

# 基于单向表面磁等离子体激元的磁场调控漏波天线

姜 涛\*, 梁华杰, 邹 林

(电子科技大学长三角研究院(湖州), 浙江湖州 313001)

**摘 要:** 漏波天线(Leaky-Wave Antennas, LWAs)由于其波束扫描能力在通信和雷达领域具有广泛的应用。但传统漏波天线普遍存在缺陷,其一,波束扫描多依赖频率调控,难以适配固定频段的应用场景,其二,为实现扫描功能常需引入周期性结构,易引发开阻带现象。本文基于单向表面磁等离子体激元(Surface MagnetoPlasmons, SMPs)的独特物理特性,提出并系统研究一类新型漏波天线。通过理论推导与数值模拟相结合的方法,全面揭示了由旋磁材料层与介质层构成的导波结构中所有可行模式的色散特性、辐射性能及动态调控机制。研究表明所提出的导波结构具有本征单向传输特性的单向SMPs模式,该SMPs传输模式具有免疫背向散射的非互易传输特性,且可以通过调节偏置磁场强度来控制SMPs模式的控制频率,是实现高性能漏波天线的理想载体,为高性能波束扫描器件的设计提供了理论支撑与技术方案。在数值模拟中,采用有限宽度梯度调控的旋磁铁氧体构建SMPs波导,在SMPs波导结构开放表面获得均匀的场分布,该设计可获得理想的远场辐射方向图,并且辐射效率可调控至任意期望值,在本研究案例中的优化结构辐射效率可达95%以上。此外,通过调节外部磁偏置,可实现单向SMPs模式动态调控和色散曲线偏移,直接实现对漏波天线扫描角度的磁场控制,在固定频率下,实现 $\pm 60^\circ$ 以上的波束扫描范围。与传统漏波天线相比,这种基于SMPs的设计具有显著优势,可在固定频率下实现波束扫描而无需依赖频率调控,且避免了传统设计中由于引入周期性结构导致的开阻带。这些特性使基于SMPs的漏波天线成为辐射与波束扫描应用的潜在解决方案,有效突破了传统波束扫描天线的性能瓶颈,兼具固定频率扫描、宽频稳定、高效辐射及灵活调控等核心优势,在微波、太赫兹等频段的高精度波束控制、高效辐射系统中具有广阔应用前景。

**关键词:** 表面磁等离子体激元(SMPs);漏波天线(LWAs);旋磁性;铁氧体;非互易性

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.62471100)

**中图分类号:** TN822.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2026)03-1328-09

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20251004

## Magnetic Field-Controlled Leaky-Wave Antennas Based on One-Way Surface Magnetoplasmons

JIANG Tao\*, LIANG Huajie, ZOU Lin

(Yangtze Delta Region Institute (Huzhou), University of Electronic Science and Technology of China, Huzhou, Zhejiang 313001, China)

**Abstract:** Leaky-wave antennas (LWAs) have been widely applied in communication and radar systems due to their inherent beam-scanning capability. However, conventional leaky-wave antennas suffer from two critical drawbacks: first, their beam scanning mostly relies on frequency tuning, which makes them incompatible with applications requiring fixed frequency bands; second, periodic structures are often introduced to achieve the scanning function, which tends to induce the phenomenon of open stopbands. In this paper, we propose and systematically investigate a novel class of LWAs, based on the unique physics of one-way surfacemagnetoplasmons (SMPs). We conduct a comprehensive theoretical analysis and numerical simulations to unravel the dispersion characteristics of all viable modes in the proposed structure that comprises gyromagnetic and dielectric layers. This analysis reveals that one-way SMPs modes, endowed with intrinsic unidirectional-transmission immune to backscattering, serve as ideal candidates for enabling high-performance LWAs. In numerical simulations, we implement SMPs waveguides using gyromagnetic ferrite with both finite and gradient-controlled widths. This design yields ideal far-field radiation patterns, characterized by uniform field distributions along the SMPs' open surface. The radiation efficiency can be tailored to any desired value, reaching upwards of 95% in our optimized configuration. Further, the one-way SMPs mode is dynamically tunable via external magnetic bias: adjusting this bias shifts the SMPs dispersion curve, directly enabling magnetic control over the LWAs' scanning angle. Compared to conventional LWAs, this SMPs-based design offers evident advantages, such as it achieves beam steering at a fixed frequency and eliminates the need for fre-

quency-dependent tuning, and avoids open stop bands induced by periodic structures intraditional designs, a beam scanning range of more than  $\pm 60^\circ$  is achieved in simulations. These attributes make SMPs-based LWAs as a promising solution for advanced radiation and beam-steering applications, with excellent advantages such as fixed-frequency scanning, broadband stability, high-efficiency radiation, and flexible regulation. It boasts broad application prospects in high-precision beam control and high-efficiency radiation systems.

**Keywords:** surface magnetoplasmons (SMPs); leaky-wave antennas (LWAs); gyromagnetism; ferrite; nonreciprocity  
**Foundation Item(s):** National Natural Science Foundation of China (No.62471100)

## 0 引言

漏波天线 (Leaky-Wave Antennas, LWAs) 是一类可使部分电磁能量泄漏到自由空间的行波天线<sup>[1]</sup>, 凭借低剖面、高增益、频率可调波束扫描等优点<sup>[2-6]</sup>, 在通信、雷达等领域获得广泛的研究关注。相较于传统相控阵天线, LWAs 具有成本低、结构设计简化、带宽宽等优势<sup>[7-13]</sup>。

传统上, LWAs 的实现方式通常是在导波传输线中引入周期性扰动来实现, 通过这类扰动对电磁波的传输与泄漏过程进行调控<sup>[14-15]</sup>。尽管以往研究已取得显著进展, 但 LWAs 仍存在若干亟待解决的缺点与局限。例如, 周期性结构引发的阻抗失配会导致开阻带, 造成端射频率附近的辐射增益性能大幅恶化<sup>[16]</sup>; 同时, 依靠扫频实现波束扫描的特性与主流通信系统不兼容, 极大限制了其应用范围。

本文基于拓扑电磁学概念<sup>[17-19]</sup>, 提出一种具有连续开放缝隙的非互易传输波导方案, 该波导支持单向传输模式<sup>[20-25]</sup>, 具有免疫后向散射的特性。在各种实现单向传输方案中, 基于表面磁等离子体激元 (Surface MagnetoPlasmons, SMPs) 的方案因机制稳健、结构简单, 且蕴含非互易材料与拓扑材料的丰富物理特性<sup>[26-35]</sup>, 展现出极高的研究价值与应用潜力。

在 SMPs 波导结构中, 波导带隙内存在单向 SMPs 导波模式。该 SMPs 模式的波数随频率单调递增, 且在特定频段内, 其波数处于自由空间光锥范围内, 这一特性使得电磁波能从波导泄漏到开放空间。此外, 该结构无需任何周期性设计, 可有效避免开阻带导致的辐射方向图恶化问题。同时, 通过调节外加直流偏置磁场, 能够调控该结构中 SMPs 模式的工作频率, 进而实现固定频率下基于直流磁场的波束扫描。本文通过深入研究 SMPs 结构参数与辐射效率的关系, 基于 SMPs 结构设计的天线实现了高效辐射与宽范围波束扫描, 与传统漏波天线相比, 大幅提升了天线性能与应用前景。

## 1 单向表面磁等离子体激元模式

### 1.1 半无限空间表面磁等离子体激元波导

SMPs 波导的示意图如图 1 所示。该模型由一层

端接理想电边界的介质层与半无限旋磁介质空间组成。其中, 介质层的相对介电常数为  $\epsilon_r$ , 厚度为  $d$ 。当沿  $z$  方向施加外部静态磁场 ( $H_0$ ) 时, 半无限旋磁介质的相对介电常数为  $\epsilon_m$ , 磁导率张量  $\boldsymbol{\mu}_m$  可表示为

$$\boldsymbol{\mu}_m = \begin{bmatrix} \mu_1 & -i\mu_2 & 0 \\ i\mu_2 & \mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $\mu_1 = 1 + \omega_m \omega_0 / (\omega_0^2 - \omega^2)$ ,  $\mu_2 = \omega \omega_m / (\omega_0^2 - \omega^2)$ ,  $\mu_3 = 1$ ,  $\omega_0 = \gamma \mu_0 |H_0|$  为进动频率,  $\omega_m = \gamma \mu_0 M_s$  为旋磁频率, 符合旋磁理论中的传统定义,  $\gamma$  为旋磁比,  $M_s$  为饱和磁化强度。考虑横电 (Transverse-Electric, TE) 极化波模式, 旋磁介质内存在体波模式, 即该模式场分布存在于整个介质空间, 该模式的色散关系为  $k = \sqrt{\epsilon_m \mu_v} k_0$ 。式中,  $k$  为波数,  $\mu_v = \mu_1 - \mu_2^2 / \mu_1$  (定义为 Voigt 磁导率),  $k_0 = \omega / c$  为真空波数 ( $\omega$  为角频率,  $c$  为真空中光速)。由上述色散关系可知, 当  $\mu_v < 0$  时存在带隙, 其频率范围为  $\sqrt{\omega_0(\omega_0 + \omega_m)}$  到  $(\omega_0 + \omega_m)$ 。



图 1 基于半无限旋磁介质单向表面磁等离子体激元(SMPs)的示意图模型

Figure 1 Schematic model of one-way SMPs with semi-infinite gyromagnetic medium

所研究系统中 SMPs 模式的存在与旋磁介质的带隙密切相关。考虑沿旋磁介质与介质层界面 ( $x=0$  处) 传输的 SMPs 模式, 系统内的场呈 TE 极化, 其在介质层内 (式 (2)) 和旋磁材料中 (式 (3)) 的非零电场分量  $E_z$  可分别表示为

$$E_z = [A_1 \exp(-\alpha_d y) + A_2 \exp(\alpha_d y)] \exp(ikx) \quad (2)$$

$$E_z = B \exp(\alpha_m y) \exp(ikx) \quad (3)$$

在本文所提模型的带隙内,旋磁介质与介质层界面处存在 SMPs 模式,其色散关系可通过边界条件推导得到,具体表达式为

$$\alpha_d \mu_v + \left( \alpha_m + \frac{\mu_2}{\mu_1} k \right) \tanh(\alpha_d d) = 0 \quad (4)$$

取典型材料参数,  $\omega_0 = 1/4\omega_m$ ,  $\varepsilon_m = 15$ ,  $\varepsilon_r = 1$ , 通过计算所提模型中所有可能模式的色散曲线,在计算过程中,介质层厚度  $d$  设为  $0.06\lambda_m$ ,  $\lambda_m$  为  $2\pi c/\omega_m$ 。基于 MATLAB 对式(4)进行数值计算并得到相应的色散曲线,如图 2 所示,红色实线表示位于旋磁介质带隙内的 SMPs 模式,黑色虚线代表自由空间光线,绿色阴影区域表示旋磁介质中的体波模式区域。由图可见, SMPs 模式的色散曲线单调递增且连续经过原点,旋磁介质带隙内无常规模式存在。此外,浅黄色阴影区域标注了单向频段,深黄色阴影区域表示光锥范围内的泄漏频段。图 2 中的结果分别以  $\omega_m$  和  $k_m = \omega_m \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$  进行归一化。

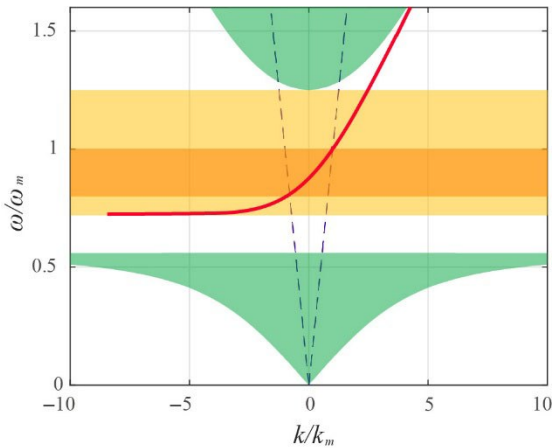


图 2 半无限旋磁介质中 SMPs 模式(红色实线)和体波模式(绿色阴影区域)的归一化色散关系

Figure 2 Dispersion relations of SMPs (solid red line) and bulk mode (green shaded area) for semi-infinite gyromagnetic medium

进一步研究发现,通过调节由外部磁偏置决定的参数  $\omega_0$  (满足  $\omega_0 = \gamma\mu_0 |H_0|$ ),可使色散曲线沿频率轴偏移。具体情况如图 3 所示,在  $\omega_0 = 1/2\omega_m$ ,  $1/4\omega_m$  和  $1/8\omega_m$  下的色散曲线逐渐降低。

为验证所提理论的正确性,对单向 SMPs 波导(如图 4 所示)进行了仿真与实测。该 SMPs 波导由铁氧体片构成,垂直放置于电磁铁的两个磁极之间(电磁铁可产生均匀静态磁场,通过调节外加电压源,磁场强度可在 100 Oe~10 000 Oe 范围内调控)。实验中所用铁氧体片宽度有限,但宽度尺寸足够大以近似无限半空间(因电磁波沿宽度方向衰减迅速)。对图 4(b)

中的实验结果分析可知,正向传输电磁波可通过 SMPs 模式传导,而反向电磁波被带隙结构抑制。同时,调节偏置磁场(从 200 Oe 增加到 400 Oe)可使正向 SMPs 传输频段向高频段偏移。此外,仿真电场分布(图 4(c))进一步证明,正向导波模式对应沿铁氧体与介质层界面传输的 SMPs 模式,且该模式仅以单向形式存在。SMPs 模式的电磁场为表面波,该模式的电磁场束缚在两层介质界面附近,并沿旋磁介质的  $y$  方向衰减。当半无限旋磁介质被截断为有限宽度的旋磁层时,若有限旋磁层外边界处的切向( $x$  方向)波数小于真空波数  $k_0$  (如图 2 中深黄色阴影频段所示),则沿  $y$  方向的倏逝波可能转化为向自由空间传输的行波。因此,该结构可用于漏波天线设计,且该波导为连续结构,无需引入任何周期性扰动。

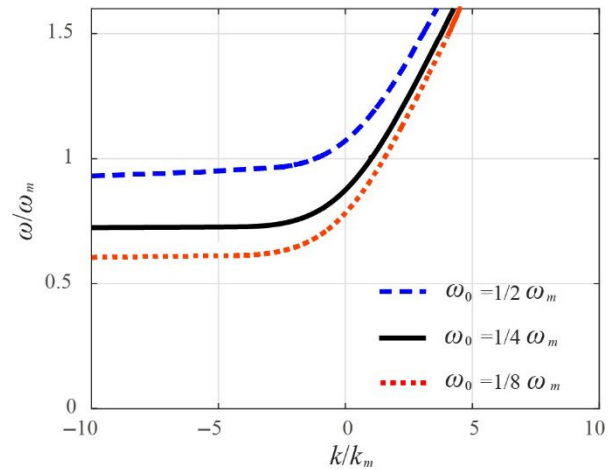


图 3 不同磁偏置下半无限旋磁介质中 SMPs 的归一化色散曲线

Figure 3 Normalized dispersion relations of SMPs for semi-infinite gyromagnetic medium

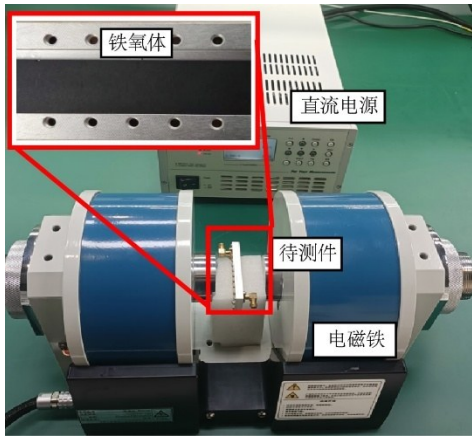
## 1.2 有限空间表面磁等离子体激元漏波结构

接下来考虑介质层厚度  $d_1$  与旋磁层厚度  $d_2$  均有限的情况(图 5),其色散关系为

$$\frac{\tanh(\alpha_d d_1) \left( \alpha_m + \frac{\mu_2}{\mu_1} k \right) + \alpha_d \mu_v}{\tanh(\alpha_d d_1) \left( \alpha_m - \frac{\mu_2}{\mu_1} k \right) - \alpha_d \mu_v} = \frac{i \left( \alpha_m + \frac{\mu_2}{\mu_1} k \right) - k_3 \mu_v}{i \left( \alpha_m - \frac{\mu_2}{\mu_1} k \right) + k_3 \mu_v} \exp(-2\alpha_m d_2) \quad (5)$$

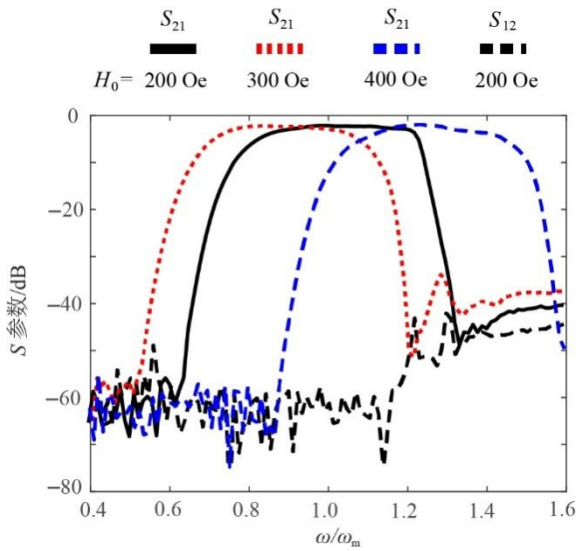
式中,  $k_3 = \sqrt{k_0^2 - k^2}$  为自由空间中沿  $-y$  方向的波矢。

选择与上面相同的材料参数,即  $\omega_0 = 1/4\omega_m$ ,  $\varepsilon_m = 15$ ,  $\varepsilon_r = 1$ , 当  $d_1 = 0.06\lambda_m$ 、 $d_2 = 0.08\lambda_m$  时,色散曲线如图 6 所示,其中蓝色实线为  $k$  的实部( $k_r$ ),红色虚线为  $k$  的虚部( $k_i$ )。与半无限 SMPs 模式相比,有限宽度下



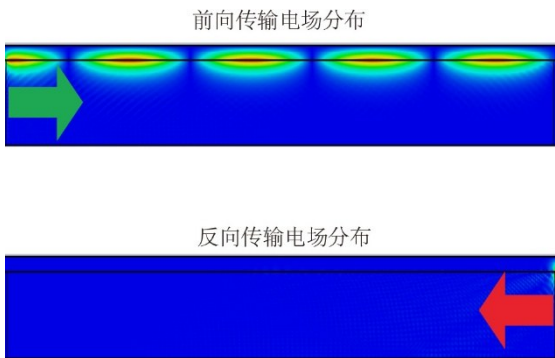
(a) 单向SMPs波导的实验照片

(a) Experiment photo of the proposed one-way SMPs waveguide



(b) 测量得到的S参数

(b) S parameters from measurement



(c) 模拟中SMPs波导的电场分布

(c) Electric field distributions of the SMPs waveguide in simulations

图4 SMPs波导的实验和仿真结果

Figure 4 Simulation and experiment results of SMPs waveguide

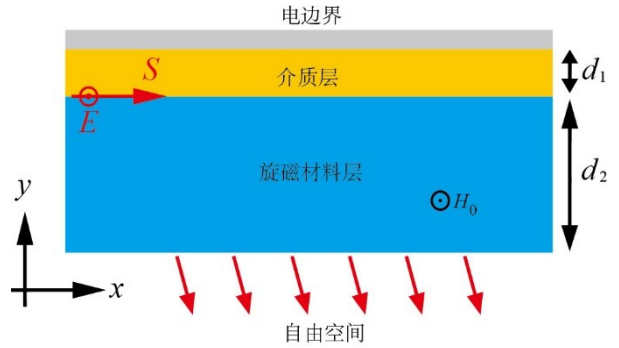


图5 有限旋磁介质中单向表面磁等离子体激元(SMPs)的示意图模型

Figure 5 Schematic model of the one-way SMPs with finite gyromagnetic medium

波矢  $k$  具有虚部,形式为  $k = k_r + ik_i$ 。由于计算中未考虑材料损耗,波矢虚部代表从有限厚度旋磁层泄漏的漏波,因此该结构可用于漏波天线设计。由图6可见,  $k_i$  仅在光锥范围内(黑色虚线,  $k_r < k_0$ )存在,该区域以黄色阴影标注;而光锥外的电磁场因在空气边界发生全反射,被束缚在旋磁层内。

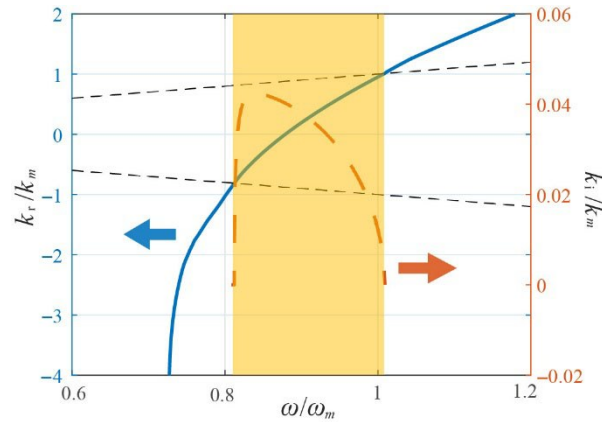


图6 有限旋磁介质中SMPs的归一化色散关系

Figure 6 Normalized dispersion relations of SMPs for finite gyromagnetic medium

## 2 漏波天线应用

### 2.1 理论分析

基于上述有限厚度旋磁层,可实现漏波天线的设计.考虑长度为1的SMPs波导,漏波天线的辐射效率  $\eta$  定义为通过该开放SMPs波导后,辐射能量相对入射能量的占比。若SMPs波导厚度均匀,电磁场强度沿传输长度  $l$  按  $e^{-k_i l}$  衰减,则辐射效率可表示为  $\eta = 1 - e^{-2k_i l}$ 。然而,若  $k_i$  为固定值,SMPs模式场沿传输长度  $l$  衰减,会导致沿SMPs波导表面的泄漏场分布逐渐减弱,这种不均匀的场分布会使远场辐射方向图性能变差,无法满足实际应用需求。为实现沿波导表面均匀

分布的泄漏能量, SMPs 波矢的虚部  $k_i$  需沿长度  $l$  逐渐增大。此时, 由于  $k_i$  为沿  $l$  方向变化量, 辐射效率表达式为  $\eta = 1 - e^{-2/k_i l}$ , 且需与  $l$  成正比, 即  $1 - e^{-2/k_i l} \propto l$ 。

针对一个特定场景, 即 SMPs 波导长度为 8 个自由空间波长, 辐射效率为 99%, 根据上述公式计算得到的  $k_i$  值如图 7 所示。其中, 圆形标记蓝色曲线对应非均匀厚度 SMPs 波导 (实现沿表面均匀场分布),  $k_i$  从  $0.06\lambda_0^{-1}$  增至  $2\lambda_0^{-1}$ ; 叉号标记的色曲线为均匀波导的对比曲线,  $k_i = 0.287\lambda_0^{-1}$ 。

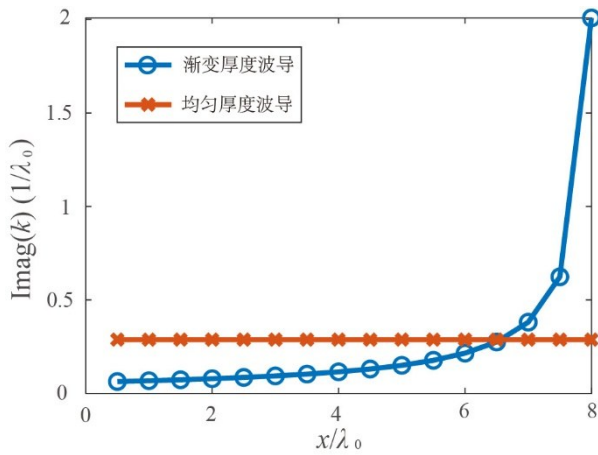


图 7 SMP 模式的波矢虚部随传播距离的变化

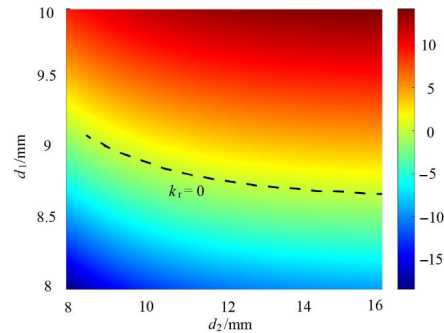
Figure 7 Imaginary parts of the wavevector of SMPs mode along the SMPs waveguide length

为实现图 7 中计算的非均匀  $k_i$ , 可设计非均匀厚度的旋磁层  $d_2$ , 旋磁层厚度越小, 倏逝波衰减前到达开放边界的场强越大, 能够泄漏出去的能量越大,  $k_i$  值越高。但需注意, 改变  $d_2$  不仅会影响  $k_i$ , 还会改变波矢实部  $k_r$ 。为实现定向辐射, 需保证  $k_r$  沿波导表面恒定。因此, 需同时调节介质层厚度  $d_1$  与旋磁层厚度  $d_2$ , 使更多能量从 SMPs 波导泄漏。

实际设计中, 旋磁介质参数设置如下, 饱和磁化强度  $4\pi M_s = 750$  Gs, 磁偏置  $H_0 = 187$  Oe, 工作频率 1.8 GHz, 因此 SMPs 波导长度为 1 333 mm (8 个波长)。这里选择的旋磁材料参数是常用的铁氧体参数。根据式 (3) 的色散关系, 计算不同  $d_1$ 、 $d_2$  对应的  $k_r$  与  $k_i$  值, 结果分别如图 8(a) 和 (b) 所示。由图可见,  $d_2$  对  $k_r$  影响更大, 而  $d_1$  与  $k_i$  的关联性更强。图中虚线表示  $k_r = 0$ 、 $k_i = 1, 3, 5$  的等值线。 $k_r$  等值线与  $k_i$  等值线的交点 (红色圆点) 即为实现固定  $k_r$  下不同  $k_i$  所需的  $d_1$  与  $d_2$  值。据此, 可得到图 7 中  $k_i$  对应的  $d_1$  与  $d_2$  值 (如图 8(c) 所示), 沿 SMPs 波导长度, 旋磁介质厚度  $d_2$  逐渐减小, 介质层厚度  $d_1$  在波导末端略有增大。

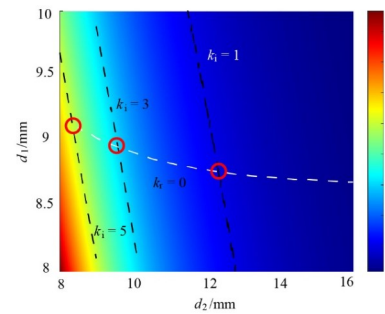
## 2.2 数值模拟

根据上述的理论分析, 本文基于仿真工具 CST



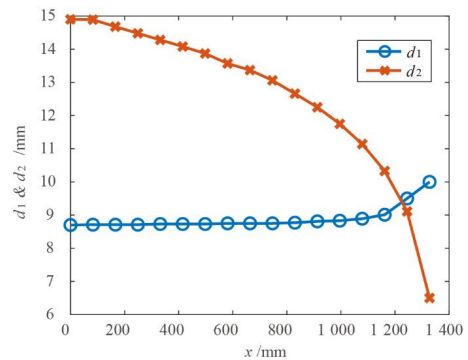
(a) 不同  $d_1$  和  $d_2$  下波数  $k$  的实部  $k_r$  的映射图

(a) Mapping diagram of real part of wavenumber  $k_r$  for different  $d_1$  and  $d_2$



(b) 不同  $d_1$  和  $d_2$  下波数  $k$  的虚部  $k_i$  的映射图

(b) Mapping diagram of real part of wavenumber  $k_i$  for different  $d_1$  and  $d_2$



(c) 实现图 7 中  $k_i$  所需的  $d_1$  和  $d_2$  的值

(c) Values of  $d_1$  and  $d_2$  to realize  $k_i$  in figure 7

图 8 理论计算  $k_r$  和  $k_i$  随  $d_1$  和  $d_2$  的变化关系

Figure 8 Mapping diagram of wavenumber  $k$  for different  $d_1$  and  $d_2$

Studio Suite 2020 进行了三维电磁仿真。仿真示意图如图 9 所示, 几何尺寸与图 8 一致 (为清晰展示, 长度方向已缩放)。将介质层与旋磁层按设计的几何参数堆叠构成 SMPs 波导, 电磁信号从波导左侧注入, 沿介质-旋磁层界面传输的同时向外泄漏。

仿真得到的远场辐射方向图如图 10(a) 中蓝色

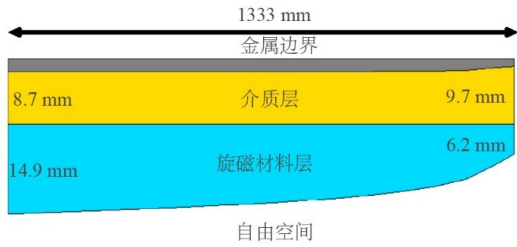
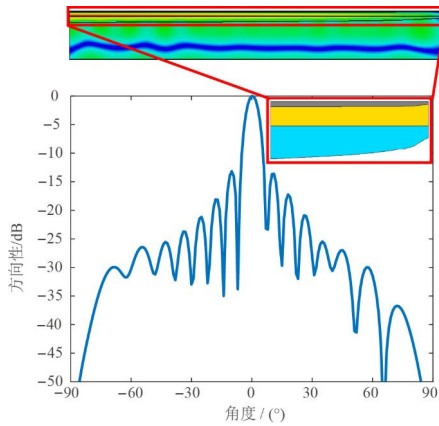
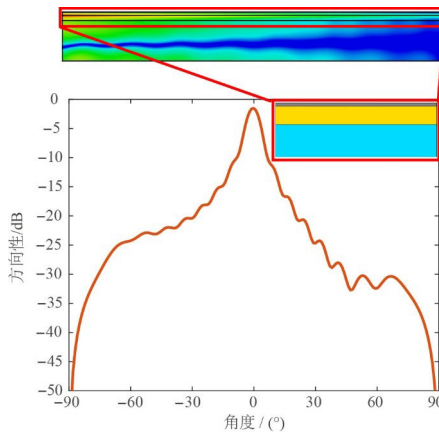


图9 基于SMPs的漏波天线在仿真中的示意图及几何尺寸  
Figure 9 Schematic model and geometric dimensions of SMPs-based leaky wave antennas in Simulation



(a) 非均匀厚度SMPs漏波天线的近场和远场辐射方向图

(a) Near field and far field radiation patterns of non-uniform thickness SMPs leaky wave antennas



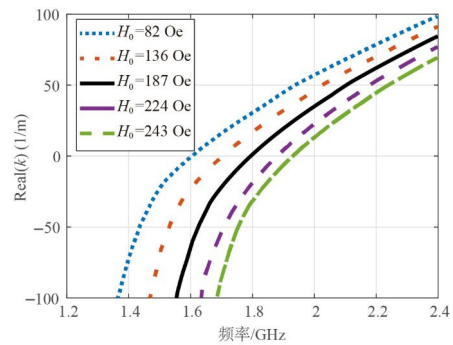
(b) 均匀厚度SMPs漏波天线的近场和远场辐射方向图

(b) Near field and far field radiation patterns of uniform thickness SMPs leaky wave antennas

图10 SMPs漏波天线的近场和远场辐射方向图  
Figure 10 Near field and far field radiation patterns of non-uniform and uniform thickness SMPs leaky wave antennas

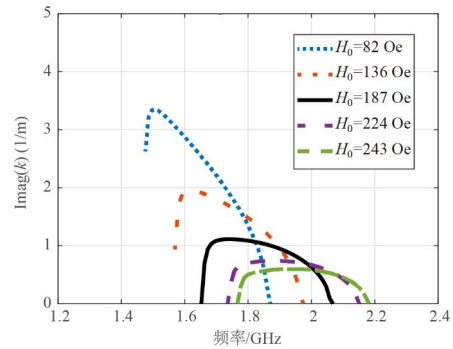
曲线所示,红色曲线为均匀结构的辐射方向图作为对比。图10(b)表明,尽管均匀结构可实现有效能量泄漏,但由于泄漏波分布不均,其辐射增益与零点深度显著恶化。插图展示了两种结构的介质-旋磁层几何结构对比。

在波束扫描应用中,调节偏置磁场 $H_0$ 可使色散曲线偏移,不同 $H_0$ 下的色散曲线如图11所示。在1.8 GHz频率下,不同外部磁场作用下 $k_r$ 的变化范围为+35 rad/m~-35 rad/m(图11(a))。根据切向波数连续性,漏波辐射角度 $\theta = \arcsin(k_r/k_0)$ ,因此可通过 $H_0$ 控制辐射方向。但需注意,由图11(b)可知, $k_i$ 也随 $H_0$ 变化,即不同辐射角度下的辐射效率存在差异。



(a) 不同磁偏置下的波数实部 $k_r$

(a) Real part  $k_r$  of the wavenumbers under different magnetic field bias



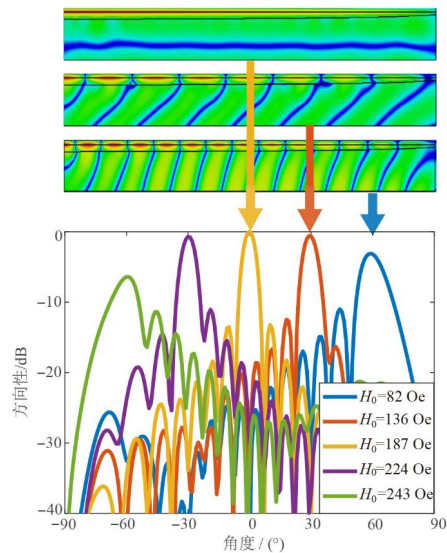
(b) 不同磁偏置下的波数虚部 $k_i$

(b) Imaginary part  $k_i$  of the wavenumbers under different magnetic field bias

图11 不同磁偏置下的SMPs模式波数  
Figure 11 SMPs wavenumbers under different magnetic field bias

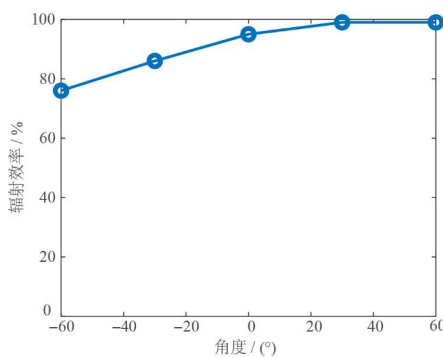
图12为1.8 GHz频率下不同 $H_0$ 时(82 Oe ~ 243 Oe)的仿真近场分布与远场辐射方向图。由图可见,漏波辐射波束可在 $\pm 60^\circ$ 范围内实现有效扫描,且无栅瓣产生。理论上,当 $k_r$ 接近 $k_0$ 时,波束可扫描至更宽角度且无栅瓣,但此时有效口径过小,无法满足

实际应用需求。如前节预测,在高磁场  $H_0$  下  $k_i$  较小,因此负扫描角度的辐射效率较低,图 12(b)中不同辐射角度的辐射效率(通过泄漏功率与输入功率的比值计算)进一步验证了这一结果。尽管存在效率下降,但整个扫描范围内的辐射效率仍保持在 80% 以上。



(a) 在工作频率下不同外部磁场偏置时的近场分布和远场辐射

(a) Near field distributions and far field radiations under different external magnetic field biases at the operating frequency



(b) 不同辐射角度下的辐射效率

(b) Radiation efficiencies at different radiation angles

图 12 SMPs 漏波天线的近场分布和远场扫描方向图

Figure 12 Near field distributions and far field radiations of SMPs leaky wave antenna

### 3 结论

本文提出并从理论层面深入分析了一种基于单向 SMPs 波的新型漏波天线(LWAs)。通过设计具有合适材料参数与几何尺寸的旋磁层和介质层,成功实

现了具有单向传输特性的 SMPs 模式。仿真与实测的 S 参数及场分布与理论分析结果吻合良好,验证了所提结构的单向传输特性。将 SMPs 波导中的旋磁介质设计为有限宽度,可获得表面场分布均匀的漏波辐射。为验证单向 SMPs 在漏波天线中的性能,本文以铁氧体材料制作了基于 SMPs 模式的单向传输波导样品(长度 40 mm),并在此基础上建立和仿真验证了长度为 1 333 mm(8 个波长)的 LWAs 物理模型(饱和磁化强度 750 Gs,工作偏置磁场 187 Oe,参数符合实际应用需求)。该天线的半功率波束宽度(Half-Power BeamWidth, HPBW)为  $7^\circ$ ,辐射效率超过 95%。此外,调节外加偏置磁场可使 SMPs 模式的色散曲线沿波数轴偏移,从而在固定频率下实现  $\pm 60^\circ$  以上的波束扫描范围。这与传统 LWAs 依赖频率扫描的波束扫描方式截然不同。与传统 LWAs 相比,基于 SMPs 的 LWAs 性能更优,有效克服了频率依赖型波束扫描、开阻带等局限,显著拓展了漏波天线的应用范围,为先进辐射与波束扫描领域提供全新的解决方案。

### 参考文献

- [1] Zheng D Z, Lyu Y L, Wu K. Transversely slotted SIW leaky-wave antenna featuring rapid beam-scanning for millimeter-wave applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(6): 4172-4185.
- [2] Xu F, Wu K. Understanding leaky-wave structures: A special form of guided-wave structure[J]. IEEE Microwave Magazine, 2013, 14(5): 87-96.
- [3] Li Z, Guo Y J, Chen S L, et al. A period-reconfigurable leaky-wave antenna with fixed-frequency and wide-angle beam scanning[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(6): 3720-3732.
- [4] Mallahzadeh A, Mohammad-Ali-Nezhad S. Long slot ridged SIW leaky wave antenna design using transverse equivalent technique[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(11): 5445-5452.
- [5] Goldstone L, Oliner A. Leaky-wave antennas I: Rectangular waveguides[J]. IRE Transactions on Antennas and Propagation, 1959, 7(4): 307-319.
- [6] Xie D P, Zhu L. Microstrip leaky-wave antennas with non-uniform periodical loading of shorting pins for enhanced frequency sensitivity[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(7): 3337-3345.
- [7] Williams J T, Baccarelli P, Paulotto S, et al. 1-D combine leaky-wave antenna with the open-stopband suppressed: Design considerations and comparisons with measurements

- [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(9): 4484-4492.
- [8] Lyu Y L, Liu X X, Wang P Y, et al. Leaky-wave antennas based on noncutoff substrate integrated waveguide supporting beam scanning from backward to forward[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(6): 2155-2164.
- [9] Kianinejad A, Chen Z N, Qiu C W. A single-layered spoof-plasmon-mode leaky wave antenna with consistent gain[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(2): 681-687.
- [10] Rudramuni K, Kandasamy K, Zhang Q F, et al. Goubau-line leaky-wave antenna for wide-angle beam scanning from backfire to endfire[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(8): 1571-1574.
- [11] Lyu Y L, Meng F Y, Yang G H, et al. Periodic leaky-wave antenna based on complementary pair of radiation elements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(9): 4503-4515.
- [12] Ranjan R, Ghosh J. SIW-based leaky-wave antenna supporting wide range of beam scanning through broadside[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(4): 606-610.
- [13] 尹佳媛, 吴简, 邓敬亚, 等. 基于慢波基片集成波导的高增益连续扫描周期漏波天线[J]. *电子学报*, 2025, 53(3): 782-789.  
Yin J Y, Wu J, Deng J Y, et al. Slow-wave SIW periodic leaky-wave antenna with increased gain and continuous beam scanning through broadside[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2025, 53(3): 782-789. (in Chinese)
- [14] OLINER A A, JACKSON D R. *Leak-wave antennas*[M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2007.
- [15] Li Y X, Xue Q, Yung E K, et al. The periodic half-width microstrip leaky-wave antenna with a backward to forward scanning capability[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(3): 963-966.
- [16] Jackson D R, Caloz C, Itoh T. *Leaky-wave antennas*[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(7): 2194-2206.
- [17] Lu L, Joannopoulos J D, Soljačić M. Topological photonics[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(11): 821-829.
- [18] Jin D F, Lu L, Wang Z, et al. Topological magnetoplasmon[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13486.
- [19] Tsakmakidis K L, Shen L, Schulz S A, et al. Breaking Lorentz reciprocity to overcome the time-bandwidth limit in physics and engineering[J]. *Science*, 2017, 356(6344): 1260-1264.
- [20] Haldane F D M, Raghu S. Possible realization of directional optical waveguides in photonic crystals with broken time-reversal symmetry[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100: 013904.
- [21] Prange R E, Girvin S M. *The quantum hall effect*[M]. New York: Springer US, 1987.
- [22] Joannopoulos J D, Johnson S G, Winn J N, et al. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light - Second Edition*[M]. Princeton: Princeton University Press, 2011.
- [23] Wang Z, Chong Y D, Joannopoulos J D, et al. Observation of unidirectional backscattering-immune topological electromagnetic states[J]. *Nature*, 2009, 461(7265): 772-775.
- [24] Wang Z, Chong Y D, Joannopoulos J D, et al. Reflection-free one-way edge modes in a gyromagnetic photonic crystal[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100: 013905.
- [25] Ao X Y, Lin Z F, Chan C T. One-way edge mode in a magneto-optical honeycomb photonic crystal[J]. *Physical Review B*, 2009, 80(3): 033105.
- [26] Brion J J, Wallis R F, Hartstein A, et al. Theory of surface magnetoplasmons in semiconductors[J]. *Physical Review Letters*, 1972, 28(22): 1455-1458.
- [27] Yu Z F, Veronis G, Wang Z, et al. One-way electromagnetic waveguide formed at the interface between a plasmonic metal under a static magnetic field and a photonic crystal[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(2): 023902.
- [28] Khanikaev A B, Baryshev A V, Inoue M, et al. One-way electromagnetic Tamm states in magnetophotonic structures[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95: 011101.
- [29] Fang K J, Yu Z F, Fan S H. Realizing effective magnetic field for photons by controlling the phase of dynamic modulation[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(11): 782-787.
- [30] Khanikaev A B, Mousavi S H, Tse W K, et al. Photonic topological insulators[J]. *Nature Materials*, 2013, 12(3): 233-239.
- [31] Rechtsman M C, Zeuner J M, Plotnik Y, et al. Photonic floquet topological insulators[J]. *Nature*, 2013, 496(7444): 196-200.
- [32] Hu B, Wang Q J, Zhang Y. Broadly tunable one-way terahertz plasmonic waveguide based on nonreciprocal surface magneto plasmons[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 1895-1897.
- [33] Shen L F, Wang Z Y, Deng X H, et al. Complete trapping of electromagnetic radiation using surface magnetoplasmons[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1853-1856.
- [34] Buddhiraju S, Shi Y, Song A, et al. Absence of unidirectionally propagating surface plasmon-polaritons at nonreciprocal metal-dielectric interfaces[J]. *Nature Communi-*

cations, 2020, 11: 674.

[35] Ali Hassani Gangaraj S, Monticone F. Do truly unidirec-

tional surface plasmon-polaritons exist?[J]. Optica, 2019, 6(9): 1158.

#### 作者简介



**姜涛** 男,1982年生。博士,现为电子科技大学长三角研究院(湖州)太赫兹技术及无线通信研究中心副研究员。主要研究方向为射频通信系统和高性能滤波器。

E-mail: jtzju@126.com



**梁华杰** 男,1998年生。博士,现为电子科技大学长三角研究院(湖州)太赫兹技术及无线通信研究中心助理研究员。主要研究方向为毫米波太赫兹调制芯片和器件。

E-mail: huajieliang@csj.uestc.edu.cn



**邹林** 男,1987年生。博士,现为电子科技大学长三角研究院(湖州)太赫兹技术及无线通信研究中心副研究员。主要研究方向为柔性太赫兹材料、智能超表面和中子散射技术。

E-mail: zoulin@csj.uestc.edu.cn