 3. Influence of SAW strain amplitude on the frequency comb: (a) Variation of frequency combs at strain amplitudes of 0.1‰, 0.8‰, and 2‰; (b) dependence of total spectral energy on the strain amplitude.

因此, 我们将约0.1‰附近视为磁频梳形成的可观测阈值范围, 此“阈值”并非严格意义上的动力学分岔点, 而是指FFT频谱中能够清晰分辨出连续多阶等间隔边带结构时所对应的最低应变振幅。

从物理机制上看, 频率梳的形成来源于SAW诱导的周期性磁弹调制所产生的边带增益与系统磁阻尼之间的竞争. 在低应变振幅条件下, 磁弹耦

合较弱, 仅能激发有限低阶边带; 随着应变振幅增大, 磁弹调制增强, 高阶边带逐渐级联产生并持续累积, 最终形成稳定的频率梳结构^[29].

从频率调制角度来看, SAW 诱导的磁弹场会对磁振子本征共振频率产生周期性调制, 可以据此半定量估计应变幅度对磁频梳的调控. 根据 Kittel 关系, 在小扰动近似下, 磁弹场引起的有效场变化将导致共振频率发生近似线性偏移, 其频率调制量近似满足

$$\delta\omega \sim \gamma H_{\text{me}}, \quad (3)$$

其中 H_{me} 为磁弹有效场.

对于瑞利型 SAW 驱动面内磁化膜的磁弹场^[30], 主要考虑 ε_{xx} 应变, 并取其面内分量最大值, 即:

$$H_{\text{me}} = \frac{b_1 \varepsilon_{xx}}{\mu_0 M_S}. \quad (4)$$

代入相关参数, 当应变振幅达到 0.1‰ 时, 对应的频率调制量级约为 10^{-2} GHz 量级, 已接近 FFT 频谱分辨率与谱线展宽范围, 因此 FFT 频谱中开始出现可分辨的等间隔边带结构. 而仿真中清晰可观测的频率梳形成区间同样位于 0.1‰ 附近, 与图 3 中的仿真现象具有较好一致性.

3.3 SAW 频率对频率梳的影响

在磁声耦合频率梳系统中, SAW 频率直接决定磁振子调制的周期性, 对梳齿间距与频谱分布具有关键影响. SAW 对磁振子频率进行周期性调制, 从而形成以声波频率为间隔的离散频率模式. 设置 SAW 应变振幅 $A = 2\text{‰}$, 在 0.2—2 GHz 范围内改变 SAW 频率, 并对仿真结果进行 FFT, 得到其频率响应, 分析 SAW 频率变化对频率梳结构的影响. MFC 的梳齿间隔等于声波频率. 较高的 SAW 频率会增大梳齿间距, 使频谱更为分散并拓展带宽; 较低的 SAW 频率则使梳齿密集, 形成高分辨率的频谱结构.

如图 4 所示, 根据 FFT 频率分辨率 ($\Delta f = f_s/N = 0.1$ GHz) 和采样定理, 为保证识别出所有的频率成分, 选择 0.2 GHz 的 SAW 作为最低激励频率, 其 FFT 频谱显示, 频率覆盖范围约为 3 GHz, 但形成了间隔为 0.2 GHz 的高密度频梳, 适用于低频信号的高分辨率探测. 当 SAW 频率提升至 0.8—1 GHz 时, 频谱带宽明显扩展, 各阶模式能量分布均匀, 显示出稳定的 MFC 结构. 进一步增大 SAW

频率至 2 GHz, MFC 的带宽扩展至 30 GHz 以上, 但过大的梳齿间距导致频谱变得稀疏, 高阶谱线能量明显减弱并迅速衰减.

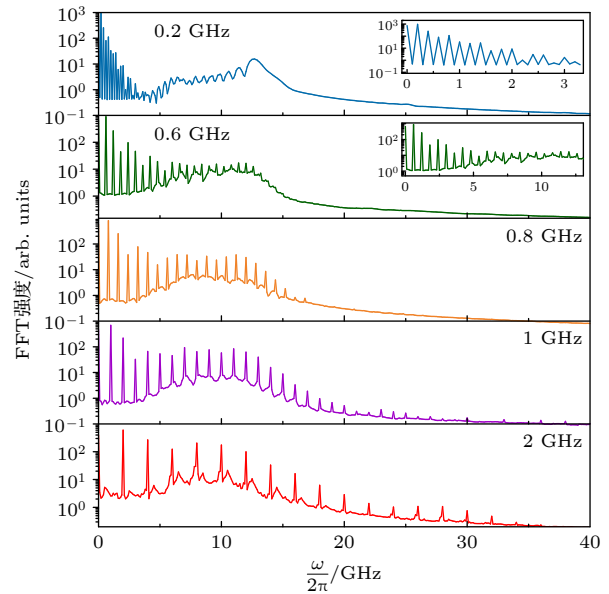


图 4 SAW 频率对频率梳特性的影响

Fig. 4. Influence of SAW frequency on the characteristics of the magnetic frequency comb.

从频率调制角度来看, SAW 对磁振子体系形成周期性参数调制, 可视为对磁振子共振频率的相位调制过程. 磁化动态可展开为多个以 SAW 频率为间隔的边带模式, 其频谱分布满足类似相位调制边带的分布特征. 因此, 频率梳的总带宽不仅取决于梳齿间隔, 还与可激发的高阶边带数量有关.

在低频 SAW 条件下, 虽然能够形成较密集的梳齿结构, 但由于梳齿间隔较小, 整体频谱覆盖范围有限; 随着 SAW 频率增大, 边带间隔增大, 频率梳带宽明显扩展. 当 SAW 频率进一步升高时, 高阶边带逐渐远离磁振子本征共振区域, 同时受到磁阻尼与能量耗散影响, 其强度快速衰减, 因此频率梳表现出较稀疏的谱线分布. 因此, 中等 SAW 频率能够在边带间隔与高阶边带维持能力之间取得较好平衡, 从而形成带宽更宽且能量分布更均匀的频率梳结构.

综上, SAW 频率不仅决定频率梳的梳齿间隔, 同时还影响高阶边带的维持能力与整体频谱带宽, 因此可通过调节 SAW 频率实现对磁频梳频谱结构的有效调控, 为磁频梳在高精度信号处理与频谱分析中的应用提供新的可行途径.

3.4 SAW 传播方向与各向异性轴的夹角变化对频率梳的影响

本节研究薄膜的各向异性轴方向与 SAW 传播方向的夹角变化对频率梳的影响. 设置 SAW 频率为 2 GHz, 振幅 $A = 2\%$, 改变 SAW 传输方向与各向异性轴的夹角 φ , 分析 MFC 强度随 φ 的变化关系.

仿真采用 Rayleigh 型驻波, 仅考虑其主要的应变分量 ε_{xx} , 波矢 $\mathbf{k}_{\text{SAW}}$ 沿水平 x 方向. 对于面内磁化的 CoFeB 薄膜 ($\theta_0 = \pi/2$), 磁弹场 $\mu_0 h_{1(2)}$ 在 xy 平面内, 可以表示为^[30]

$$\mu_0 \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 2b_1 \sin \varphi_0 \cos \varphi_0 \varepsilon_{xx} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

计算所用坐标系如图 5 所示. 其中 φ_0 为 m 的稳定方向与 SAW 的夹角, φ 为 SAW 传播方向与各向异性轴的夹角, θ_0 为 m 与薄膜法线的夹角. 当 $\varphi_0 = \pi/4 + n\pi/2$ ($n = 0, 1, 2, 3$) 时, $\mu_0 h_{1(2)}$ 出现极大值, 磁弹耦合最强, 此时磁性系统总自由能 G^{tot} 在稳定方向上达极小.

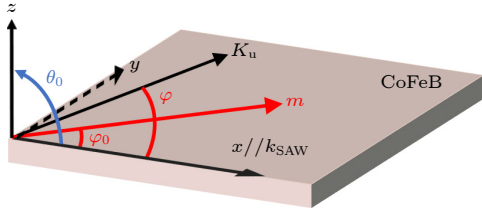


图 5 计算所用坐标系

Fig. 5. Coordinate system used for calculation.

仅考虑磁各向异性和磁弹耦合能的贡献, G^{tot} 可以表示为

$$G^{\text{tot}} = H_k \cos^2(\varphi - \varphi_0) + b_1 \varepsilon_{xx} \cos^2(\varphi_0), \quad (6)$$

将各向异性轴与 SAW 传播方向的夹角 φ 代入, 可求导并计算当总自由能 G^{tot} 取极小值时对应的 φ_0 .

如图 6 所示, 以 $\pi/12$ 为间隔从 $0-2\pi$ 旋转各向异性轴方向, 计算各角度 φ 下 FFT 频谱在 $0-40$ GHz 范围内的梳齿强度, 绘制 MFC 强度随 φ 变化的极图. 同时计算每个角度下 G^{tot} 取极小时所对应的磁化矢量的稳定方向, 绘制 $G_{\text{min}}^{\text{tot}}$ 随夹角 φ_0 变化的极图. 结果表明, 频率梳强度在 $\varphi = n\pi/2$ ($n = 0, 1, 2, 3$) 时最小, G^{tot} 极小值所对应的 $\varphi_0 = n\pi/2$ ($n = 0, 1, 2, 3$), 在该角度下, 磁弹耦合场为 0, 无法形成磁频梳. 而当 $\varphi = 5\pi/12, 7\pi/12, 17\pi/12$ 和

$19\pi/12$ 时, G^{tot} 达到极小值, 对应 $\varphi_0 = (2n+1)\pi/4$ ($n = 0, 1, 2, 3$), 由于该方向磁弹耦合最强, 频率梳强度最大. 这表明通过调节 SAW 与各向异性轴的夹角, 可有效控制磁弹耦合强度与 MFC 输出强度, 实现对频梳特性的方向性调控.

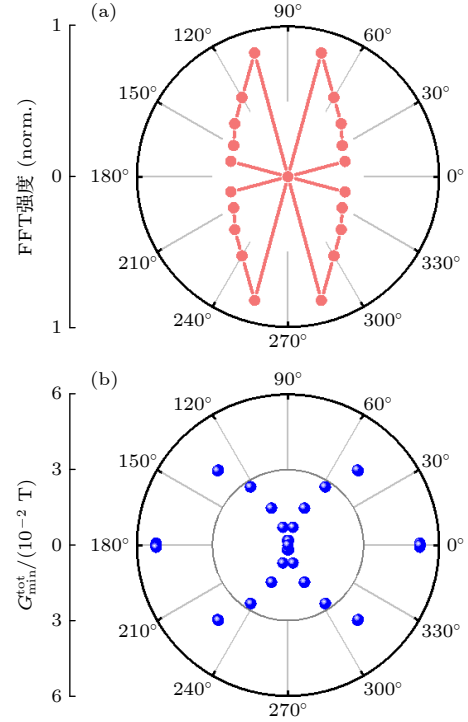


图 6 SAW 传播方向与各向异性轴夹角 φ 对 MFC 强度的影响 (a) MFC 强度随 φ 变化极图; (b) 不同 φ 下 $G_{\text{min}}^{\text{tot}} - \varphi_0$ 极图

Fig. 6. Influence of the angle φ between the SAW propagation direction and anisotropy axis on MFC strength: (a) Polar plot of the MFC strength as a function of φ ; (b) polar plot of $G_{\text{min}}^{\text{tot}} - \varphi_0$ for different φ .

需要指出的是, 本文中固定外磁场沿 y 方向, 仅用于确定磁化稳定方向并减少参数变量. 由于磁弹耦合强度主要取决于磁化方向与 SAW 应变张量之间的相对取向, 因此改变外磁场方向本质上会改变磁化平衡方向, 从而影响频率梳强度与频谱分布. 该过程与前文讨论的改变 SAW 传播方向与磁化稳定方向夹角的影响具有相同物理来源, 即本质上频率梳强度的方向依赖来源于磁弹力矩对磁化进动激发效率的变化. 因此, 本节得到的方向依赖规律对于不同外磁场方向同样具有一定普适性.

3.5 各向异性常数对频率梳的影响

SAW 激励的 MFC 不仅受磁弹耦合强度的影响, 也与磁性材料的各向异性常数密切相关^[31].

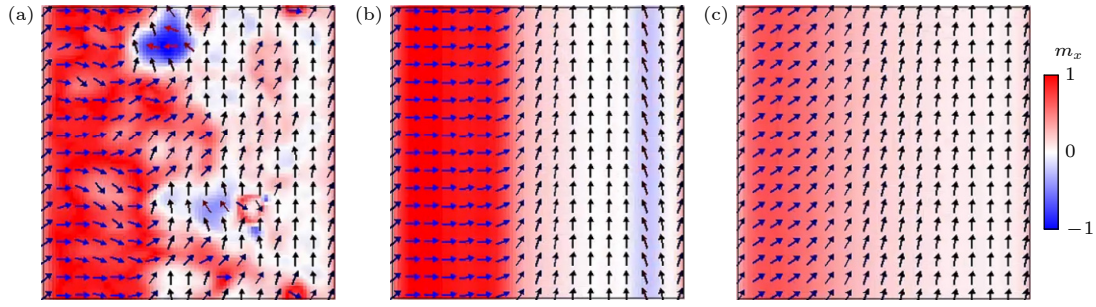


图 7 不同各向异性常数下的面内磁矩分布 (a) $K_u = 2 \times 10^4 \text{ J/m}^3$; (b) $K_u = 2.4 \times 10^4 \text{ J/m}^3$; (c) $K_u = 5 \times 10^4 \text{ J/m}^3$

Fig. 7. In-plane magnetic moment distributions at different anisotropy constants: (a) $K_u = 2 \times 10^4 \text{ J/m}^3$; (b) $K_u = 2.4 \times 10^4 \text{ J/m}^3$; (c) $K_u = 5 \times 10^4 \text{ J/m}^3$.

各向异性场一方面有助于维持磁化强度分布的均匀性, 另一方面则对磁化进动形成一定约束, 从而影响 MFC 的特性.

仿真设置 SAW 频率 $f = 2 \text{ GHz}$, 应变振幅 $A = 2\%$, SAW 与各向异性轴夹角 $\varphi = 5\pi/12$, 研究各向异性常数 K_u 的变化对 MFC 的影响. 如图 7(a) 所示, 当 $K_u = 2 \times 10^4 \text{ J/m}^3$ (或更小) 时, 由于磁各向异性较弱, 对磁化取向的约束不足, 导致 SAW 激励下磁化分布呈现明显非均匀性, 难以形成稳定相干进动模式. 此时虽然存在磁弹耦合, 但频率梳结构不明显, 能量分布无规律. 当 $K_u = 2.4 \times 10^4 \text{ J/m}^3$ 时 (图 7(b)), 磁各向异性与磁弹场之间形成良好匹配, 磁化强度分布趋于均匀, 且在 SAW 激励下产生稳定的磁化进动. 此时磁振子与声子之间的非线性耦合显著增强, 磁振子模式分裂

形成等间隔的频率梳结构. 随着 K_u 进一步增大 ($K_u > 5 \times 10^4 \text{ J/m}^3$), 强各向异性场对磁化进动施加约束, 抑制了磁弹驱动下的磁振动幅度, 使非线性能量交换显著减弱, 导致 MFC 强度降低、梳齿数量减少 (图 8). 因此, 适中的各向异性常数有助于实现磁化约束与磁弹响应之间的动态平衡, 从而形成高强度、宽频带的磁频梳结构.

4 结 论

本文基于微磁学仿真研究了表面声波与磁振子间的非线性磁弹耦合及其激励磁频梳的机理. 本文结果表明, SAW 诱导的周期性磁弹调制能够通过非线性边带级联实现稳定磁频梳输出, 其本质上属于一种基于磁声耦合的频率调制过程. 具体而言, SAW 频率决定 MFC 的梳齿间隔, 适中的频率可获得带宽宽、能量分布均匀的稳定频率梳; SAW 应变振幅存在明显阈值, 低于阈值时难以形成频率梳, 而超过阈值后频谱能量迅速增强; SAW 传播方向与磁各向异性轴夹角显著影响磁弹耦合强度, 当磁化稳定方向与传播方向满足特定角度关系 ($\varphi_0 = \pi/4 + n\pi/2$, $n = 0, 1, 2, 3$) 时, 耦合最强、梳齿能量最大; 此外, 适中的各向异性常数有助于在稳定性与可调谐性之间取得平衡, 从而形成频率覆盖范围广、结构清晰的 MFC.

与传统依赖强微波驱动的体块磁频梳相比, 本研究揭示了基于薄膜-SAW 体系的低功耗、可集成频率梳形成机制, 为实现片上磁声混合频率器件提供了新思路. 未来工作可进一步结合实验验证, 探讨多模声学谐振结构、不同磁性材料及外场调控对频梳性能的影响, 以推动可调谐、宽带磁频梳在精密测量与信号处理领域的实际应用.

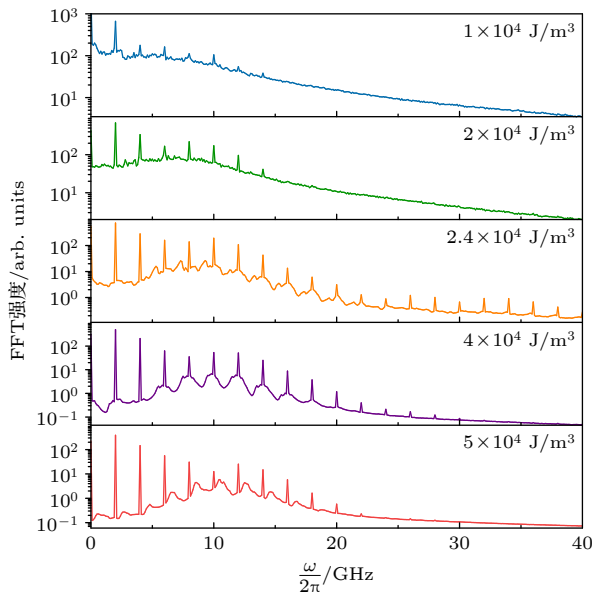


图 8 各向异性常数对频率梳的影响

Fig. 8. Influence of anisotropy constant on the frequency comb.

参考文献

- [1] Yao X L, Jin Z J, Wang Z Y, Zeng Z Z, Yan P 2023 *Phys. Rev. B* **108** 134427
- [2] Liang X, Cao Y S, Yan P, Zhou Y 2024 *Nano Lett.* **24** 6730
- [3] Wang Z Y, Yuan H Y, Cao Y S, Li Z X, Duine R A, Yan P 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 037202
- [4] Fortier T, Baumann E 2019 *Commun. Phys.* **2** 153
- [5] Chang L, Liu S T, Bowers J E 2022 *Nat. Photonics* **16** 95
- [6] Pasquazi A, Peccianti M, Razzari L, Moss D J, Coen S, Erkintalo M, Chembo Y K, Hansson T, Wabnitz S, Del'Haye P, Xue X, Weiner A M, Morandotti R 2018 *Phys. Rep.* **729** 1
- [7] Dutt A, Joshi C, Ji X, Cardenas J, Okawachi Y, Luke K, Gaeta A L, Lipson M 2018 *Sci. Adv.* **4** e1701858
- [8] Sun J, Shi S, Wang J 2022 *Adv. Eng. Mater.* **24** 2101245
- [9] Hula T, Schultheiss K, Gonçalves F J T, Körber L, Bejarano M, Copus M, Flacke L, Liensberger L, Buzdakov A, Kákay A, Weiler M, Camley R, Fassbender J, Schultheiss H 2022 *Appl. Phys. Lett.* **121** 112404
- [10] Yang X X, Li H T, Zhang X F, Ma X P, Shim J H, Jin Y J, Piao H G 2025 *Chin. Phys. B* **34** 107507
- [11] Liu Z X, Peng J, Xiong H 2023 *Phys. Rev. A* **107** 053708
- [12] Liu Y, Liu T T, Yang Q Q, Tian G, Hou Z P, Chen D Y, Fan Z, Zeng M, Lu X B, Gao X S, Qin M H, Liu J M 2024 *Phys. Rev. B* **109** 174412
- [13] Liu Z X 2024 *Appl. Phys. Lett.* **124** 032403
- [14] Xiong H 2023 *Fundam. Res.* **3** 8
- [15] Wang B, Lu X H, Jia X, Xiong H 2025 *Phys. Rev. A* **111** 063703
- [16] Haigh J A, Nunnenkamp A, Ramsay A J, Ferguson A J 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 133602
- [17] Zhang X, Zou C L, Jiang L, Tang H X 2016 *Sci. Adv.* **2** e1501286
- [18] Kellnberger S, Rosenthal A, Myklatun A, Westmeyer G G, Sergiadis G, Ntziachristos V 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 108103
- [19] Huang M X, Hu W B, Bai F M 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 158501 (in Chinese) [黄铭贤, 胡文彬, 白飞明 2024 物理学报 **73** 158501]
- [20] Chen C, Ma M Y, Pan F, Song C 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 058502 (in Chinese) [陈崇, 马铭远, 潘峰, 宋成 2024 物理学报 **73** 058502]
- [21] Xu G T, Shen Z, Zhang M, Wang Y, Wan S, Yang Y C, Zhang T C, Bi L, Sun F W, Guo G C, Dong C H 2025 *Phys. Rev. Lett.* **135** 203604
- [22] Vansteenkiste A, Leliaert J, Dvornik M, Helsen M, Garcia-Sanchez F, Van Waeyenberge B 2014 *AIP Adv.* **4** 107133
- [23] Jen S U, Yao Y D, Chen Y T, Wu J M, Lee C C, Tsai T L, Chang Y C 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 053701
- [24] Conca A, Papaioannou E T, Klingler S, Greser J, Sebastian T, Leven B, Lösch J, Hillebrands B 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 142402
- [25] Gokce Polat E, Deger C, Yildiz F 2019 *Curr. Appl. Phys.* **19** 614
- [26] Wedler G, Walz J, Greuer A, Koch R 2000 *Surf. Sci.* **454–456** 896
- [27] Gowtham P G, Stiehl G M, Ralph D C, Buhrman R A 2016 *Phys. Rev. B* **93** 024404
- [28] Kittel C 1958 *Phys. Rev.* **110** 836
- [29] Xu G T, Zhang M, Wang Y, Shen Z, Guo G C, Dong C H 2023 *Phys. Rev. Lett.* **131** 243601
- [30] Weiler M, Dreher L, Heeg C, Huebl H, Gross R, Brandt M S, Goennenwein S T B 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 117601
- [31] Lu Y W, Hu W B, Liu W, Bai F M 2020 *Chin. Phys. B* **29** 067504

SPECIAL TOPIC—Applied magnetism

Magnetic frequency comb excited by magnetoacoustic coupling in ferromagnetic films^{*}YANG Zhi^{1) #} LIU Changjiang^{2) #} YAO Yongzheng²⁾ ZHANG Yue^{2) †}¹⁾ (*City University of Wuhan, Wuhan 430074, China*)²⁾ (*School of Integrated Circuits, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

(Received 16 January 2026; revised manuscript received 26 May 2026)

Abstract

Magnetic frequency combs (MFCs), which consist of equally spaced spectral lines generated by nonlinear magnetization dynamics, are promising for precision frequency control, broadband signal processing, and on-chip magnonic devices. However, conventional MFCs generally require strong microwave pumping and bulky magnetic resonators, resulting in high power consumption, thermal perturbations, and limited integrability. Here, we propose a low-power route to MFC generation through nonlinear magnetoelastic coupling between a standing surface acoustic wave (SAW) and magnons in a ferromagnetic thin film. Micromagnetic simulations are performed for a $1000\text{ nm} \times 1000\text{ nm} \times 5\text{ nm}$ CoFeB film with absorbing boundary regions. The intrinsic response contains a single ferromagnetic-resonance peak near 8 GHz, consistent with the Kittel estimate of 7.86 GHz. When a longitudinal Rayleigh-type standing strain field is applied, the periodically modulated magnetoelastic effective field produces cascaded sidebands. Setting the magnetoelastic coefficients to zero eliminates the comb, confirming that magnetoelastic coupling is the essential generation mechanism.

The dependences of the comb on SAW strain amplitude, frequency, propagation direction, and magnetic anisotropy are systematically quantified. At a SAW frequency of 2 GHz and a strain amplitude of 2‰, a stable comb with a 2 GHz line spacing is obtained, demonstrating that the repetition frequency is directly set by the acoustic frequency. A clearly resolvable multi-line comb appears at a strain amplitude of approximately 0.1‰; below this observational threshold, only the fundamental acoustic mode and weak low-order mixing components remain. Sweeping the SAW frequency from 0.2 to 2 GHz continuously tunes the line spacing: a 0.2 GHz SAW produces a dense comb spanning about 3 GHz, intermediate frequencies of 0.8–1 GHz yield comparatively uniform line intensities, and a 2 GHz SAW extends the bandwidth beyond 30 GHz, although the high-order lines decay more rapidly. The comb intensity is strongly anisotropic because the magnetoelastic torque depends on the relative orientation of the equilibrium magnetization and SAW propagation direction. In addition, an intermediate uniaxial anisotropy constant of about $2.4 \times 10^4\text{ J/m}^3$ provides the best balance between coherent magnetic alignment and dynamic response; weaker anisotropy ($\leq 2 \times 10^4\text{ J/m}^3$) leads to nonuniform magnetization, whereas strong anisotropy ($> 5 \times 10^4\text{ J/m}^3$) suppresses the precession and reduces the number of comb lines. These findings identify SAW-driven periodic magnetoelastic modulation and nonlinear sideband cascading as the core physics of the MFC and establish an acoustically programmable, low-power, thin-film platform for tunable and highly integrated magnetoacoustic frequency-comb devices.

Keywords: magnetic frequency comb, surface acoustic wave, magnetoacoustic coupling, micromagnetic simulation

DOI: [10.7498/aps.75.20260087](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260087)CSTR: [32037.14.aps.75.20260087](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260087)

^{*} Project supported by the Preliminary Research Project of City University of Wuhan, China (Grant No. 2024CYYYJJ02), the Guiding Program of the Scientific Research Plan of Hubei Provincial Department of Education, China (Grant No. B2023431), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12574119).

[#] These authors contributed equally.

[†] Corresponding author. E-mail: yue-zhang@hust.edu.cn

基于磁性薄膜的磁声耦合频率梳

杨芝 刘长江 姚永正 张悦

Magnetic frequency comb excited by magnetoacoustic coupling in ferromagnetic films

YANG Zhi LIU Changjiang YAO Yongzheng ZHANG Yue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 150711 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260087

CSTR: 32037.14.aps.75.20260087

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260087>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

声表面波-自旋波耦合及磁声非互易性器件

Surface acoustic wave-spin wave coupling and magneto-acoustic nonreciprocal devices

物理学报. 2024, 73(15): 158501 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240462>

磁声耦合: 物理、材料与器件

Magneto-acoustic coupling: Physics, materials, and devices

物理学报. 2024, 73(5): 058502 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231908>

氟化镁微瓶腔光频梳光谱分析及优化

Analysis and optimization of optical frequency comb spectra of magnesium fluoride microbottle resonator

物理学报. 2024, 73(3): 034202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231126>

基于异步光学采样的电光频率梳时间抖动测量

Using asynchronous optical sampling to measure timing jitter of electro-optic frequency combs

物理学报. 2024, 73(14): 144203 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240400>

基于双频泵浦正常色散碳化硅微环谐振腔的光频率梳设计

Design of optical frequency comb based on dual frequency pumped normal dispersion silicon carbide microresonator

物理学报. 2024, 73(3): 034203 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231442>

高阶色散下双耦合微腔中克尔光频梳的稳定性和非线性动力学分析

Stability and non-linear dynamic analysis of Kerr optical frequencycombs in dual-coupled microcavities with high-order dispersion

物理学报. 2022, 71(18): 184204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220691>