

## 激光与光电子学进展

## 蝶形纳米天线调控的超高品质光子-等离激元混合微腔

马娜, 江萍\*, 匡年奇, 李松泽, 徐先锋

中国石油大学(华东)理学院, 山东 青岛 266580

**摘要** 具有超高品质因子的光学微腔是构造各种集成光子器件的重要组件,以光子晶体微腔为基础的混合微腔为实现强烈的光和物质相互作用提供了一个新颖的平台,在腔量子电动力学、集成单光子源、量子计算等方面都具有十分广阔的应用前景。本文基于双异质结构光子晶体微腔,结合蝶形金纳米天线等离激元结构,设计实现了一种可见光波段的新颖光子-等离激元混合微腔,并通过改变蝶形金纳米天线的间隙、角度、长度、厚度、相对位置等结构参数,利用三维时域有限差分法研究了等离激元纳米结构对混合腔的品质因子、有效模式体积、品质因数的调控规律,模拟结果显示,混合腔的有效模式体积和品质因数分别始终稳定在  $10^{-6}(\lambda/n)^3$  和  $10^8(\lambda/n)^{-3}$  数量级,最佳品质因数值可达  $5.730689 \times 10^8(\lambda/n)^{-3}$ ,优于其他类型的微腔。

**关键词** 光电子学; 纳米光子学和光子晶体; 光子晶体微腔; 等离激元; 纳米天线; 品质因子; 时域有限差分法

中图分类号 O441.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222090

## Photonic-Plasmonic Hybrid Microcavity with Ultra-High Quality Factor Regulated by Bowtie Plasmonic Nanoantenna

Ma Na, Jiang Ping\*, Kuang Nianqi, Li Songze, Xu Xianfeng

College of Science, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China

**Abstract** Ultra-high quality factor optical microcavities are key components for constructing various integrated photonic devices. Hybrid microcavities based on the photonic crystal microcavities provide a novel platform for realizing a strong light-matter interaction that possesses extensive application prospects in many fields, including cavity quantum electrodynamics, integrated single photon sources, and quantum computing. In this paper, we theoretically propose a novel photonic-plasmonic hybrid microcavity functioning in the visible light band based on the basic double heterostructure photonic crystal cavity with a gold bowtie plasmonic nanoantenna. Here, the structural parameters of the bowtie plasmonic nanostructures (i. e., gap, angle, length, thickness, and relative position) were adjusted to investigate the regulation effects on the quality factor  $Q$ , effective mode volume  $V$ , and figure of merit  $Q/V$  of the cavity using a three-dimensional finite-difference time-domain method. The simulation results reveal that the effective mode volume and the figure of merit of the hybrid microcavity are stable on the order of  $10^{-6}(\lambda/n)^3$  and  $10^8(\lambda/n)^{-3}$ , respectively. Moreover, we achieved the highest  $Q/V$  value of  $5.730689 \times 10^8(\lambda/n)^{-3}$ , depicting a value much better than that of other microcavities.

**Key words** optoelectronics; nanophotonics and photonic crystals; photonic crystal cavity; plasmons; nanoantenna; quality factor; finite-difference time-domain method

## 1 引言

微纳米级光学腔的出现推动了集成光子器件的快速发展,对于实现各种功能性光子器件具有十分重要的意义,也为未来实现片上集成光子回路和光子网络奠定了基础。表征光学微腔有两个十分重要的性能参数——品质因子  $Q$  和模式体积  $V$ 。基于平板光子晶体

的各种缺陷微腔因具有优越的光场局域能力而引起研究者的广泛关注,并且可以通过调节结构参数来调控微腔的性能。近年来,很多研究者将光子晶体微腔与各种量子发射器(如量子点、金刚石色心)进行耦合,利用其局域场特性来改善量子发射器的发光特性,在设计和优化高效实用的单光子源方面具有巨大的潜力<sup>[1-3]</sup>。但是由于衍射定律的限制,其模式体积通常比

收稿日期: 2022-06-23; 修回日期: 2022-07-25; 录用日期: 2022-08-04; 网络首发日期: 2022-08-14

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(22CX03018A)、中国石油大学(华东)研究生创新工程资助项目(YCX2021145)

通信作者: \*pjiang@upc.edu.cn

较大并且很难进一步减小<sup>[4]</sup>。而由金属纳米结构组成的等离子体腔由于其表面等离子共振特性,能够将光场局域在一个超小的模式体积内,从而实现超大的珀塞尔增强效应,因此很多研究者也将其与金刚石纳米晶体等结构进行耦合<sup>[5-6]</sup>,利用其对光场的高局域特性来改善各种金刚石色心的发光特性<sup>[7-8]</sup>。但这种金属结构不可避免地存在强烈散射和吸收损耗,品质因子  $Q$  非常低,通常低于 100,并且很难得到进一步提升<sup>[9-12]</sup>。可见,这两种光学微腔结构都因其自身固有的缺陷而限制了进一步发展。

近些年,研究者们正在尝试将光子晶体微腔与等离子体腔进行结合,构造出新型的光子-等离子体混合微腔,这种混合微腔同时具有光子晶体微腔较高的品质因子  $Q$  和等离子体纳米结构超小的模式体积  $V$ ,因此能够实现超高的品质因数  $Q/V$ <sup>[13]</sup>。2016 年,Conteduca 等<sup>[14]</sup>在理论上提出了一种包含一维光子晶体介质微腔和矩形等离子体纳米天线的混合微腔,并于 2017 年在实验上实现了由一维光子晶体纳米腔和蝶形等离子体纳米天线组成的混合微腔,这些混合微腔的  $Q/V$  值都达到了  $10^6(\lambda/n)^{-3}$  的数量级<sup>[15]</sup>。但是一维混合微腔受到维度的限制,很难进一步实现更高的品质因数  $Q/V$ ,相比之下,二维混合微腔具有更大的优势。2020 年,Zhang 等<sup>[16]</sup>在理论上提出了一种基于 L3 型光子晶体微腔和蝶形金属纳米天线的混合微腔,该混合微腔的品质因数  $Q/V$  最高可达到  $8.4 \times 10^6(\lambda/n)^{-3}$ 。目前混合微腔的研究较少,且几乎都是关注红外波段,可见光波段的混合微腔的研究更是非

常少。而可见光区域存在大量的固态发射体<sup>[17]</sup>,可见光波段的混合微腔的实现在优化量子光源方面具有十分广阔的应用前景,因此如何构造出有利于片上集成且易于实现的可见光波段混合微腔平台仍然是一个值得研究的问题。本文将双异质结构光子晶体微腔与蝶形金纳米天线进行耦合,构造出了品质因数  $Q/V$  高达  $10^8(\lambda/n)^{-3}$  数量级的可见光波段的光子-等离子体混合微腔,利用三维时域有限差分(FDTD)方法计算其电场分布、品质因子  $Q$ 、有效模式体积  $V$ 、品质因数  $Q/V$  等性能参数,研究了蝶形金纳米天线的相对位置及尺寸参数对混合微腔的调控规律。此种高品质混合微腔的实现为腔量子电动力学研究提供了一个崭新的平台<sup>[18]</sup>,在非线性光学、量子光学、微激光、单光子源等方面也具有十分重要的应用前景<sup>[19-24]</sup>。

## 2 光子-等离子体混合微腔的结构设计

本文提出的光子-等离子体混合微腔是由双异质结构光子晶体微腔和蝶形金纳米天线两部分组成,图 1 为两种光子-等离子体混合微腔的结构示意图。光子晶体双异质结构腔是在  $W_1$  波导基础上,在两个晶格周期内局部调整晶格常数而形成的,由于光学势阱的存在,大部分光场都被局域到光学腔中,形成很强的光场局域模式。在该结构中,光子晶体基底材料选用氮化硅,其折射率为  $n=2.01$ ,晶格常数设为  $a_0=260$  nm,局部调制的晶格常数设为  $a_1=280$  nm,空气孔半径设为  $r=79$  nm,光子晶体平板厚度设为  $t=$

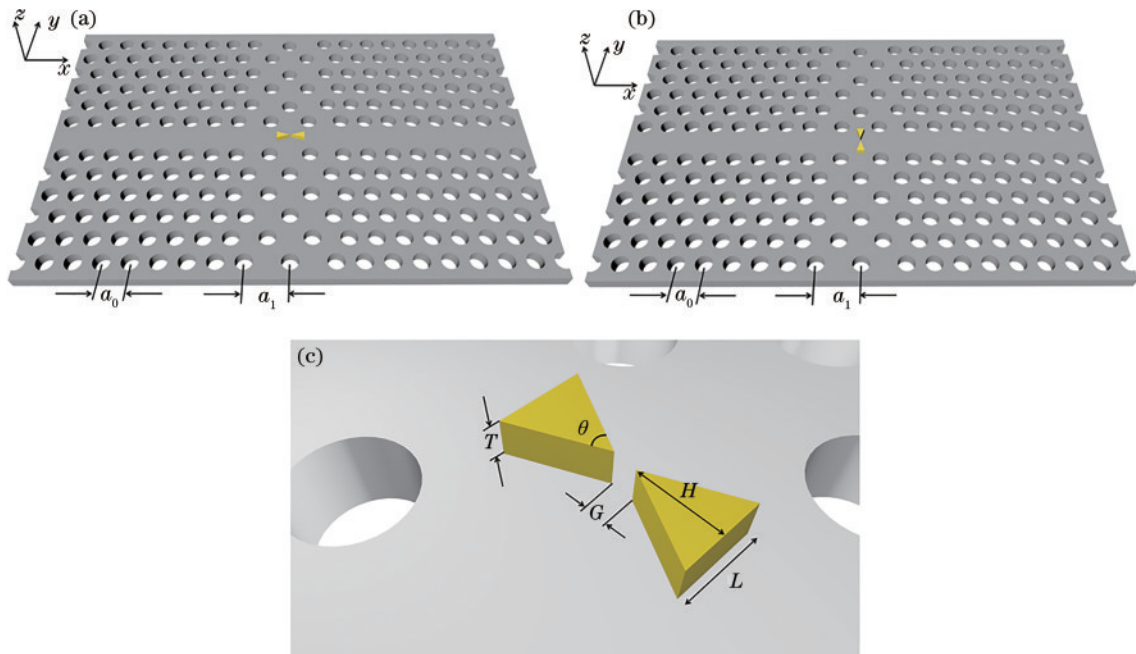


图 1 两种光子-等离子体混合微腔结构示意图。(a)蝶形等离子体纳米天线水平放置;(b)蝶形等离子体纳米天线垂直放置;(c)蝶形等离子体纳米天线的结构放大图

Fig. 1 Structural diagrams of two kinds of photonic-plasmonic hybrid microcavities. (a) Bowtie plasmonic nanoantenna is placed horizontally; (b) bowtie plasmonic nanoantenna is placed vertically; (c) enlarged diagram of the bowtie plasmonic nanoantenna

200 nm。整个模拟区域设置为  $5200 \text{ nm} \times 4053 \text{ nm} \times 1000 \text{ nm}$ , 网格尺寸设置为  $10 \text{ nm} \times 11.2583 \text{ nm} \times 10 \text{ nm}$ , 边界条件设置为完美匹配层(PML)。在数值模拟过程中, 始终用一个沿  $y$  方向极化的中心波长为  $637 \text{ nm}$  的偶极子源对光子晶体微腔的模场分布进行激发, 偶极子源被放置在光子晶体微腔的正中心位置。利用三维时域有限差分法对整个仿真区域进行模拟, 在该结构参数下的模拟结果显示, 空腔的品质因子  $Q$  和有效模式体积  $V$  分别为  $6052.26$  和  $3.71847 \times 10^{-2} (\lambda/n)^3$ , 得到了  $1.62762 \times 10^5 (\lambda/n)^{-3}$  的  $Q/V$  值。此时空腔的谐振波长位于  $636.716 \text{ nm}$ , 基本接近金刚石纳米晶体中氮-空穴色心零声子线的发射波长, 可与金刚石纳米晶体进行耦合对氮-空穴色心单光子的发射强度和效率实现共振增强。另外蝶形金纳米天线是由两个彼此尖角对齐的金三角形组成<sup>[25]</sup>, 如图 1(c) 所示, 两个金三角形之间的间隙距离为  $G$ , 尖角角度设为  $\theta$ , 三角形厚度为  $T$ , 底边对应的高度为  $H$ , 因此底边边长为  $L = 2H \tan(\theta/2)$ , 在之后的模拟过程中, 可以通过改变三角形底边高的长度来改变三角形底边的长度, 同时三角形其他两个边的长度也会发生相应的改变。蝶形金纳米天线分别以平行于和垂直于双异质结构腔中波导中轴线的方式与介质腔进行耦合, 如图 1(a) 和 (b) 所示。本文对这两种不同的混合微腔结构进行数值模拟分析, 以此来研究金属纳米结构对混合微腔的调控规律。在计算过程中, 为了使计算结果更加精确, 会在蝶形金纳米天线附近额外施加一个  $2 \text{ nm} \times 2 \text{ nm} \times 2 \text{ nm}$  的更小尺寸的网格区域。

### 3 光子-等离激元混合微腔的实现

品质因子  $Q$  和模式体积  $V$  是表征光学微腔十分重要的两个性能参数, 分别代表光学微腔的光谱能量密度和空间能量密度, 而品质因数  $Q/V$  更是作为评估光学微腔增强光与物质相互作用能力的基本指标<sup>[26-27]</sup>。

品质因子  $Q$  可表示为

$$Q = \frac{\omega_c}{\Delta\omega}, \quad (1)$$

式中:  $\omega_c$  是腔模的共振频率;  $\Delta\omega$  是共振强度谱的半峰全宽。

模式体积  $V$  通常定义为电场强度在整个相关体积上的积分且归一化为场最大值, 可表示为

$$V = \frac{\int_V \epsilon(r) |E(r)|^2 d^3r}{\max[\epsilon(r) |E(r)|^2]}, \quad (2)$$

式中:  $\epsilon(r)$  是位置  $r$  处的介电常数;  $E(r)$  是位置  $r$  处的电场强度。

光子晶体微腔可以通过调节微腔周围的空气孔半径及位置等结构参数来改善微腔的品质因子  $Q$ , 但是由于衍射定律的限制, 微腔的模式体积  $V$  很难进一步减小, 因此极大地限制了对品质因数  $Q/V$  值的进一步提升。金属纳米天线能够在金属和介质材料的表面处产生表面等离激元共振 (SPR), 突破衍射极限, 具有超小的模式体积。但是由于金属结构固有的欧姆损耗和对基底材料的辐射损耗, 能量损耗较大, 品质因子  $Q$  很难通过调节结构参数得到进一步提升, 因此等离体腔的品质因子  $Q$  通常低于 100。而将光子晶体微腔与金属纳米天线相互耦合而形成的光子-等离激元混合微腔同时利用了光子晶体微腔较高的品质因子  $Q$  和金属纳米天线超小的模式体积  $V$ , 为进一步提升  $Q/V$  值提供了新的契机和方式。

由于蝶形金纳米天线的存在, 混合微腔的谐振波长与空腔相比, 会发生不同程度的红移。图 2 是两种不同光子-等离激元混合微腔结构分别在谐振波长为  $637.3 \text{ nm}$  和  $637.8 \text{ nm}$  处的电场强度分布图, 两种结构中金纳米天线的结构参数保持一致, 间隙  $G=10 \text{ nm}$ , 尖角角度  $\theta=60^\circ$ , 厚度  $T=50 \text{ nm}$ , 底边高  $H=100 \text{ nm}$ , 并且金纳米天线都始终位于腔正中心处。在整个模拟过程中, 用于激发模场分布的偶极子光源始终沿  $y$  方向极化, 始终被放置在蝶形金纳米天线的间隙中心位置处。当蝶形金纳米天线沿  $x$  方向水平放置时, 混合微腔的谐振波长红移程度较小, 其电场强度分布如图 2(a)~(c) 所示, 电场主要集中在远离间隙中心的另外四个三角形尖角处, 而靠近间隙中心处的两个三角形尖角处的电场强度较弱。由于金属结构的放置方式垂直于偶极子光源的极化方向, 与光子晶体微腔的场模耦合较弱, 因此分界面处的电场几乎均匀地分布在两个三角形的底端, 电场强度相对较弱, 而大部分电场强度仍然集中在光子晶体微腔的内部。但是当蝶形金纳米天线沿  $y$  方向竖直放置时, 由于腔模与金纳米天线产生的等离激元共振发生较强的耦合, 因此电场主要集中在靠近间隙中心的两个尖角处, 从而在间隙中心形成了很强的电场分布, 出现了所谓的热点效应, 如图 2(d)~(f) 所示。电场最大值也从双异质结构腔的内部转移到了表面, 同时被集中局域在金属结构尖角附近。这种电场强度的转移非常有利于与各种外部量子发射器或其他类型的活性材料进行耦合, 增强光与物质的相互作用, 为腔量子电动力学提供更有效的研究平台, 更有望构造出各种具有良好性能的光子器件。



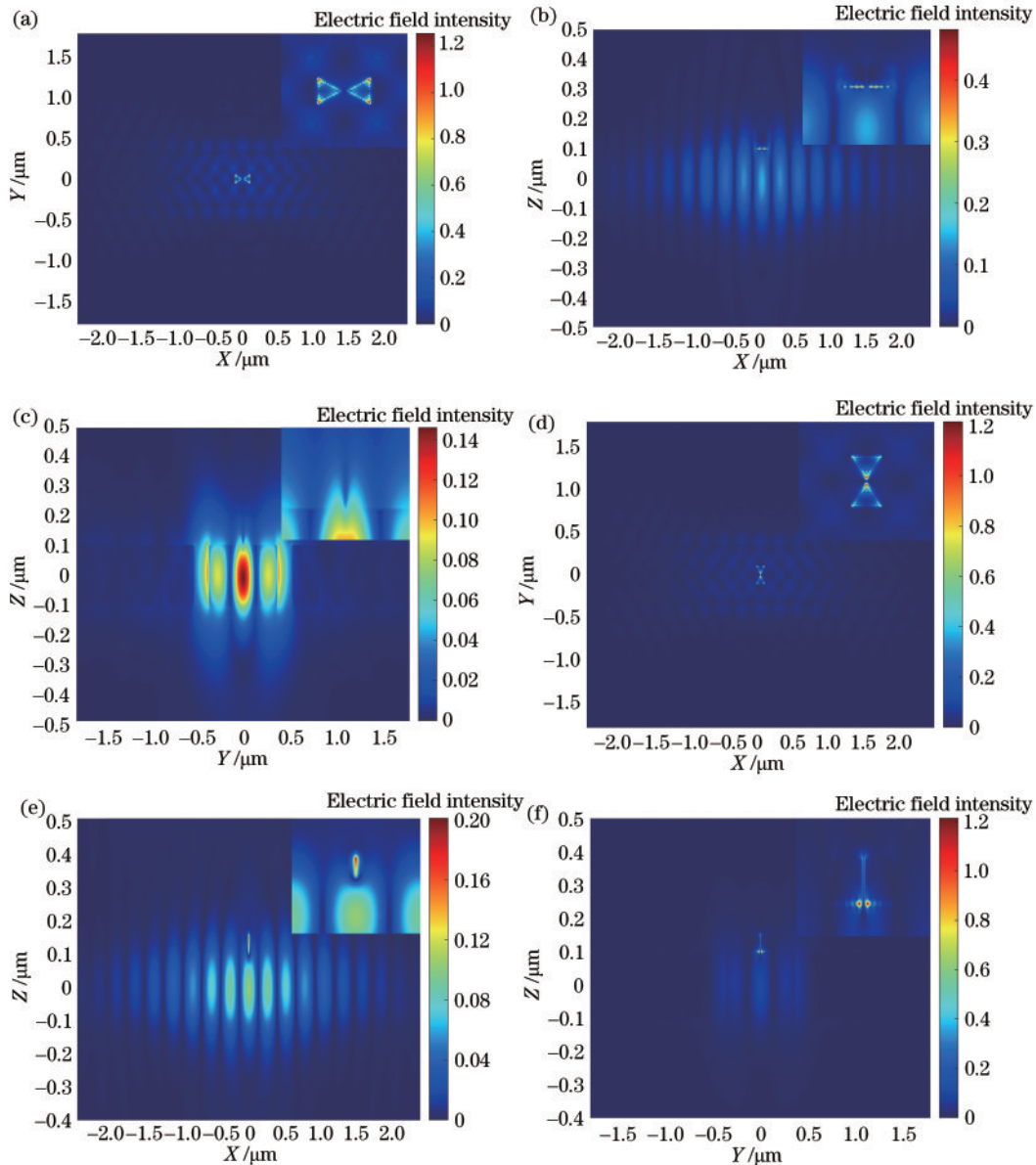


图 2 两种光子-等离子体混合微腔的电场强度分布图。(a)~(c)蝶形等离子体纳米天线水平放置时,XY、XZ、YZ横截面上的电场强度分布;(d)~(f)蝶形等离子体纳米天线垂直放置时,XY、XZ、YZ横截面上的电场强度分布

Fig. 2 Electric field intensity distribution of two photonic-plasmonic hybrid microcavities. (a)–(c) Electric field intensity distribution of XY, XZ, and YZ cross sections when the bowtie plasmonic nanoantenna is placed horizontally; (d)–(f) electric field intensity distribution of XY, XZ, and YZ cross sections when the bowtie plasmonic nanoantenna is placed vertically

#### 4 蝶形金纳米天线对混合微腔的调控规律研究

蝶形金纳米天线的结构参数变化会对混合微腔的整体性能产生不同的影响。为了进一步研究蝶形金纳米天线的相对位置和尺寸参数对混合微腔性能的调控作用,本文通过改变蝶形金纳米天线的间隙、角度、长度、厚度、位置以及相对放置方式,利用三维时域有限差分法计算了混合微腔的品质因子  $Q$ 、有效模式体积  $V$  和品质因数  $Q/V$ 。在接下来的计算过程中,我们使用的有效模式体积  $V$ ,通常以立方波长  $(\lambda/n)^3$  为单位进行表示。品质因数  $Q/V$  则直接定义为品质因子  $Q$

和有效模式体积  $V$  的比值。图 3 是蝶形金纳米天线的间隙变化对两种不同混合微腔的调控规律。将两个金三角形的角度、长度、厚度分别固定在  $60^\circ$ 、100 nm 和 50 nm,仅改变两个三角形之间的间隙。当蝶形金纳米天线的间隙逐渐增大时,两种混合微腔的品质因子  $Q$  都随之逐渐增加,这是因为蝶形金纳米天线的间隙越大,间隙处的等离子体共振效应越弱,所形成的电场强度越小,对混合腔的品质因子影响越小。此外,蝶形金纳米天线水平放置时的品质因子  $Q$  总是比垂直放置时大,如图 3(a) 所示,这是因为垂直放置的蝶形金纳米天线结构与激发的混合腔腔模的极化方向相一致,产生了更强烈的光-物质相互作用,同时增加了额外的

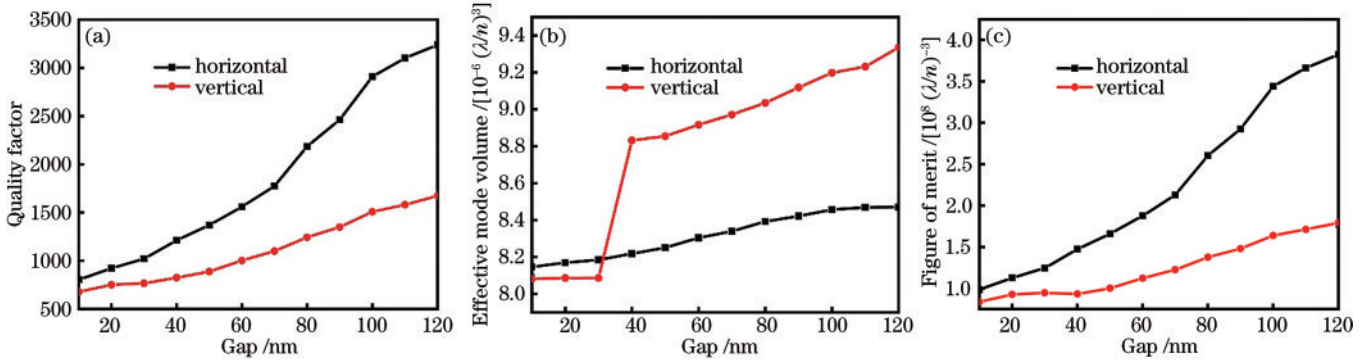


图 3 蝶形等离子体纳米天线的间隙变化对两种混合微腔光学性能的调控规律。(a)品质因子  $Q$ ; (b)有效模式体积  $V$ ; (c)品质因数  $Q/V$

Fig. 3 Optical properties of the two hybrid microcavities as functions of the gap of the bowtie plasmonic nanoantenna. (a) Quality factor  $Q$ ; (b) effective mode volume  $V$ ; (c) figure of merit  $Q/V$

金属损耗,使得品质因子  $Q$  相对较低。两种混合腔的有效模式体积  $V$  都随间隙增大而缓慢增加,这是因为间隙越大的蝶形金纳米天线会产生更弱的等离子体共振效应,局域光场能力相应变弱,因此更多的电磁场能量泄漏,从而导致了有效模式体积的增大。而在间隙大于 30 nm 之后,蝶形金纳米天线垂直放置时的有效模式体积  $V$  突然增大,随后总是大于水平放置时的情况,如图 3(b) 所示,原因是在该结构参数下,谐振波长也发生了较大的蓝移,偏移量  $\Delta\lambda = 1.363$  nm,这使得有效模式体积增加量相对较大。因此,两种混合腔的品质因数  $Q/V$  总是随间隙的增大而增大,蝶形金纳米天线结构垂直放置的混合微腔的品质因数  $Q/V$  总是低于其水平放置的情况,如图 3(c) 所示。

图 4 展示了蝶形金纳米天线的角度变化对两种不同混合微腔的调控规律。在仿真过程中,两个金三角形的间隙、长度、厚度分别固定在 70 nm、100 nm 和

50 nm。如图 4(a) 所示,当逐渐增大蝶形金纳米天线结构的角度的时候,两种混合微腔的品质因子  $Q$  都随之降低,这是因为金三角形的角度越大所产生的金属损耗越大,品质因子  $Q$  越小,而蝶形金纳米天线结构垂直放置时的品质因子  $Q$  总是低于水平放置时的情况。从图 4(b) 中也可以看出角度变化对蝶形金纳米天线结构垂直放置时混合腔的有效模式体积  $V$  影响更大,当角度逐渐增加时,蝶形金纳米天线也会相应变大,从而产生更多的等离激元,增强等离子体结构的光场局域能力,使得该情况下的有效模式体积  $V$  明显减小。在角度为  $70^\circ$  位置处,曲线突然急剧下降主要是因为该位置处的混合腔的谐振波长发生较大的红移,偏移量  $\Delta\lambda = 1.193$  nm,使得该处的有效模式体积减小量相对较大。图 4(c) 的模拟结果显示两种混合腔的品质因数  $Q/V$  都随角度的增加而逐渐降低,蝶形等离子体纳米结构水平放置时的品质因数  $Q/V$  总是高于垂直放置的情况。

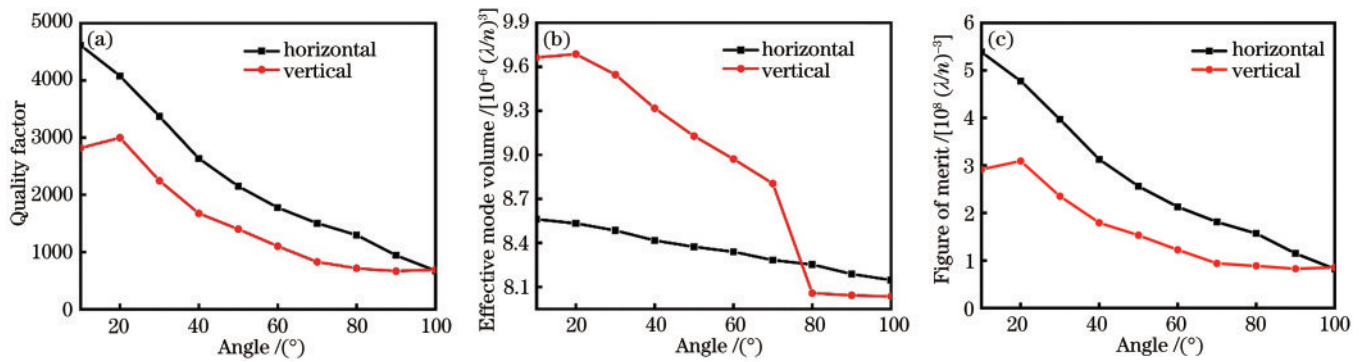


图 4 蝶形等离子体纳米天线的角度变化对两种混合微腔光学性能的调控规律。(a)品质因子  $Q$ ; (b)有效模式体积  $V$ ; (c)品质因数  $Q/V$

Fig. 4 Optical properties of the two hybrid microcavities as functions of the angle of the bowtie plasmonic nanoantenna. (a) Quality factor  $Q$ ; (b) effective mode volume  $V$ ; (c) figure of merit  $Q/V$

为进一步研究蝶形金纳米天线结构尺寸的影响,可以通过改变金三角形底边高的长度来改变纳米天线结构整体尺寸的大小,图 5 中的长度“Length”表示三角形底边高的长度,具体参数标定如图 1(c) 所示。在

模拟过程中,将蝶形金纳米天线结构的间隙、角度、厚度分别设为 70 nm、 $60^\circ$  和 50 nm,并保持不变。当逐渐增加蝶形金纳米结构的长度时,如图 5(a) 所示,两种混合腔的品质因子  $Q$  都逐渐下降,并且金纳米天线结



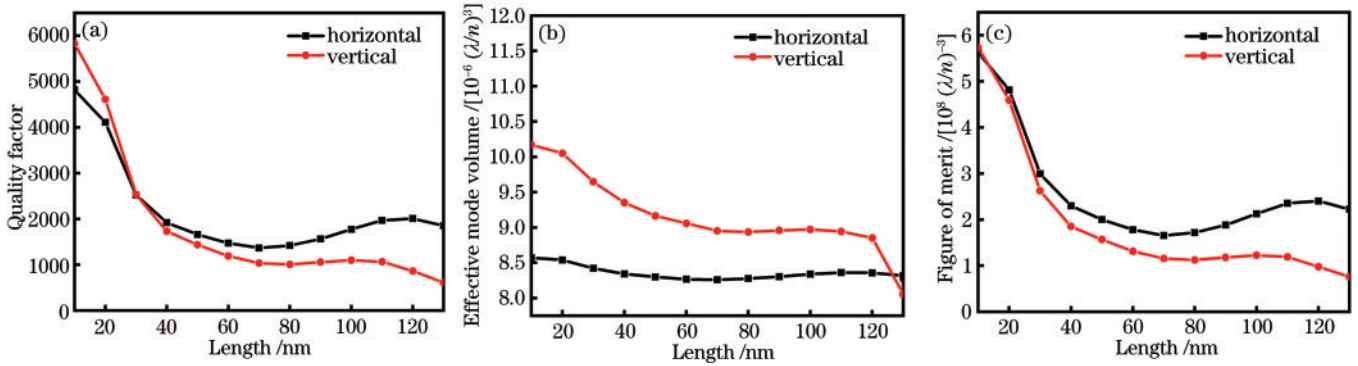


图 5 蝶形等离子体纳米天线的长度变化对两种混合微腔光学性能的调控规律。(a)品质因子  $Q$ ; (b)有效模式体积  $V$ ; (c)品质因数  $Q/V$

Fig. 5 Optical properties of the two hybrid microcavities as functions of the length of the bowtie plasmonic nanoantenna. (a) Quality factor  $Q$ ; (b) effective mode volume  $V$ ; (c) figure of merit  $Q/V$

构的结构尺寸越大,对垂直放置时的品质因子影响越大。对于有效模式体积  $V$  而言,金三角形结构的长度变化对蝶形金纳米天线垂直放置时的情况影响更剧烈,但基本高于蝶形金纳米天线结构水平放置时的情况,如图 5(b)所示。在长度为 120 nm 之后,曲线突然急剧下降主要是因为该位置处的混合腔的谐振波长发生较大的红移,偏移量  $\Delta\lambda = 1.365$  nm,使得该处的有效模式体积减小量相对较大。在长度为 30 nm 之前,这两种混合腔的品质因数  $Q/V$  基本一致,但 30 nm 之后,蝶形金纳米天线结构垂直放置时的品质因数  $Q/V$  始终低于水平放置时的情况,如图 5(c)所示。

另外,蝶形金纳米天线的厚度变化也会对两种不

同的混合微腔产生不同的调控规律,如图 6 所示。蝶形金纳米天线的间隙、角度、长度分别设为 70 nm、 $60^\circ$  和 100 nm,并保持不变。当两个金三角形的厚度逐渐增加时,两种混合腔的品质因子  $Q$  都随之降低,如图 6(a)所示。蝶形金纳米天线结构的厚度变化对该结构水平放置时混合微腔的有效模式体积  $V$  几乎无影响,但是对垂直放置时的有效模式体积  $V$  影响较大,有效模式体积  $V$  随厚度的增大而逐渐减小,如图 6(b)所示。因此,在厚度为 20 nm 之前,蝶形金纳米天线结构垂直放置时的品质因数  $Q/V$  高于水平放置时的情况,但 20 nm 之后,水平放置时的品质因数  $Q/V$  则高于垂直放置时的情况,如图 6(c)所示。

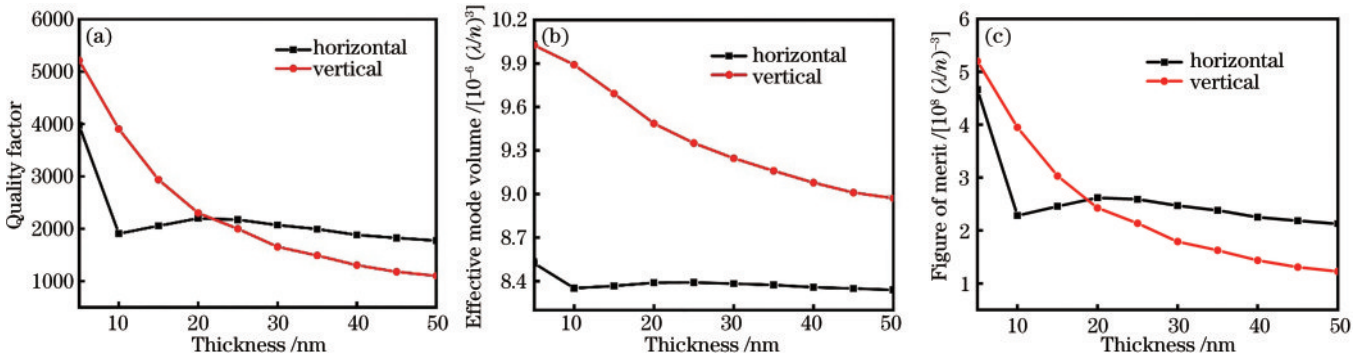


图 6 蝶形等离子体纳米天线的厚度变化对两种混合微腔光学性能的调控规律。(a)品质因子  $Q$ ; (b)有效模式体积  $V$ ; (c)品质因数  $Q/V$

Fig. 6 Optical properties of the two hybrid microcavities as functions of the thickness of the bowtie plasmonic nanoantenna. (a) Quality factor  $Q$ ; (b) effective mode volume  $V$ ; (c) figure of merit  $Q/V$

最后,本文通过改变蝶形金纳米天线沿  $X$  方向的相对位置,研究蝶形金纳米天线结构对光子-等离激元混合微腔光学性能的调控规律,如图 7 所示。两个金属三角形的间隙、角度、长度和厚度分别固定为 70 nm、 $60^\circ$ 、100 nm 和 50 nm。当蝶形金纳米天线逐渐远离双异质结构腔时,即图 7 中的“Location”逐渐增大,两种混合微腔的品质因子  $Q$  都随之减小,位于腔中心处的混合微腔的品质因子最大,并且蝶形金纳米天

线水平放置时混合微腔的品质因子  $Q$  总是大于垂直放置时的情况,如图 7(a)所示。图 7(b)展示了两种混合微腔的有效模式体积  $V$  随蝶形金纳米天线结构与腔中心距离的增大而逐渐减小,在距离为 50 nm 和 60 nm 处,两种混合微腔的有效模式体积  $V$  呈直线式下降,这是因为此处混合微腔的谐振波长发生较大的红移,偏移量  $\Delta\lambda$  大于 1.3 nm,使得这两处的有效模式体积减小量较大,呈现滑梯式降低。两种混合微腔的品质

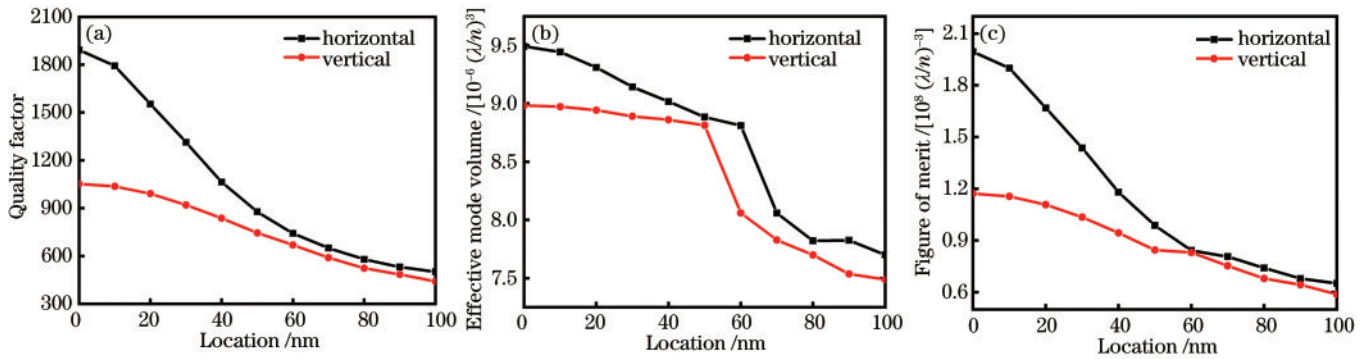


图 7 蝶形等离子体纳米天线沿 X 方向的位置变化对两种混合微腔光学性能的调控规律。(a)品质因子 Q; (b)有效模式体积 V; (c)品质因数 Q/V

Fig. 7 Optical properties of the two hybrid microcavities as functions of the location of the bowtie plasmonic nanoantenna along X direction. (a) Quality factor Q; (b) effective mode volume V; (c) figure of merit Q/V

因数  $Q/V$  都随距腔中心距离的增大而减小,蝶形金纳米天线水平放置时微腔的品质因数  $Q/V$  总是大于垂直放置时的情况,越靠近腔中心,两种结构的品质因数相差得越大,如图 7(c)所示。

综合上述分析,蝶形金纳米天线结构的间隙、角度、长度、厚度等结构参数的变化能够对混合微腔的整体性能产生不同的调控规律,双异质结构腔与蝶形金纳米天线结构的相互耦合作用使得两种混合微腔的有效模式体积  $V$  明显减小,始终位于  $10^{-6} (\lambda/n)^3$  数量级上,因此混合腔的品质因数  $Q/V$  也始终位于  $10^8 (\lambda/n)^{-3}$  数量级上。当蝶形金纳米天线的间隙增大时,混合微腔的品质因子  $Q$ 、有效模式体积  $V$  和品质因数  $Q/V$  都随之增大;当蝶形金纳米天线结构的间隙、角度、长度、厚度增大时,金纳米天线与介质腔的接触面积增大,光-物质相互作用的增强直接导致了金属损耗的增加,使得混合微腔的品质因子  $Q$  降低,但增加的等离激元使得有效模式体积  $V$  减小,因此混合微腔的品质因数  $Q/V$  也相应地降低;当蝶形金纳米天线结构相对腔中心的距离逐渐增加时,混合微腔的品质因子  $Q$ 、有效模式体积  $V$  和品质因数  $Q/V$  都随之减小。另外,蝶形金纳米天线结构的相对放置方式也对混合微腔的整体性能产生明显不同的影响,垂直放置的金纳米天线结构能够与双异质结构腔产生更加强烈的耦合作用,产生了更多的金属损耗,使得混合腔的品质因子  $Q$  相对较低,有效模式体积  $V$  相对较大,因此所得到的品质因数  $Q/V$  也相对较小。在整个研究过程中,两种光子-等离激元混合微腔所能达到最佳的品质因数  $Q/V$  为  $5.730689 \times 10^8 (\lambda/n)^{-3}$ ,所对应的结构参数为间隙  $G=10$  nm,尖角角度  $\theta=60^\circ$ ,厚度  $T=50$  nm,底边高  $H=10$  nm,但是底边高长度太小不利于实验样品的制备,产生的结构误差会更大,因此考虑到实验的微纳加工,我们建议选择底边高长度更大的结构参数。此外,两种混合微腔的谐振波长都始终位于 637 nm 附近,基本与金刚石 NV 色心零声子线的发射波长相一致,所调控的间隙都固定在 70 nm,这种间隙长度也非常利于

金刚石纳米晶体和其他固态发射体结构的嵌入,为将来利用光子-等离激元混合腔设计单光子源结构提供了非常重要的参考意义。

## 5 结 论

本文基于双异质结构光子晶体微腔,提出了一种可见光波段的光子-等离激元混合微腔。通过改变蝶形金纳米天线的相对位置和结构参数,研究了等离子体纳米结构对混合微腔不同的调控规律。数值模拟结果表明,当蝶形金纳米天线垂直放置时,能够出现更强的电场强度分布,在间隙中心会出现热点效应,但其品质因数  $Q/V$  相对较低,而其水平放置时的混合微腔由于较弱的耦合强度而产生了更高的品质因数  $Q/V$ ,这为定制不同强度的光-物质相互作用开辟了新的思路。最后,这两种混合微腔结构的品质因数  $Q/V$  始终位于  $10^8 (\lambda/n)^{-3}$  数量级上,最高可达  $5.730689 \times 10^8 (\lambda/n)^{-3}$ ,该值优于目前所报道的其他光学微腔。在以后的研究中,可将介质腔扩展到具有鲁棒性的拓扑微腔上<sup>[28-30]</sup>,构造出更多性能优秀的光子-等离激元混合微腔,可进一步与各种外部固态发射器进行耦合,在实现高效单光子源方面具有十分重要的意义,同时也在微纳激光、非线性光学、量子计算等方面具有十分广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Fehler K G, Ovyvan A P, Gruhler N, et al. Efficient coupling of an ensemble of nitrogen vacancy center to the mode of a high-Q,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  photonic crystal cavity[J]. ACS Nano, 2019, 13(6): 6891-6898.
- [2] Barth M, Nüsse N, Löchel B, et al. Controlled coupling of a single-diamond nanocrystal to a photonic crystal cavity[J]. Optics Letters, 2009, 34(7): 1108-1110.
- [3] Ota Y, Takamiya D, Ohta R, et al. Large vacuum Rabi splitting between a single quantum dot and an H0 photonic crystal nanocavity[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(9): 093101.

- [4] Abe R, Takeda T, Shiratori R, et al. Optimization of an H0 photonic crystal nanocavity using machine learning[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(2): 319-322.
- [5] Peng P, Liu Y C, Xu D, et al. Enhancing coherent light-matter interactions through microcavity-engineered plasmonic resonances[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(23): 233901.
- [6] Gurlek B, Sandoghdar V, Martin-Cano D. Manipulation of quenching in nanoantenna-emitter systems enabled by external detuned cavities: a path to enhance strong-coupling[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(2): 456-461.
- [7] Schietinger S, Barth M, Aichele T, et al. Plasmon-enhanced single photon emission from a nanoassembled metal-diamond hybrid structure at room temperature[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(4): 1694-1698.
- [8] Alaverdyan Y, Vamivakas N, Barnes J, et al. Spectral tunability of a plasmonic antenna with a dielectric nanocrystal[J]. *Optics Express*, 2011, 19(19): 18175-18181.
- [9] Kuttge M, García de Abajo F J, Polman A. Ultrasmall mode volume plasmonic nanodisk resonators[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(5): 1537-1541.
- [10] Russell K J, Liu T L, Cui S Y, et al. Large spontaneous emission enhancement in plasmonic nanocavities[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 459-462.
- [11] Chikkaraddy R, de Nijs B, Benz F, et al. Single-molecule strong coupling at room temperature in plasmonic nanocavities[J]. *Nature*, 2016, 535(7610): 127-130.
- [12] Hoang T B, Akselrod G M, Mikkelsen M H. Ultrafast room-temperature single photon emission from quantum dots coupled to plasmonic nanocavities[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(1): 270-275.
- [13] Zhang H Y, Zhao W, Liu Y T, et al. Photonic-plasmonic hybrid microcavities: physics and applications[J]. *Chinese Physics B*, 2021, 30(11): 117801.
- [14] Conteduca D, Dell' Olio F, Innone F, et al. Rigorous design of an ultra-high  $Q/V$  photonic/plasmonic cavity to be used in biosensing applications[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 77: 151-161.
- [15] Conteduca D, Reardon C, Scullion M G, et al. Ultra-high  $Q/V$  hybrid cavity for strong light-matter interaction[J]. *APL Photonics*, 2017, 2(8): 086101.
- [16] Zhang H Y, Liu Y C, Wang C, et al. Hybrid photonic-plasmonic nano-cavity with ultra-high  $Q/V$ [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(17): 4794-4797.
- [17] Kurtsiefer C, Mayer S, Zarda P, et al. Stable solid-state source of single photons[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(2): 290-293.
- [18] Yang J Y, Chen H J. Vacuum Rabi splitting of a single nitrogen-vacancy center coupled to a photonic crystal nanocavity[J]. *International Journal of Theoretical Physics*, 2021, 60(8): 3188-3196.
- [19] Butt M A, Khonina S N, Kazanskiy N L. Recent advances in photonic crystal optical devices: a review[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 142: 107265.
- [20] Saldutti M, Xiong M, Dimopoulos E, et al. Modal properties of photonic crystal cavities and applications to lasers[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(11): 3030.
- [21] Zhu G X, Liao Q H. Highly efficient collection for photon emission enhanced by the hybrid photonic-plasmonic cavity[J]. *Optics Express*, 2018, 26(24): 31391-31401.
- [22] 李刚, 张鹏飞, 杨鹏飞, 等. 光学腔与原子强耦合的实验研究进展[J]. *光学学报*, 2022, 42(3): 0327005.  
Li G, Zhang P F, Yang P F, et al. Experimental progress of strongly coupling between optical cavity and atoms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(3): 0327005.
- [23] 肖姗, 许秀来. 基于半导体量子点的片上手性纳米光子器件[J]. *光学学报*, 2022, 42(3): 0327009.  
Xiao S, Xu X L. On-chip chiral nanophotonic devices based on semiconductor quantum dots[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(3): 0327009.
- [24] 陈冬成, 周岳辉, 黄金凤, 等. 混合腔光力系统的双光子散射[J]. *光学学报*, 2022, 42(3): 0327015.  
Chen D C, Zhou Y H, Huang J F, et al. Two-photon scattering in mixed cavity optomechanical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(3): 0327015.
- [25] Ding W, Bachelot R, Kostcheev S, et al. Surface plasmon resonances in silver Bowtie nanoantennas with varied bow angles[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(12): 124314.
- [26] Akahane Y, Asano T, Song B S, et al. High- $Q$  photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal[J]. *Nature*, 2003, 425(6961): 944-947.
- [27] Vahala K J. Optical microcavities[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 839-846.
- [28] Qian Z Y, Li Z C, Hao H, et al. Absorption reduction of large Purcell enhancement enabled by topological stateled mode coupling[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(2): 023901.
- [29] Zhang H Y, Zheng Y J, Yu Z M, et al. Topological hybrid nanocavity for coupling phase transition[J]. *Journal of Optics*, 2021, 23(12): 124002.
- [30] Yan Q C, Hu X Y, Fu Y L, et al. Quantum topological photonics[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(15): 2001739.