光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20251128001

定向高辐射效率空心等离子体微纳天线

潘　武[1]，信天罡[2]，黄聿铭[1*]

（重庆邮电大学 1. 电子科学与工程学院；2. 集成电路学院，重庆 400065）

摘　要： 微纳天线能够突破传统光学衍射极限，实现对量子点辐射性能的精确调控，在纳米光子学领域具有重要研究价值。文章提出一种基于混合衬底的空心结构微纳天线设计，可同时实现高辐射强度与高定向性。与已有的微纳天线设计相比，该型微纳天线设计结合了牛眼圆环结构和等离子体效应的优势，使其在0.5～1.5 μm的宽波长范围内表现出优异的辐射性能。研究结果发现，在此复合结构中，位于天线中心的量子点辐射强度提升约1 000倍，定向辐射控制在30°范围内，最大珀塞尔因子约为8 800。此外，验证了外部牛眼圆环通过调控内部电场模式，在定向辐射和增强珀塞尔因子方面发挥关键作用。最后还提出了几种高性能天线组合，为天线的优化设计提供了理论依据。

关键词： 微纳天线；表面等离激元；方向性；珀塞尔因子

中图分类号： TN827.9　**文章编号：** 1001－5868(2026)01－0057－07

Directional Hollow-Core Plasmonic Micro/Nano Antenna with a High Radiation Efficiency

PAN Wu[1], XIN Tiangang[2], HUANG Yuming[1]

(1. School of Electronic Science and Engineering; 2. College of Integrated Circuits, Chongqing University of Post and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN)

Abstract: Micro/nano antennas provide a promising approach to overcome the diffraction limit in conventional optics, enabling precise manipulation of quantum-dot radiation. In this study, we developed a hollow-structured micro/nano antenna with a hybrid substrate that simultaneously achieves high radiative intensity and well-defined directivity. In contrast to existing micro/nano antenna designs, our design synergistically combines the benefits of bullseye ring structures and plasmonic effects, exhibiting exceptional performance across a wide wavelength range from 0.5 μm to 1.5 μm. This complex structure shows a 1 000-fold-enhanced radiative intensity for a quantum dot positioned at the antenna center, exhibits directional beam control within a 30° angular range, and yields a maximum Purcell factor of approximately 8 800. Furthermore, we demonstrate that the outside bullseye ring plays a critical role in both directing emission and enhancing Purcell factor by manipulating the inside electric-field mode. Several high-performance antenna configurations are proposed, offering valuable insights for optimized design strategies.

Key words: micro/nano antenna; surface plasmon polaritons; directivity; Purcell factor

收稿日期：2025－11－28.

基金项目：重庆市自然科学基金项目(CSTB2024NSCQ-MSX1187)；重庆邮电大学基金项目(A2023-054).

* **通信作者：**黄聿铭

0 引言

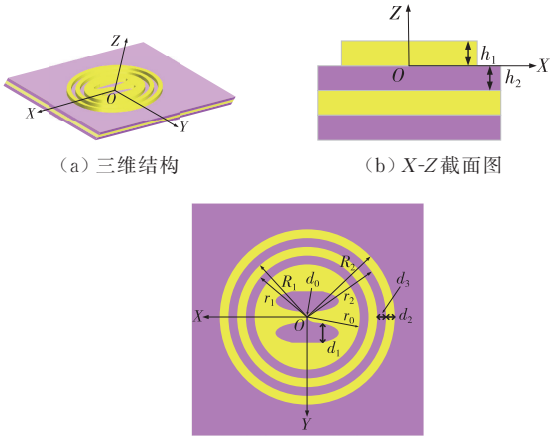
微纳天线是纳米光子学领域的一类亚波长天线结构[1]，利用等离子体或介电共振效应[2]工作。微纳米尺度光学天线的显著特征之一是基于表面等离子激元（Surface Plasmon，SP）[3]，即一种由电磁波与金属界面自由电子集体振荡耦合产生的混合电磁模式[4-5]。SP通过将光限制在亚波长金属边界，实现光能量在亚衍射极限尺度的集中，从而突破传统光学的衍射极限[6-8]。亚波长金属腔中的等离子体共振已在增强光谱学领域引起广泛关注[9]，并为在远小于波长的尺度上进行光调控提供了可行途径[10]。为提高光学器件的自发辐射速率，珀塞尔效应已被广泛应用于各类光电器件[11]。当发射器（如原子、量子点）放置于小体积光学谐振腔（如微纳腔、光子晶体、超表面）时，腔内光的叠加与相互作用会增强局域电磁场，显著提高自发辐射速率[12]。例如，哑铃型纳米天线[13]在约2 400 nm波长处实现约1 200倍的辐射增强。其他结构的天线，如蝴蝶结纳米天线[14]和半沙漏纳米天线[15]，则是有效利用珀塞尔效应提高发射速率的典型案例。通过将量子点（Quantum Dots，QDs）嵌入金属或介电微腔，微纳天线表面会激发等离子体模式，产生SP，显著增强局域电场，提高光子发射或收集效率[16-17]。通过合理的结构设计，可利用集成于微纳天线中的光学谐振腔来调控量子点的辐射强度[18]。

纳米尺度的光子发射器表现出全方向的偶极子发射特性[19]，通过纳米天线对发射波前进行面内定向控制，以抑制相邻光学元件之间的串扰[20]，理想的微纳天线应具备高定向辐射图案和低耗散损耗[21]。目前，等离子体纳米贴片天线[22]、Yagi-Uda天线[23]和开口环谐振器[24]等类型的天线可实现量子点辐射的高定向控制。其中，Yagi-Uda天线因其出色的定向可控性而受到广泛关注。但目前仍缺乏能同时优化辐射强度和方向性的微纳天线。

本文提出一种基于混合衬底的空心结构微纳天线，通过设计空心结构并与牛眼圆环结构集成，利用SP和珀塞尔效应，实现该微纳天线的高辐射性能。与传统微纳天线相比，该型天线设计结合了牛眼圆环和等离子体效应的优势，在0.5～1.5 μm波段内有效提高辐射强度的同时，保持了其辐射的定向性。通过对空心结构的中心间距和牛眼圆环构型等结构参数的综合分析，发现牛眼圆环结构的变化对近场电场模式有显著影响。该研究为设计定向高辐射强度微纳天线提供了几种有效方案。

1 微纳天线结构

本文所设计的微纳天线结构如图1所示，该结构是在纳米光镊[25]结构的基础上改进得来的。首先以原点为中心，将原来的一对半圆形对称结构改为一对半椭圆型对称结构（尖端结构），并且将其间距d_0从原有的20 nm大幅缩减至10 nm。若进一步减小d_0，会造成制造工艺难度的提升和成本的增加。将原有的沿Y轴对称的一对椭圆孔径结构转变为抛物线轮廓结构，固定截距d_1=400 nm，折射率设置为1。空心结构的半径r_0=1 μm，周围被两个环厚度d_2和环间距d_3均为100 nm的金（Au）牛眼圆环同心环绕，第一层（里层）牛眼圆环的内半径r_1=1.1 μm，外半径R_1=1.2 μm；第二层（外层）牛眼圆环的内半径r_2=1.3 μm，外半径R_2=1.4 μm。牛眼圆环结构可以在保持原始发射图案特征的同时，大幅增强辐射强度[26]。混合衬底由GaAs-Au-GaAs三层膜堆叠组成，每层厚度h_1=200 nm。上层结构厚度保持一致，即h_2=200 nm。



（a）三维结构　（b）X-Z截面图　（c）X-Y截面图

图1 微纳天线的结构图

2 微纳天线性能分析

首先，对微纳天线的表面散射特性和内部吸收进行分析。在以原点为中心的3 μm×3 μm×3 μm的计算域内建立了总场-散射场（TFSF）源，并设置为Z轴反向发射，之后设置两个电场监视器（3.2 μm×3.2 μm×3.2 μm和2.8 μm×2.8 μm×2.8 μm）分别获取散射光谱和吸收光谱。此外，在

天线上表面放置两个表面电场监视器(2.8 μm×2.8 μm 和 1.6 μm×1.4 μm)以捕获全局电场模式和局域电场模式,将第二个电场监视器对应的网格精度设置为中心间距的 20%(2 nm)。仿真得到的归一化散射光谱和吸收光谱分别如图 2(a)和图 2(c)所示。对于散射光谱,在 0.59 μm,0.77 μm 和 1.12 μm 波长处观察到三个宽散射峰。随后,将偶极子源置于原点处,设置为 X 轴方向偏振,分别用这三个波长的单频光进行激发,结果显示在尖端结构的上表面处有较大的电场增强,表明尖端结构区域形成了局域表面等离激元共振(Localized Surface Plasmon Resonance, LSPR)模式;在两个牛眼圆环上的场增强较弱,说明总场-散射场激发的能量损耗很小。吸收光谱呈现四个主要吸收峰,进一步分析表明大部分的入射能量被上层金属结构吸收,极少的能量被第一层 GaAs 衬底吸收。在 X 轴上且距原点 0.1 μm 处的尖端结构设置一个 Y-Z 电场监视器(0.2 μm×0.4 μm)以分析衬底的吸收特性,结果如图 2(d)所示,用置于原点的偶极子源替代总场-散射场后,发现尖端结构吸收的能量居多,第一层 GaAs 吸收的能量可忽略不计,证实了衬底有效的反射特性。此外,波长红移促进了能量从金属与衬底交界面向上转移(Z 轴正方向),并在上表面观察到能量的进一步增强。随着测量位置沿 X 轴向天线中心移动,这种激发进一步增强,表明等离子体共振效应具有强烈的空间依赖性。散射峰和吸收峰的重叠表明,在该共振波长下,天线的主要能量耗散途径是再辐射(即散射),而不是非辐射吸收(如欧姆损耗),这也证明了天线中存在单一、主导且明确的 LSPR 模式,提高辐射性能的同时降低了工作时的损耗。

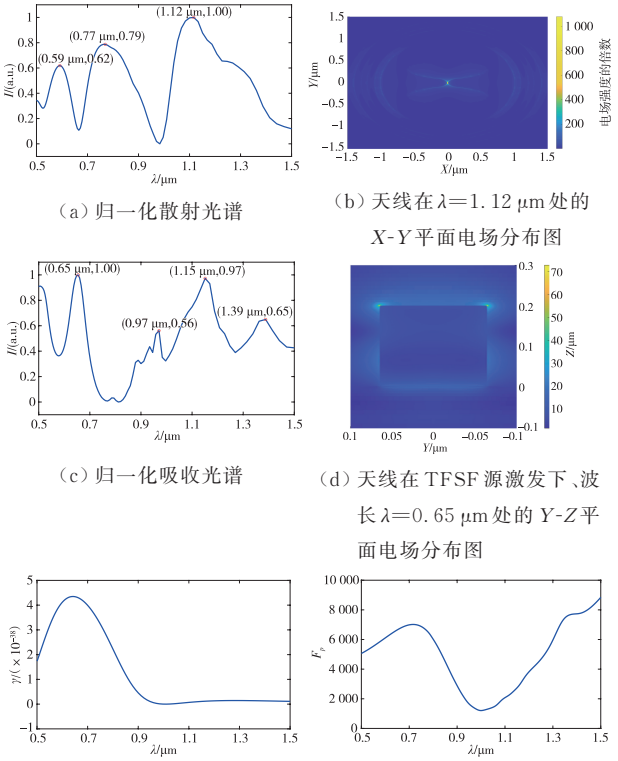
随后,利用以下公式计算天线的珀塞尔因子(F_p):

$$F_p=\frac{\gamma}{\gamma_0} \tag{1}$$

式中,γ_0 是量子发射器在真空中的自发衰减速率,γ 是量子发射器的自发衰减速率。其中,γ 可通过以下公式计算[27]:

$$\gamma=\frac{2\omega_0}{3\hbar\varepsilon_0}|\mu|^2\rho_z(\gamma_0,\omega_0) \tag{2}$$

式中,$\hbar$ 表示约化普朗克常数,ω_0 表示二能级量子系统的跃迁波长,μ 和 ε_0 分别表示偶极矩和真空介电常数,ρ_z 表征该结构产生的电场的局域化程度和强度,它与态密度相关。为获取 γ,需对公式(2)进行积分,并利用有限时域差分(FDTD)法进行仿真,得到该微纳天线的自发衰减速率如图 2(e)所示。图 2 显示共振波长位于 λ_0=1.0 μm 处,而最大自发衰减速率出现在 λ=0.64 μm 处。当 $\lambda=\lambda_0$ 时,F_p 较低,表明量子点被限制在微腔内时存在强耦合,辐射被抑制。在 λ_0 和 λ_1 之间,F_p 随波长的增加而减小,但仍出现辐射增强,这表明在该光谱过渡区间,天线表面出现了等离子体共振。结合图 2(b)进一步分析可知,尽管天线在 λ=1.12 μm 处的自发衰减速率相对较低,但相应的 F_p 仍然显著。此现象可通过位于天线中心的等离子激元产生的强局域电场来解释,该电场显著提高了偶极子源的辐射速率。



(a) 归一化散射光谱　(b) 天线在 λ=1.12 μm 处的 X-Y 平面电场分布图

(c) 归一化吸收光谱　(d) 天线在 TFSF 源激发下、波长 λ=0.65 μm 处的 Y-Z 平面电场分布图

(e) 自发衰减速率 γ 随波长的变化曲线　(f) F_p 随波长的变化曲线

图 2　微纳天线性能参数分析

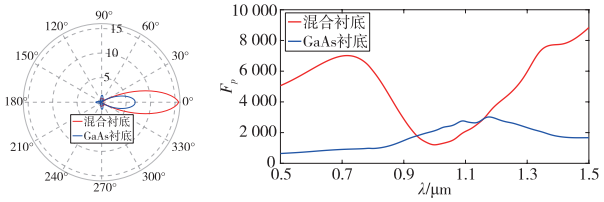
3　结构参数对微纳天线性能的影响

实验中,用置于原点的 0.5~1.5 μm 波段的偶极子源作为激发源,并重点分析图 1 的微纳天线的结构参数如衬底材料、上层结构厚度、牛眼圆环和空心结构的中心间距等对天线方向性和 F_p 的影响。

3.1　衬底材料

采用单一 GaAs 衬底和使用 GaAs-Au-GaAs 三

层膜堆叠的混合衬底做对比分析，如图3所示，与GaAs衬底相比，混合衬底在稳定和提高天线方向性方面表现出更优异的能力。混合衬底也明显改善了F_p，但其相对于GaAs衬底的优势与波长相关，仅在0.92～1.16 μm波段内表现出较好的性能。造成这种差异的原因在于，GaAs作为介电材料，在量子点激发下不支持SP，无法将量子点的能量集中在材料表面。相比之下，Au金属因其高反射率和有效的场限制能力，有助于提高珀塞尔因子。

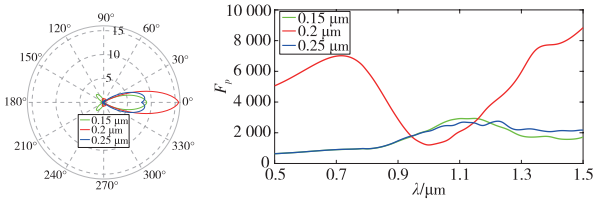


（a）方向性　（b）珀塞尔因子F_p

图3　两种衬底下的微纳天线方向性和F_p对比

3.2　上层结构厚度

分析天线上层金属结构（包括空心结构及其周围的牛眼圆环）的厚度变化对微纳天线性能的影响。厚度h_2在0.2 μm的基础上±0.05 μm变化，得到天线的辐射方向性和F_p如图4所示。0.2 μm的厚度有效提高了天线的辐射定向性和珀塞尔因子，在0.95～1.12 μm波段内，改变h_2对天线辐射性能的影响较好。



（a）方向性　（b）珀塞尔因子F_p

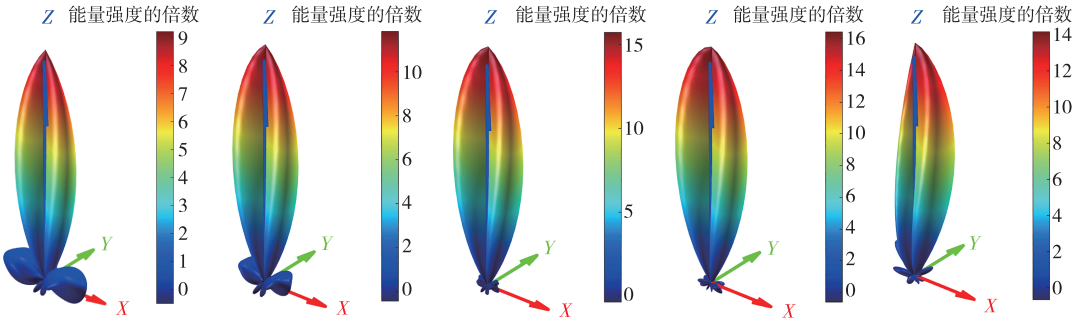
图4　不同上层结构厚度h_2下的微纳天线方向性和F_p对比

3.3　牛眼圆环

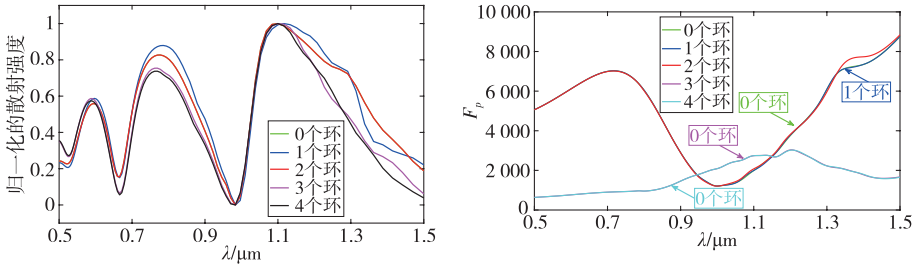
分析牛眼圆环的环数量、环厚度d_2和环间距d_3这三个关键参数变化对微纳天线的辐射方向性和F_p的影响。

3.3.1　环数量

在微纳天线的空心结构周围逐步放置0～4个环，同时保持其他参数不变，得到五种环数量的天线的三维方向性、散射光谱和F_p的对比如图5所示。环数量从0增加到3，天线的定向辐射能力逐渐提升。当增加到4个环时，天线的F_p下降，辐射方向表现出非对称性。结合图5(f)所示，环数量不影响天线散射峰的数量，并且在不同环数量下的共振峰位置的变化极小。此外，0个环和2个环的微纳天线的散射光谱完全重叠，已在图5(f)中加粗无环微纳天线的光谱曲线便于区分。



（a）0个环　（b）1个环　（c）2个环　（d）3个环　（e）4个环



（f）归一化散射谱　（g）珀塞尔因子F_p

图5　环数量对微纳天线的三维方向性、散射谱和F_p的影响

为了解释图 5(a)～(e)所示的三维方向性，引入辐射方向性系数 D：

$$D(\theta,\phi)=\frac{4\pi S(\theta,\phi)}{P_{\mathrm{rad}}} \tag{3}$$

式中，θ 为极角（与 Z 轴的夹角），ϕ 为方位角（与 X 轴的夹角）。$S(\theta,\phi)$ 为 (θ,ϕ) 方向的坡印廷矢量模值，由 FDTD 仿真得到的电场 $E(\theta,\phi)$ 和磁场 $H(\theta,\phi)$ 决定：

$$S(\theta,\phi)=\frac{1}{2}\mathrm{Re}\left[\vec{E}(\theta,\phi)\times\vec{H}(\theta,\phi)\right] \tag{4}$$

公式(3)中的 P_{rad} 为辐射总功率，由坡印廷矢量在闭合球面上的积分得到：

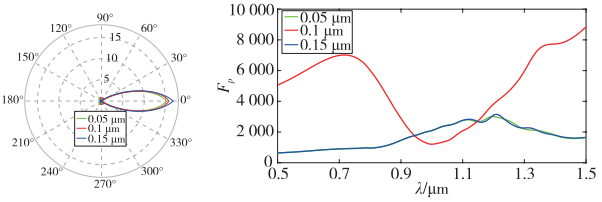
$$P_{\mathrm{rad}}=\iint_S S(\theta,\phi)r^2\sin\theta\mathrm{d}\theta\mathrm{d}\phi \tag{5}$$

式中，r 为远场监测面半径。在该微纳天线中，当 $\phi=0$ 时，微纳天线的方向性表现为三维辐射图案在 X-Z 平面的轮廓，样式如图 3(a)或图 4(a)所示的极坐标图的二维曲线；当 $\phi=90°$ 时，表现为三维辐射图案在 Y-Z 平面的方向性；另外，偶极子源在 X 轴的偏振方向导致微纳天线在 Y 轴方向的弱辐射，结合图 5(a)～(e)，可以看出微纳天线沿 Y 轴的辐射方向性极不明显，可以忽略。

对于 F_p，0 个环和 1 个环的微纳天线的辐射性可能相同，2 个环的微纳天线在 1.3～1.5 μm 波段的 F_p 变化较小。对于 3 个环的微纳天线，F_p 整体减小，仅在 0.93～1.15 μm 波段高于 2 个及以下环数量的天线的 F_p。进一步分析 3 个环的微纳天线的电场模式，并与 2 个环的微纳天线进行比较，结果表明，在所有五种环数量的微纳天线中，电场模式的变化趋势一致，在 0.5～1.5 μm 波段呈现增-减-增的趋势。对于 0～2 个环的微纳天线，电场模式的变化趋势与 F_p 一致，这种相关性在 3 个环和 4 个环的微纳天线中并不成立。进一步分析表明，与 0～2 个环的微纳天线相比，3 个环和 4 个环的微纳天线的场变化更明显，但表现出更低的峰值和更高的谷值。这表明 2 个环的微纳天线能最大地增强 F_p，而更多数量的环会导致尖端结构的电场模式受到抑制。

3.3.2　环厚度

分析环厚度 d_2 对微纳天线性能的影响。环厚度在 0.1 μm 的基础上 ±0.05 μm 变化，即分别测试了 0.05 μm（r_1=1.1 μm，R_1=1.15 μm，r_2=1.25 μm，R_2=1.3 μm）、0.1 μm（r_1=1.1 μm，R_1=1.2 μm，r_2=1.3 μm，R_2=1.4 μm）和 0.15 μm（r_1=1.1 μm，R_1=1.25 μm，r_2=1.35 μm，R_2=1.5 μm）环厚度的微纳天线进行对比。得到天线方向性和 F_p 数据如图 6 所示。增大或减小环厚度对微纳天线的辐射方向性的改善并不明显，0.1 μm 环厚度的微纳天线仅在 0.95～1.15 μm 波段表现出较弱的 F_p。

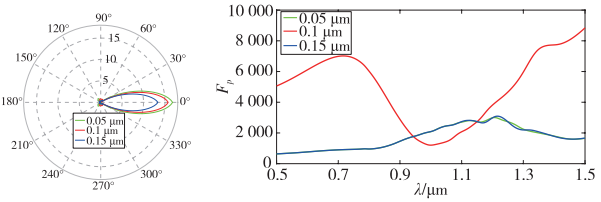


（a）方向性　　（b）珀塞尔因子 F_p

图 6　环厚度对微纳天线辐射性能的影响

3.3.3　环间距

分别测试环间距 d_3 为 0.05 μm（r_1=1.05 μm，R_1=1.15 μm，r_2=1.2 μm，R_2=1.3 μm）、0.1 μm 和 0.15 μm（r_1=1.15 μm，R_1=1.25 μm，r_2=1.4 μm，R_2=1.5 μm）的微纳天线，分析环间距对微纳天线性能的影响，得到微纳天线的辐射方向性和 F_p 数据如图 7 所示。0.1 μm 环间距的微纳天线在调控方向性方面更有效，环间距对 F_p 的影响与环厚度对 F_p 的影响非常相似。



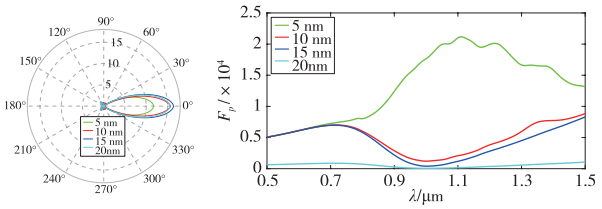
（a）方向性　　（b）珀塞尔因子 F_p

图 7　环间距对微纳天线辐射性能的影响

3.4　中心间距

分析尖端结构的间距变化对微纳天线性能的影响。依次分析了 5 nm，10 nm，15 nm 和 20 nm 尖端结构的间距的微纳天线的辐射方向性和 F_p，仿真结果如图 8 所示。5 nm 间距的微纳天线产生了极大的 F_p，但它在这四种不同间距的微纳天线中表现出最差的方向性。考虑到计算不确定性和实物加工困难，5 nm 间距不适用于实际应用。10 nm，15 nm 和 20 nm 间距的微纳天线的方向性差异极小。在 20 nm 间距下，微纳天线的 F_p 显著下降。这些结果间接验证了改进后由尖端结构形

成的微腔作为光学谐振腔的功能，在该微纳天线中，腔尺寸越小，F_p越大，对应的量子点的自发辐射速率越大。



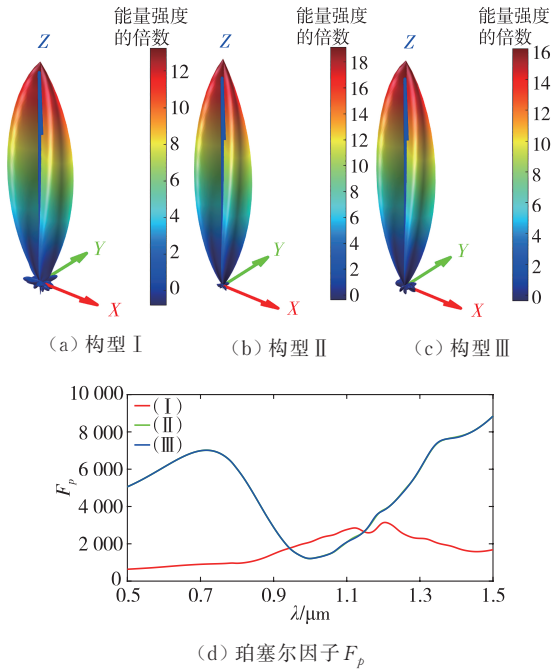
（a）方向性　　（b）珀塞尔因子F_p

图8　空心结构的中心间距对微纳天线辐射性能的影响

3.5　参数组合研究

综合第3节中对结构参数的分析，第1节介绍的微纳天线在0.5～1.5 μm范围内的大部分波段表现出良好的辐射性能，但在0.95～1.15 μm波段的辐射性能较差。为了在0.95～1.15 μm波段同时实现微纳天线对量子点的高辐射效率和高定向性调控，改变多个结构参数进行分析。改变上层金属结构厚度h_2、改变尖端结构间距d_1或采用GaAs衬底，会对微纳天线的性能产生负面影响。因此，保持上述三个结构参数不变，集中分析牛眼圆环的三个参数在0.95～1.15 μm波段对微纳天线辐射性能的影响，即环数量、环厚度d_2和环间距d_3。

根据第3节的研究结果，选择一种理想的微纳天线构型，即采用3个环、d_2=0.15 μm和d_3=0.05 μm的构型进行仿真，结果表明此微纳天线构型表现出极差的辐射性能，显著劣于对该微纳天线分析过程中测试的其他构型。因此，在保持牛眼圆环其中一个参数不变的情况下，改变其他两个参数，以确定能够在0.95～1.15 μm波段有效调控微纳天线的辐射性能的构型。构建了三种构型，分别是：（Ⅰ）3个环，d_2=0.15 μm，d_3=0.1 μm；（Ⅱ）3个环，d_2=0.1 μm，d_3=0.05 μm；（Ⅲ）2个环，d_2=0.15 μm，d_3=0.05 μm。对这三种微纳天线构型进行了仿真测试，得到微纳天线的辐射方向性和珀塞尔因子如图9所示。在0.95～1.15 μm波段内，构型（Ⅰ）和构型（Ⅲ）分别在辐射方向性和F_p方面表现出较强的性能。构型（Ⅱ）和构型（Ⅲ）的珀塞尔曲线完全重合，同时构型（Ⅱ）表现出更好的辐射方向性。在这三种构型中，构型（Ⅱ）在0.95～1.15 μm波段呈现出最好的辐射性能。



（a）构型Ⅰ　（b）构型Ⅱ　（c）构型Ⅲ

（d）珀塞尔因子F_p

图9　三种微纳天线构型的辐射性能

4　总结

本文提出一种兼具高辐射强度和高定向性的空心结构微纳天线。首先，表征了其辐射性能，该微纳天线能在0.5～1.5 μm波段的量子点的激发下实现最大约1 000倍的电场增强、最大约8 800的珀塞尔因子和在30°范围内的高定向辐射；其次，分析了天线的结构参数对辐射性能的影响；最后，在0.5～1.5 μm范围内的两种波段，分别提出了辐射性能最佳的微纳天线构型。与传统微纳米级别的天线相比，所提出的微纳天线尺寸更小，利用了空心结构和牛眼圆环实现了更有效的辐射性能的增强，为研究能够有效增强辐射强度并同时保持高定向发射性能的微纳天线提供了一种解决方案，在量子通信、纳米芯片集成和量子点材料科学等领域具有一定的应用前景。

参考文献：

[1] Zhang X, Liu F, Liang L, et al. Double Fano resonances in disk-nonconcentric ring plasmonic nanostructures[J]. Optoelectronics Letters, 2024, 20(1): 1-6.

[2] Kuznetsov A I, Miroshnichenko A E, Brongersma M L, et al. Optically resonant dielectric nanostructures[J]. Science, 2016, 354(6314): aag2472.

[3] Zhang J, Zhang L, Xu W. Surface plasmon polaritons: physics and applications[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,

2012, 45(11): 113001.

[4] Zayats A V, Smolyaninov I I, Maradudin A A. Nano-Optics of Surface Plasmon Polaritons[J]. Physics reports, 2005, 408(3/4): 131-314.

[5] Pitarke J M, Silkin V M, Chulkov E V, et al. Theory of Surface Plasmons and Surface-Plasmon Polaritons[J]. Reports on Progress in Physics, 2006, 70(1): 1.

[6] Fang Z, Zhu X. Plasmonics in nanostructures[J]. Advanced Materials, 2013, 25(28): 3840-3856.

[7] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics [J]. Nature, 2003, 424 (6950): 824-830.

[8] Bozhevolnyi S I, Volkov V S, Devaux E, et al. Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators [J]. Nature, 2006, 440 (7083): 508-511.

[9] Miyazaki H T, Kurokawa Y. Squeezing visible light waves into a 3-nm-thick and 55-nm-long plasmon cavity[J]. Physical Review Letters, 2006, 96(9): 097401.

[10] Oulton R F, Sorger V J, Genov D A, et al. A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement and long-range propagation [J]. Nature Photonics, 2008, 2 (8): 496-500.

[11] Pelton M. Modified spontaneous emission in nanophotonic structures[J]. Nature Photonics, 2015, 9(7): 427-435.

[12] Vahala K J. Optical microcavities [J]. Nature, 2003, 424 (6950): 839-846.

[13] Grosjean T, Mivelle M, Baida F I, et al. Diabolo nanoantenna for enhancing and confining the magnetic optical field[J]. Nano Letters, 2011, 11(3): 1009-1013.

[14] Hatab N A, Hsueh C H, Gaddis A L, et al. Free-standing optical gold bowtie nanoantenna with variable gap size for enhanced Raman spectroscopy [J]. Nano Letters, 2010, 10 (12): 4952-4955.

[15] Ranga R, Kalra Y, Kishor K. Design of hourglass nanoantenna for magnetic field enhancement[J]. Optics Communications, 2021, 481: 126511.

[16] Lian H, Gu Y, Ren J, et al. Efficient single photon emission and collection based on excitation of gap surface plasmons[J]. Physical Review Letters, 2015, 114(19): 193002.

[17] Rafiee E, Abolghasemi F. An all-optical 1× 2 de-multiplexer based on two-dimensional nonlinear photonic crystal ring resonators[J]. Optoelectronics Letters, 2024, 20 (1): 23-27.

[18] Abohmra A, Zubair M, Rehman M U, et al. Frontiers in quantum antennas: theoretical foundations, practical applications, and future outlook [J]. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 2025.

[19] Le Feber B, Rotenberg N, Kuipers L. Nanophotonic control of circular dipole emission[J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 6695.

[20] Li N, Lai Y, Lam S H, et al. Directional control of light with nanoantennas[J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9(1): 2001081.

[21] Ho J, Fu Y H, Dong Z, et al. Highly directive hybrid metal-dielectric Yagi-Uda nanoantennas [J]. ACS Nano, 2018, 12(8): 8616-8624.

[22] Akselrod G M, Argyropoulos C, Hoang T B, et al. Probing the mechanisms of large Purcell enhancement in plasmonic nanoantennas[J]. Nature Photonics, 2014, 8(11): 835-840.

[23] Kosako T, Kadoya Y, Hofmann H F. Directional control of light by a nano-optical Yagi-Uda antenna[J]. Nature Photonics, 2010, 4(5): 312-315.

[24] Inoue T, Hori H. Theoretical treatment of electric and magnetic multipole radiation near a planar dielectric surface based on angular spectrum representation of vector field [J]. Optical Review, 1998, 5(5): 295-302.

[25] Zhang P, Song G, Yu L. Optical trapping of single quantum dots for cavity quantum electrodynamics[J]. Photonics Research, 2018, 6(3): 182-185.

[26] Yang G, Shen Q, Niu Y, et al. Unidirectional, ultrafast, and bright spontaneous emission source enabled by a hybrid plasmonic nanoantenna [J]. Laser & Photonics Reviews, 2020, 14(3): 1900213.

[27] Xin C, Huang Y, Li R, et al. Individual tuning of directional emission and luminance of a quantum emitter in a composite plasmonic antenna[J]. Photonics, 2024, 11(5): 444.

作者简介：

潘　武(1966—)，男，重庆市人，博士，教授，主要研究方向为太赫兹通信技术和超材料及其在太赫兹器件中的应用；

黄聿铭(1993—)，男，重庆市人，博士，讲师，主要研究方向为量子光学、微纳光学、表面等离激元。