

$Y_3Fe_5O_{12}$ -CoFeB自旋波定向耦合器中的自旋波

闫健 任志伟 钟智勇

Spin waves in  $Y_3Fe_5O_{12}$ -CoFeB spin-wave directional coupler

Yan Jian Ren Zhi-Wei Zhong Zhi-Yong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 187501 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210507

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210507>

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

太赫兹双芯反谐振光纤的设计及其耦合特性

Design and coupling characteristics of terahertz dual-core anti-resonant fiber

物理学报. 2020, 69(20): 208703 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200662>

飞秒激光直写光量子逻辑门

Femtosecond laser direct writing of optical quantum logic gates

物理学报. 2019, 68(10): 104205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190024>

核( $Nd_{0.7}, Ce_{0.3}$ ) $2Fe_{14}B$ -壳( $Nd_2Fe_{14}B$ )型磁体反磁化的微磁学模拟

Micromagnetic simulations of reversal magnetization in core ( $Nd_{0.7}, Ce_{0.3}$ ) $2Fe_{14}B$ -shell ( $Nd_2Fe_{14}B$ ) type

物理学报. 2020, 69(14): 147501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200435>

基于夹层结构的偏振无关 $1 \times 2$ 定向耦合型解复用器的设计

Design of polarization-insensitive  $1 \times 2$  directional coupler demultiplexer based on sandwiched structure

物理学报. 2021, 70(1): 014202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200721>

$Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG)/Pt异质结构中基于超快自旋塞贝克效应产生太赫兹相干辐射研究

Terahertz emission from  $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG)/Pt heterostructures via ultrafast spin Seebeck effect

物理学报. 2020, 69(20): 208704 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200733>

界面Dzyaloshinskii-Moriya相互作用下辐射状磁涡旋形成机制

Mechanism of magnetic radial vortex under effect of interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction

物理学报. 2018, 67(22): 228502 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181392>

# $Y_3Fe_5O_{12}$ -CoFeB 自旋波定向耦合器中的自旋波\*

闫健 任志伟 钟智勇†

(电子科技大学, 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 成都 610054)

(2021年3月16日收到; 2021年5月4日收到修改稿)

介绍了一种基于  $Y_3Fe_5O_{12}$  和 CoFeB 复合结构耦合的新型定向耦合器, 并利用微磁学仿真软件 Mumax<sup>3</sup> 及其配套工具链分析了自旋波在其中的传播特性. 通过在  $Y_3Fe_5O_{12}$  定向耦合器中添加一种高饱和和磁化强度材料 (CoFeB) 来增强耦合波导的耦合效率, 并从器件的尺寸形状、内部等效场以及耦合机理等角度分析了其变化原因. 结果表明, 相较于传统的定向耦合器, 这种复合结构能够极大地降低自旋波在耦合波导间的耦合长度. 从应用的角度看, 在功能相同的情况下, 整个器件的长度可以缩短数倍, 具有更好的发展前景.

**关键词:** 自旋波, 定向耦合器, 微磁学模拟, 耦合长度

**PACS:** 75.30.Ds, 75.30.Hx, 75.40.Gb, 75.78.Cd

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210507

## 1 引言

目前的主流计算系统依赖电荷来执行运算功能, 该框架中的基本电路元器件是晶体管<sup>[1,2]</sup>, 但是伴随着器件不断小型化<sup>[3,4]</sup>, 一方面集成电路受到物理极限等问题的制约而难以取得突破性进展<sup>[5]</sup>, 另一方面, 随着机器学习以及神经网络计算的研究愈发深入, 晶体管所提供的布尔运算也显得捉襟见肘<sup>[6,7]</sup>. 从长远发展的角度看, 新型的信息处理器件的诞生已成为一个必然的趋势<sup>[8-10]</sup>, 而自旋波器件在高速、低功耗、非布尔运算等领域展现的独特优势让其成为了众多新型器件的“突出者”<sup>[11]</sup>, 受到了广大研究者的青睐, 其中自旋波耦合器作为自旋波器件间的连接单元成为了研究热点<sup>[12-15]</sup>. Sun 和 Vittoria<sup>[16]</sup> 研究了自旋波在双层无限大薄膜间的耦合情况, 奠定了自旋波定向耦合器的产生以及后续发展. 随后 Friedrich 等<sup>[17]</sup> 提出了一种基于三维结构的定向耦合器设计, 从而加大了器件的灵敏度. 2015 年到 2017 年, Sadovnikov 等<sup>[18-21]</sup> 提出侧

边耦合结构, 并实验证实了两个耦合波导之间的耦合效率与磁化方向、形状和大小以及外部环境有关, 因此整个器件的参数选择需要权衡各个结构的尺寸形状以及材料的磁性参数. 近些年可重构自旋波定向耦合器的提出也让器件的使用更加灵活<sup>[22,23]</sup>, 能够在不改变结构参数的情况下只通过外加的激励条件改变定向耦合器的输出, 从而为逻辑计算提供了新的方法.

虽然目前所提出的纳米级自旋波定向耦合器的设计在非自旋波传播方向的两个维度上达到了纳米级别的尺寸, 但在传播方向上实现一个简单能量转换的功能都需要数微米, 这样的尺寸设计过于庞大以至于无法大规模集成<sup>[24,25]</sup>. 因此, 对自旋波定向耦合器的耦合效率的研究尤为重要, 这直接决定了器件的大小在同类型的器件中是否具有竞争力. 基于传统单种材料定向耦合器, 本文提出了一种  $Y_3Fe_5O_{12}$  (YIG, 钇铁石榴石铁氧体) 与 CoFeB 耦合型自旋波定向耦合器的模型, 通过增大自旋波的耦合效率来缩短器件的尺寸. 通过分析磁性结构内部有效场的分布探讨 CoFeB 给 YIG 波导带来的

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61734002) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zzy@uestc.edu.cn

变化, 研究偶极耦合作用和交换耦合作用在自旋波传播过程中的比重, 并对整个器件尺寸进行分析, 对耦合器在实际中的应用做出一般性的考量. 这些结果对自旋波器件的发展以及实用性的探索具有一定意义.

## 2 模型建立

基于 YIG-CoFeB 的耦合型自旋波定向耦合器如图 1 所示, 该耦合器采用了双波导侧边耦合模式, 其两条宽度为 100 nm, 厚度为 30 nm 的自旋波波导 (S1 和 S2) 平行放置, 间隙宽度为 30 nm, 上方的波导比下方的波导稍微长一些用来进行自旋波的注入, 微波天线放置在上方波导的最左侧位置, 使用目前已知的阻尼最小的磁性材料 YIG 作为自旋波的传播波导材料, 以减小自旋波在整个结构中因传播而发生的幅值损耗. 为了比较间隙层参数的影响, 研究了间隙层中添加 CoFeB 和不添加任何材料作为对比. 需要注意的是, 尽管由于耦合作用会使 CoFeB 中磁矩发生偏转, 但由于 YIG 的饱和磁化强度远小于 CoFeB 的饱和磁化强度, 所以 CoFeB 中的偏转强度远小于 YIG 中的值, 故自旋波在 CoFeB 中的耦合可以忽略. 整个结构沿  $+x$  方向磁化, 一旦磁化状态稳定, 由于  $x$  方向上的尺寸远大于其他两个方向上的尺寸, 形状各向异性会使得磁矩朝向一致, 故无需添加外磁场.

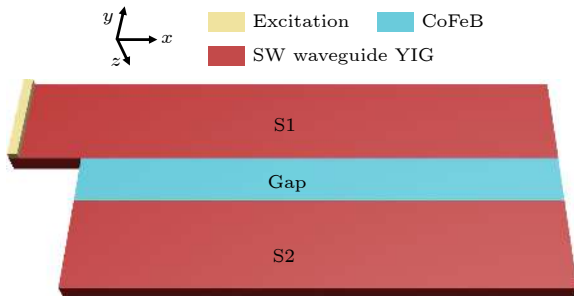


图 1 YIG-CoFeB 自旋波定向耦合器结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the structure of YIG-CoFeB spin wave directional coupler.

微波天线上施加小幅度正弦磁场用来产生局部微扰, 使用 Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程来描述结构内部磁矩的动态变化, 其具体形式如下:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma(\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}) + \frac{\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}), \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{M}$  为磁化强度,  $M_s$  为饱和磁化强度,  $\mathbf{H}_{\text{eff}}$  为内部有效场,  $\alpha$  为材料阻尼因子. 该方程描述的是磁矩在有效场  $\mathbf{H}_{\text{eff}}$  作用下的进动过程, 因此求解该方程的核心即为有效场分布的求解. 利用微磁学仿真软件 Mumax<sup>3</sup> 进行数值模拟计算时, 有效场的贡献来源主要是偶极作用产生的偶极能以及交换作用产生的交换能.

整个模型的参数如下所示: YIG<sup>[26]</sup> 的饱和磁化强度  $M_s = 140 \text{ kA/m}$ , 交换常数  $A_{\text{ex}} = 3.5 \times 10^{-12} \text{ J/m}$ , 阻尼系数  $\alpha = 0.0002$ ; CoFeB<sup>[27]</sup> 的  $M_s = 1150 \text{ kA/m}$ ,  $A_{\text{ex}} = 16 \times 10^{-12} \text{ J/m}$ ,  $\alpha = 0.005$ . 根据交换长度公式  $L_{\text{ex}} = \sqrt{2A_{\text{ex}}/(\mu_0 M_s^2)}$  可得 YIG 波导的交换长度约为 16.85 nm, 因此将网格大小设置为  $10 \text{ nm} \times 10 \text{ nm} \times 10 \text{ nm}$  可满足自旋波传播要求, 对于尺寸精度更细微的结构可以对网格结构再进行调整. 微带天线的宽度为 20 nm, 放置在整个结构的左侧, 可提供幅度为 1 mT、频率值为 2.88 GHz 的正弦磁场用以向结构中注入自旋波. 此外, 将波导的最后 50 nm 的阻尼常数设置为 0.5, 用来减少自旋波在端口处的反射.

## 3 YIG-CoFeB 定向耦合器中自旋波传播及色散关系

下面利用色散曲线表征定向耦合器的工作状态. 为了得到合理的数据, 需要在微波天线中施加 sinc 场, 其形式为

$$h_y(t) = h_0 \frac{\sin[2\pi f_c(t - t_0)]}{2\pi f_c(t - t_0)}. \quad (2)$$

微波场的方向为  $y$  方向, 幅值  $h_0 = 0.001 \text{ mT}$ , 截止频率  $f_c = 20 \text{ GHz}$ ,  $t_0 = 50 \text{ ps}$ . 图 2(a) 为该 sinc 场在频域下的曲线图, 在 sinc 场的作用下可以产生 0—10 GHz 的等幅磁场, 可以作为色散曲线的激励场. 通过计算得到 YIG 单波导的色散关系如图 2(b) 所示, 这是该种结构下的最低宽度模式的自旋波的色散曲线.

之后仿真模拟并计算了间隙为 Air (YIG/Air/YIG 结构) 和 CoFeB (YIG/CoFeB/YIG 结构) 的双 YIG 波导的色散曲线, 如图 3 所示, 可以发现色散曲线发生了劈裂, 由原先的最低宽度模式分裂为两种集体模式: 对称模式和反对称模式 (对应 S 和 AS, 参见图 3(a)), 从而使得两种自旋波模式在每个单个波导中同时被激发, 在同一频率的激励下

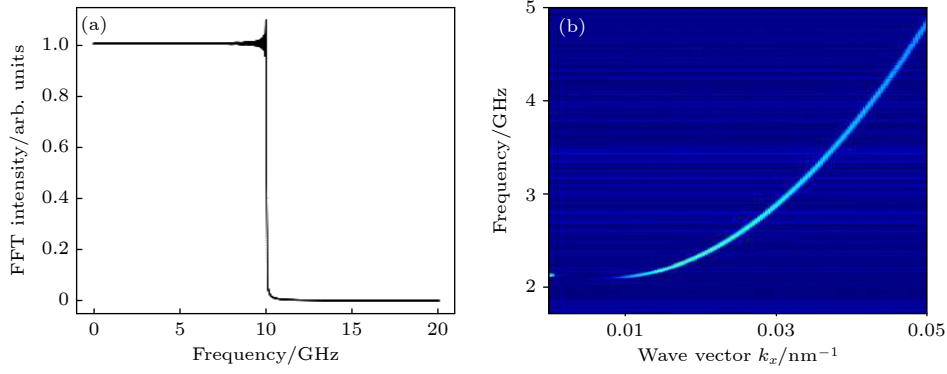


图 2 (a) 色散曲线求解中激励场在频域下的显示; (b) 孤立 YIG 波导中的色散曲线

Fig. 2. (a) Display of the excitation field in the frequency domain in the solution of the dispersion curve; (b) dispersion curve of isolated YIG waveguide.

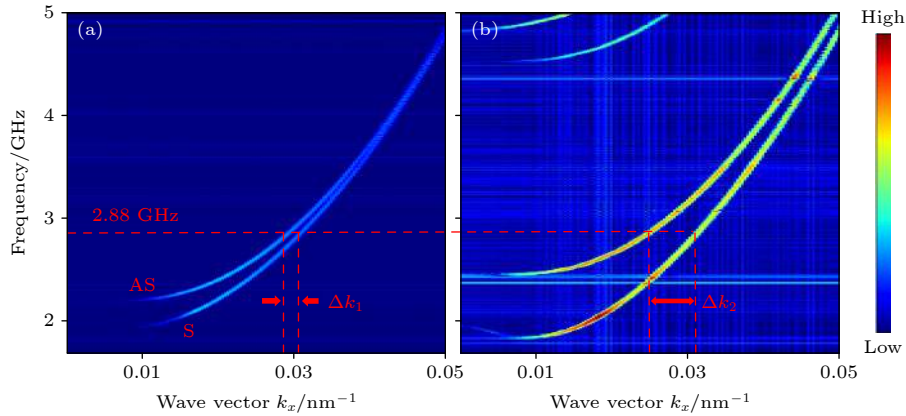


图 3 间隙处分别填充 (a) Air 和 (b) CoFeB 情况下的自旋波色散图

Fig. 3. Spin wave dispersion curve when the gap is filled with (a) Air and (b) CoFeB.

具有不同的波数, 因此自旋波能量在两个波导之间周期性地传输和分配. 图 3 和图 3(b) 分别表示在间隙层中填充有空气和 CoFeB 的定向耦合器中的自旋波色散关系, 可以很清楚地看到在 CoFeB 填充结构下 S 态和 AS 态的间隔要大得多. 在 2.5—5 GHz 下的自旋波可以有效地进行传播, 为了便于观察出两种结构下自旋波耦合长度的变化, 在 2.88 GHz 的频点上激励自旋波 (图 3(a) 和图 3(b) 中红线处的  $\Delta k_1$  和  $\Delta k_2$  代表两种情况下的波数差), 可以清楚地看到后者比前者大, 约为前者的 4 倍.

将自旋波的能量从一个波导完全传播到另一个波导所需的距离定义为耦合长度, 其值如下:

$$L = \pi / |k_s - k_{as}|, \quad (3)$$

其中  $k_s$  和  $k_{as}$  分别表示相同频率下 S 态和 AS 态模式下自旋波的波数. 根据 (3) 式, 添加 CoFeB 后结构的耦合长度会减小到 1/4, 这是一个相对较大的值, 意味着在执行相同功能的前提下尺寸减少了 3/4.

自旋波在每个波导中的传播方向上的能量可

以表示为

$$\begin{aligned} P_1(y) &= P_{in} \cos^2(\pi L(y)/(2L)), \\ P_2(y) &= P_{in} \sin^2(\pi L(y)/(2L)), \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $P_1$  为波导 S1 中左侧的输入能量,  $L(y)$  是指耦合的波导之间相互作用的长度. 从图 4(a) 可以看出, 在填充 CoFeB 的耦合结构中, 能量完全转换要大约 500 nm 的距离, 而这个值在填充空气的结构中是 2000 nm 左右. 此外, 为了更直观地说明这一情况, 通过微带天线激励了 2.88 GHz 下的自旋波 (图 4(b)). 红色和蓝色像素代表自旋波的幅度, 颜色越深, 幅度就越强, 这反映了两种结构下能量的耦合过程. 其中的  $L_1$  和  $L_2$  分别表示间隙为 Air 以及 CoFeB 的定向耦合器下的耦合长度, 可以很直观地观察到,  $L_1 \approx 4L_2$ . 因此, 耦合长度对于自旋波器件的设计来说是一个关键参数, 它影响着整个器件的大小以及最高使用频率限制.

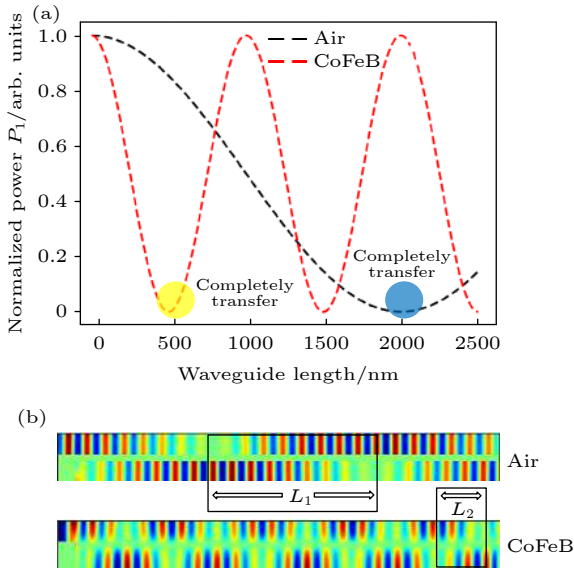


图 4 (a) 定向耦合器的输出随着波导长度变化的关系图; (b) 2.88 GHz 下间隙处填充 Air 和 CoFeB 的定向耦合器工作过程中自旋波传播彩图

Fig. 4. (a) Relationship between the output of the directional coupler and the length of the waveguide; (b) color image of spin wave propagation during operation of the directional coupler filled with Air and CoFeB in the gap at 2.88 GHz.

#### 4 内部等效场及参数分析

从图 4(b) 可以发现,除了耦合长度的改变之外,自旋波在  $y$  轴方向上的振幅也发生了改变,在间隙为空气的定向耦合器中,自旋波在宽度方向上振幅几乎不发生变化,而在间隙为 CoFeB 的结构中,宽度方向上的自旋波振幅发生了明显的衰减,越靠近 CoFeB 的地方,自旋波的振幅越低.为了解释这一现象,绘制了两种不同定向耦合器的内部有效场分布,如图 5 所示,橙色数据表表示 YIG/Air/YIG 结构,蓝色线代表 YIG/CoFeB/YIG 结构.从图 5 可以发现,中心区域有效场要大得多,这是由于 CoFeB<sup>[1]</sup> 的饱和磁化强度较高(几乎是 YIG<sup>[2]</sup> 的 8 倍),波导区域离 CoFeB 区域越近,有效场也越大,这使得在 YIG 波导上对称的内部场分布变成非对称状态.在不考虑各向异性、塞曼能、热能和少量贡献能的情况下,整个系统的能量可分为偶极相互作用能和交换相互作用能.图 5 插图给出了两种结构下的能量大小,通过添加 CoFeB,发现能量增加了数十倍,这意味着交换和偶极相互作用大大增强.因此,可以认为自旋波在两个耦合的条带上转换更为频繁.

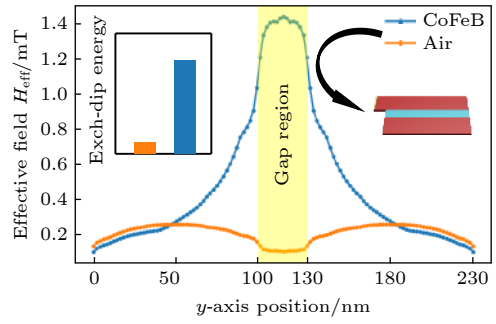


图 5 间隙处填充 Air 和 CoFeB 的定向耦合器中内部有效场分布

Fig. 5. Internal effective field distribution in the directional coupler filled with Air and CoFeB at the gap.

为了表征交换耦合和偶极耦合在 YIG-CoFeB 定向耦合器中的作用情况,可以通过改变 CoFeB 层的宽度来作仿真对比.根据之前的介绍, YIG 波导的交换长度约为 16.85 nm,当结构间距离大于这个值时,交换耦合作用几乎可以忽略,假定此时只有偶极耦合作用.图 6(a) 是间隙层宽度为 30, 40, 50 nm 时,不同 CoFeB 宽度下的耦合长度值, CoFeB 被放置在两条波导的中心,间隙层中未

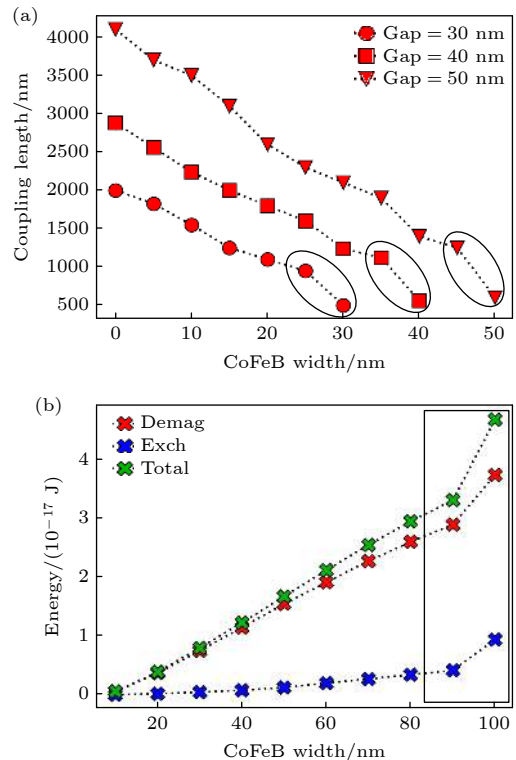


图 6 (a) 耦合长度随 CoFeB 宽度的变化; (b) 不同 CoFeB 宽度下器件的内部能量值

Fig. 6. (a) Coupling length varies with the width of CoFeB; (b) the internal energy value of the device under different CoFeB widths.

填充 CoFeB 的区域为空气. 当 CoFeB 的宽度较小时, 其与 YIG 波导间的间隔较远, 这时耦合作用主要由偶极耦合作用主导, 在这种情况下, 随着 CoFeB 宽度的增加, 耦合长度相对线性地减少. 随着 CoFeB 宽度进一步增加, YIG 和 CoFeB 间的交换耦合作用逐渐增强, 这时耦合作用包括偶极耦合和交换耦合, 从图 6(a) 可以发现, 当 CoFeB 快要填满间隙层时, 曲线的斜率变大 (黑色圆形框). 图 6(b) 给出了间隙层宽度为 100 nm 时, 不同 CoFeB 宽度下 YIG 波导 S1, CoFeB 间隙层以及 YIG 波导 S2 间的耦合能量值, 从图 6(b) 可以发现, 当 CoFeB 的宽度较小时, 交换能值较小, 系统的总能量主要由偶极能提供, 但当 CoFeB 宽度较大时, 交换能也随之增大, 并且当 CoFeB 填满间隙层时曲线斜率变大 (黑色方框), 与耦合长度的关系相对应. 因此, 可以说明交换作用和偶极作用效果一致, 都会使得耦合长度减小, 但是主要的贡献来源还是后者.

图 7 呈现了耦合长度  $L$  与波导几何参数的关系. 通过分析图 7 可以总结出减小耦合长度的方式: 减小波导宽度、增大波导厚度、减小间隙宽度、增大外磁场强度 ( $x$  方向). 这些方式来源于波导

内部的耦合作用以及波导间耦合作用的竞争. 一般来说, 当波导内部的耦合强度远大于波导间的耦合强度时, 才会导致自旋波在两条波导上传播需要一定的距离, 但是当波导间的耦合作用增强时, 则会减小这个距离, 通过分析仿真数据得到 1 个唯象公式来反映波导中耦合长度与耦合强度的关系:

$$L = \frac{L_{\text{in}}}{I_{\text{between}}} L_0, \quad (5)$$

其中,  $L_{\text{in}}$  为波导内部自旋波耦合作用强度,  $I_{\text{between}}$  为波导间耦合作用强度,  $L_0$  为一般性耦合长度 (只在形式上有意义, 主要与波导的材料有关). 通过 (5) 式能够发现, 可以通过改变  $L_{\text{in}}$  和  $I_{\text{between}}$  来改变耦合长度, 虽然上述的情况都会使得耦合长度发生改变, 但作用机理却不同. 图 7(a) 所示的减小 YIG 的波导宽度主要是增大波导内的耦合作用, 而波导间的耦合作用几乎不发生改变, 所以耦合长度减小; 图 7(c) 所示的改变间隙宽度主要是增大波导内的耦合作用, 而每个波导内部的耦合作用几乎不发生改变, 所以耦合长度减小; 图 7(b) 所示的增大结构厚度既增大波导内的耦合作用, 又增大波导间的耦合作用, 但当厚度增加到一定程度时 (本结构中为 30 nm 左右), 两种耦合作用的增大趋于饱和,

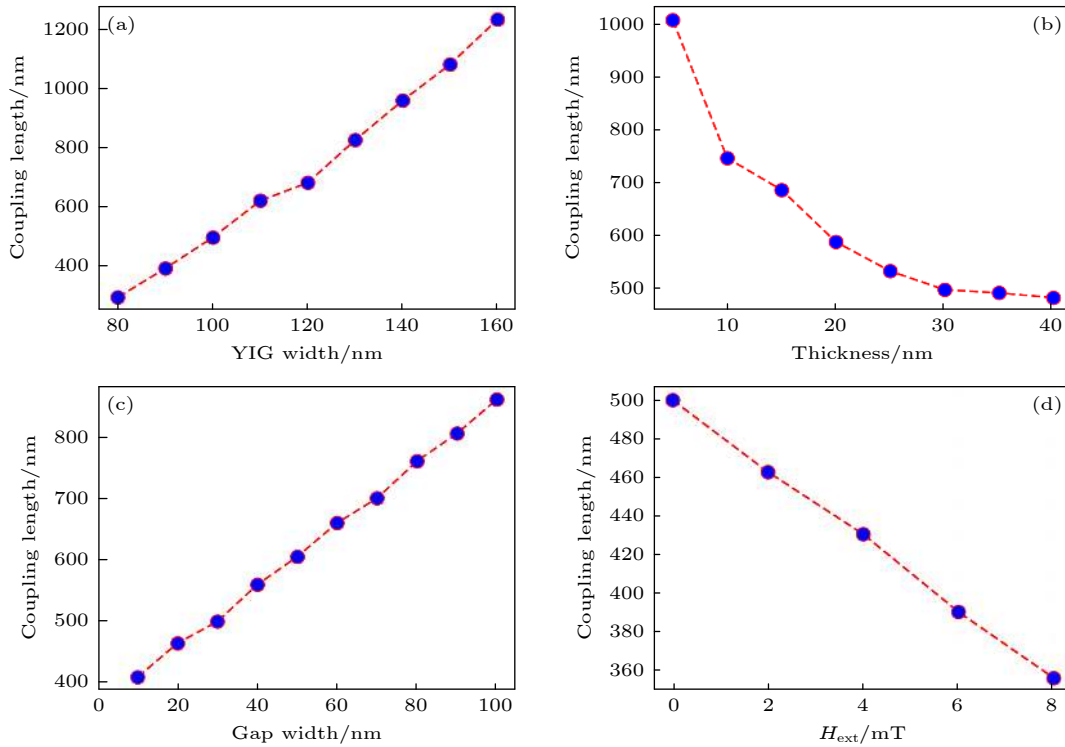


图 7 耦合长度随着 (a) YIG 波导宽度、(b) 波导厚度、(c) 间隙宽度和 (d) 外磁场的变化

Fig. 7. Coupling length varies with (a) YIG waveguide width, (b) waveguide thickness, (c) gap width, and (d) external magnetic field.

则耦合长度也会趋于饱和;而图 7(d) 所示有效场的增加导致自旋波波数的减小,也会使得波导内部的耦合强度减小。

出于器件在实际应用中的考虑,需要计算不同频率下定向耦合器的耦合长度,因为一旦确定了材料尺寸参数和自旋波类型,相应的功能特性也就固定了,然后可以根据所需功能简单地选择参数。对于本结构下最低阶模式的自旋波激励,可从频率 2.5 GHz 至 4.5 GHz 的范围内观察到相对明显的模式分离,而不会受到高阶模式的干扰。图 8 中,红线表示 YIG /Air/ YIG 结构,蓝线表示 YIG/CoFeB/YIG 结构,可以看出定向耦合器的耦合长度随着频率的增加而增加。通过用 CoFeB 层代替空气层,线性的变化也增加了,因此该结构具备了更好的调控性。

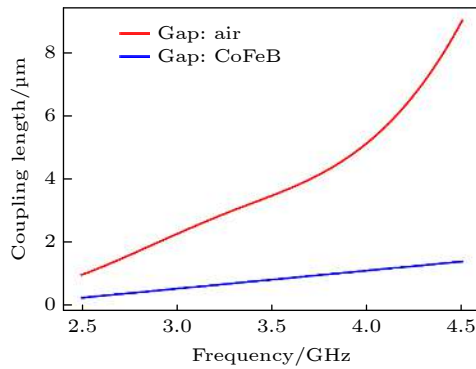


图 8 不同频率下定向耦合器的耦合长度

Fig. 8. Coupling length of directional coupler at different frequencies.

## 5 结 论

通过上述微磁学的仿真结果以及数据分析,发现定向耦合器的间隙是影响其工作效率的一个主要因素。基于 YIG 自旋波定向耦合器结构,本文提出了一种 YIG-CoFeB 的复合耦合型结构,在该结构中,自旋波在两条耦合波导上的耦合效率得到了极大的提高,耦合长度降低,由原来的 2000 nm 降低为 500 nm,因此在实现同样功能的前提下,整个器件的尺寸会减小数倍。本文还通过数值模拟揭示了该种耦合效率提高的机制,发现 CoFeB 的存在使磁性结构内部有效场增大,直接导致了自旋波在其中色散关系的变化,进一步研究发现偶极耦合作用的提高是耦合效率提升的根本性原因。最后研究了整个结构的尺寸参数和自旋波频率的影响,为器

件在实际应用中参数的考量奠定了基础。所有的这些结果为自旋波定向耦合器的发展和应用提供了重要的思路和方法。

## 参考文献

- [1] Theis T N, Wong H S P 2017 *Comput. Sci. Eng.* **19** 41
- [2] Sun H, Guo X, Facchetti A 2020 *Chem* **6** 1310
- [3] Zasedatelev A V, Baranikov A V, Urbonas D, et al. 2019 *Nat. Photonics* **13** 378
- [4] Toriumi A, Nishimura T 2018 *Jpn. J. Appl. Phys.* **57** 010101
- [5] Haensch W, Nowak E J, Dennard R H, et al. 2006 *IBM J. Res. Dev.* **50** 339
- [6] Zhao X, Wang Z, Gao L, Li Y, Wang S 2021 *Tsinghua Sci. Technol.* **26** 536
- [7] Wang W, Chen J, Wang J, Chen J, Liu J, Gong Z 2020 *IEEE Trans. Ind. Inform.* **16** 6124
- [8] Ozawa T, Price H M, Amo A, et al. 2019 *Rev. Mod. Phys.* **91** 015006
- [9] Wang J, Sciarrino F, Laing A, Thompson M G 2020 *Nat. Photonics* **14** 273
- [10] Tokura Y, Yasuda K, Tsukazaki A 2019 *Nat. Rev. Phys.* **1** 126
- [11] Manchon A, Zelezny J, Miron I M, et al. 2019 *Rev. Mod. Phys.* **91** 035004
- [12] Mahmoud A N, Vanderveken F, Adelman C, Ciubotaru F, Cotofana S, Hamdioui S 2021 *IEEE Trans. Circuits Syst. I-Regul. Pap.* **68** 536
- [13] Petti D 2020 *Nat. Electron.* **3** 736
- [14] Wang Q, Kewenig M, Schneider M, et al. 2020 *Nat. Electron.* **3** 765
- [15] Feng F, Wei S B, Li L, Min C J, Yuan X C, Somekh M 2019 *Opt. Express* **27** 27536
- [16] Sun K, Vittoria C 1991 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **39** 339
- [17] Friedrich L, Dannberg P, Wachter C, Hennig T, Brauer A, Karthe W 1997 *Opt. Commun.* **137** 239
- [18] Sadovnikov A V, Beginin E N, Sheshukova S E, Romanenko D V, Sharaevskii Y P, Nikitov S A 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 202405
- [19] Sadovnikov A V, Grachev A A, Odintsov S A, Sheshukova S E, Sharaevskii Y P, Nikitov S A 2017 *IEEE Magn. Lett.* **8** 3109904
- [20] Sadovnikov A V, Grachev A A, Beginin E N, Sheshukova S E, Sharaevskii Y P, Nikitov S A 2017 *Phys. Rev. Appl.* **7** 014013
- [21] Sadovnikov A V, Odintsov S A, Beginin E N, Sheshukova S E, Sharaevskii Y P, Nikitov S A 2017 *IEEE Trans. Magn.* **53** 2801804
- [22] Ren Z, Liu S, Jin L, Wen T, Liao Y, Tang X, Zhang H, Zhong Z 2019 *Sci. Rep.* **9** 7093
- [23] Wang Q, Pirro P, Verba R, Slavin A, Hillebrands B, Chumak A V 2018 *Sci. Adv.* **4** e1701517
- [24] Balashov T, Buczek P, Sandratskii L, Ernst A, Wulfhekel W 2014 *J. Phys. Condens. Matter* **26** 394007
- [25] Mahmoud A, Ciubotaru F, Vanderveken F, et al. 2020 *J. Appl. Phys.* **128** 161101
- [26] Liu L, Pai C F, Li Y, Tseng H W, Ralph D C, Buhrman R A 2012 *Science* **336** 555
- [27] Qin H, Both G J, Hamalainen S J, Yao L, van Dijken S 2018 *Nat. Commun.* **9** 5445

# Spin waves in $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ -CoFeB spin-wave directional coupler\*

Yan Jian   Ren Zhi-Wei   Zhong Zhi-Yong<sup>†</sup>

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

( Received 16 March 2021; revised manuscript received 4 May 2021 )

## Abstract

The spin-wave coupling device is used as a connection unit to solve the connection problem between spin-wave devices. However, the current size is too large in comparison with the nano-scale process, which is caused by the low efficiency of the spin wave within it. Therefore, we propose the spin-wave directional coupler based on  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ -CoFeB coupling which can improve the current dilemma to a certain extent. By filling the gap layer of two spin-wave waveguides ( $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ) placed in parallel with CoFeB material, it is found that the dispersion relationship of the spin wave changes in the data calculation of the micromagnetic simulation software Mumax<sup>3</sup>. The existence of CoFeB makes the transmission efficiency of the spin wave between the two waveguides higher than in the case without any filling, the enhancement effect is about 4 times where coupling length is reduced from the original 2000 nm to 500 nm, which is conducive to the miniaturization and integration of the spin-wave directional coupler design. From the perspective of the entire device, further analysis indicates that owing to the high saturation magnetization of CoFeB (approximately 8 times that of  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ), the effective field in the  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ -CoFeB directional coupler is greatly enhanced, which leads the spin wave dispersion curve in the waveguide to change. At the same time, the energy of the entire system also increases several times, which is mainly caused by the increase of dipole energy and exchange energy. Then a greater contribution of dipole energy is obtained by changing the size of the device. After that, we study the relationship between the coupling length and the device size and the external magnetic field, then draw a general rule which can play a role in designing any directional couplers with similar structures. Finally, our view points are given from the different spin wave excitation frequencies, gap layer filling materials, internal roughness of the directional coupler, and spin wave lifetime by considering the problems that may occur in practical applications with the  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ -CoFeB directional coupler. In conclusion, our proposed  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ -CoFeB directional coupler structure can effectively enhance the coupling efficiency, and it can also provide a new idea for the application of the interaction between composite materials.

**Keywords:** spin wave, directional coupler, micromagnetic simulation, coupling length

**PACS:** 75.30.Ds, 75.30.Hx, 75.40.Gb, 75.78.Cd

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210507

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61734002).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [zzy@uestc.edu.cn](mailto:zzy@uestc.edu.cn)