

# MIM 表面等离子激元布拉格纳米微腔

童 凯 杨 青 张振国 牛力勇 苑海川

燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004

**摘要** 构建了一种金属-绝缘体-金属(MIM)表面等离子体布拉格波导结构,绝缘层为一维布拉格光栅结构。在布拉格光栅结构中引入缺陷,形成布拉格纳米微腔。这种纳米微腔结构可以将光子能量很好地局域在微腔中,且在金属与绝缘层界面上光子能量最强。分析了MIM波导的色散特性,获得了谐振波长为1550 nm时微腔的结构参数。同时利用时域有限差分(FDTD)方法讨论了绝缘层布拉格光栅周期数、绝缘层厚度、微腔长度对微腔品质因子 $Q$ 和模式体积 $V$ 的影响。通过合理的选择这些参数可以提高微腔性能,使其具有极小的模式体积 $V$ 和高的 $Q/V$ 值,可实现光子局域化。

**关键词** 光学器件; 表面等离子体; MIM波导; 布拉格光栅; 纳米微腔

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0402002

## MIM Surface Plasmonic Bragg Nano Micro-Cavity

Tong Kai Yang Qing Zhang Zhenguo Niu Liyong Yuan Haichuan

School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, HeBei 066004, China

**Abstract** A new type of metal-insulator-metal (MIM) surface plasmonic Bragg waveguide structure is proposed, in which one-dimensional Bragg grating is used as the intermediate insulating layer and the defect layer is introduced to construct the Bragg micro-cavity. The photon energy is well confined in the micro-cavity and most of the photon energy is localized along the interface between the insulating layer and metal. The structure parameters can be obtained through the analysis of the dispersion characteristics at the resonant wavelength of 1550 nm. The influences on the quality factor and mode volume by the structural parameters are analyzed by the finite-difference-time-domain (FDTD) method, such as the period number, the insulator layer thickness and the cavity length. The simulation results show that the performance of the cavity can be improved with proper parameters. The surface plasmonic Bragg nano micro-cavity has ultra-small mode volume  $V$  and high  $Q/V$ , which can achieve effective photon localization.

**Key words** optical devices; surface plasmon; metal-insulator-metal (MIM) waveguide; Bragg grating; nano micro-cavity

**OCIS codes** 140.3945; 240.6680; 050.2770

## 1 引 言

表面等离子体激元(SPPs)是局域在金属和电介质界面处传播的表面电磁模式<sup>[1]</sup>,它所激发的电场在金属和介质界面处达到最大值,且在垂直于界面方向分别向两侧呈指数性衰减。它具有很强的近场局域特性,在传播方向上波长更短,可以超越衍射极限的限制。利用表面等离子体这种特性的光学结构可以在亚波长尺度下对光子的限制。通过选择合适的结构参数,在金属-绝缘体-金属(MIM)波导结构中形成耦合的SPPs,对能量具有较强的束缚性,这有助于实现集成度更高的光子电路<sup>[2]</sup>。近年来,基于MIM波导结构的光学器件得到了广泛的研究与应用,例如滤波器<sup>[3]</sup>、布拉格反射器<sup>[4]</sup>、谐振器<sup>[5]</sup>、表面等离子体共振(SPR)传感器<sup>[6]</sup>等。在MIM波导结构中引入布拉格光栅结构,可以使表面等离子体的传播特性受到影响,具有光子禁带特性。目前,国内外已经研究了各种等离子布拉格光栅结构,例如通过周期性改变金属层材料构建波导结

收稿日期: 2014-09-05; 收到修改稿日期: 2014-12-05

基金项目: 国家自然科学基金(61172044, 61201112)

作者简介: 童 凯(1973—),男,博士,教授,主要从事光子晶体器件方面的研究。E-mail: tongkai@ysu.edu.cn

构<sup>[7]</sup>,或者交替堆叠绝缘层电介质材料来构建低损耗 MIM SPP 布拉格反射器<sup>[8-9]</sup>,为了进一步改善波导结构的性质,人们又提出构造 S 形状晶胞结构<sup>[10]</sup>以及应用准啁啾技术<sup>[11]</sup>等方法。

表面等离子激元布拉格光栅纳米微腔可减小微腔的模式体积  $V$ ,同时获得很大的  $Q/V$  值,从而有效地增大 Purcell 因子,增强光子与物质之间的相互作用,改变微腔的自发辐射率。文献[8]中提出了通过交替堆叠不同电介质材料构成的 MIM 波导结构构造布拉格反射器,但对于该结构的腔特性并没有详细分析。本文使用三维时域有限差分方法(3D-FDTD)研究了这种波导结构的微腔特性,分析了结构参数对品质因子及模式体积的影响,这种微腔结构在通信波段内可实现极小模式体积和很高的  $Q/V$  值。

## 2 表面等离子激元布拉格纳米微腔理论模型

### 2.1 MIM 波导色散特性

表面等离子激元布拉格光栅结构如图 1 所示,分别由两层金属和一层布拉格光栅构成。光栅结构形式为  $(AB)^N$ ,  $h$  表示绝缘层厚度,  $l_1$  和  $l_2$  分别为介质 A 和 B 的长度。

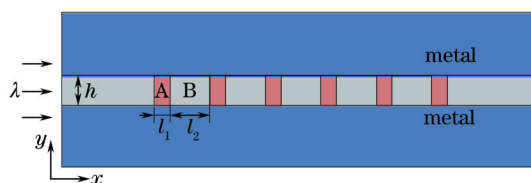


图 1 表面等离子激元布拉格光栅波导示意图

Fig.1 Schematic diagram of the surface plasmonic bragg grating structure

根据横磁(TM)模的模式本征方程,可得 MIM 波导中表面等离子激元色散方程<sup>[10]</sup>:

$$\tanh\left(\frac{\sqrt{\beta^2 - k_0^2 \epsilon_i}}{2} h\right) = \frac{-\epsilon_i \sqrt{\beta^2 - k_0^2 \epsilon_m}}{\epsilon_m \sqrt{\beta^2 - k_0^2 \epsilon_i}}, \quad (1)$$

式中  $\epsilon_i$  和  $\epsilon_m$  分别为绝缘层材料和金属层材料的介电常数,  $\beta$  为表面等离子激元的传播常数,  $k_0$  为真空中的波矢, MIM 波导结构的有效折射率为  $n_{\text{eff}} = \beta/k_0$ 。绝缘层介质分别选择硅(Si)和二氧化硅( $\text{SiO}_2$ ),金属层材料为银(Ag),根据(1)式可得入射波长为 1550 nm 时 MIM 波导的色散曲线如图 2 所示,当绝缘层厚度  $h$  为 100 nm 时,由图 2 可得 Ag-Si-Ag 和 Ag-SiO<sub>2</sub>-Ag 的有效折射率实部分别为  $\text{Re}(n_{\text{effA}}) = 4.278$  和  $\text{Re}(n_{\text{effB}}) = 1.741$ 。因此,根据布拉格公式  $\text{Re}(n_{\text{effA}})l_1 + \text{Re}(n_{\text{effB}})l_2 = n\lambda_b/2$  ( $\lambda_b$  为布拉格波长)可知,当  $l_1$  和  $l_2$  分别为 90 nm 和 224 nm 时波导谐振波长为 1550 nm。

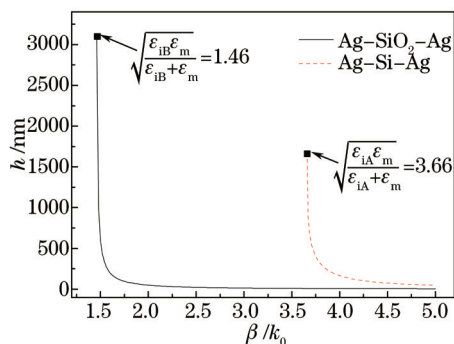


图 2 MIM 波导的色散曲线

Fig.2 Dispersive curves of MIM waveguide

### 2.2 微腔特性及传输特性

通过改变表面等离子激元布拉格光栅结构中心处绝缘层材料  $\text{SiO}_2$  的长度,在结构中引入缺陷,构造纳米微腔,如图 3(a)所示。绝缘层结构为  $(AB)^N C (AB)^N$  形式,  $l_c$  为缺陷腔的长度。

微腔内传播的谐振波相位变化必须满足共振条件<sup>[12]</sup>:

$$4\pi n_{\text{eff}} l_c / \lambda + \varphi_{r1}(\omega) + \varphi_{r2}(\omega) = 2m\pi, \quad (2)$$

式中  $\varphi_{r1}(\omega)$  和  $\varphi_{r2}(\omega)$  分别表示腔的左右端反射引起的位相变化,  $m$  为任意整数。对于图 3(a)所示的纳米微腔结构,只有当  $m=1$  时的谐振模波长  $\lambda_1$  与布拉格光栅结构对应的谐振波长  $\lambda_b$  相等时,光才能透出光子晶体<sup>[13]</sup>,形成缺陷模。此时入射场的位相改变  $\varphi_{r1}(\omega)$  和  $\varphi_{r2}(\omega)$  为零,则缺陷模波长  $\lambda = 2n_{\text{eff}} l_c$ ,因此当  $l_c = 448 \text{ nm}$  时微腔结构的谐振波长为  $1550 \text{ nm}$ 。

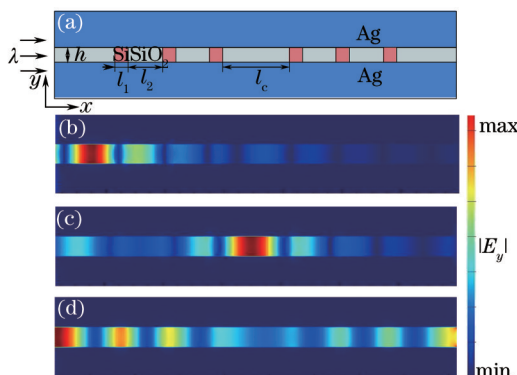


图3  $|E_y|$ 能量分布图。(a) 表面等离子纳米微腔结构;(b)  $\lambda=1300 \text{ nm}$ ;(c)  $\lambda=1550 \text{ nm}$ ;(d)  $\lambda=2250 \text{ nm}$

Fig.3  $|E_y|$  energy distribution. (a) Schematic for the surface plasmonic nano micro-cavity structure; (b)  $\lambda=1300 \text{ nm}$ ;  
(c)  $\lambda=1550 \text{ nm}$ ; (d)  $\lambda=2250 \text{ nm}$

采用 FDTD 方法进行模拟计算,针对图 3(a)所示结构,在  $x$  和  $y$  方向采用完美匹配层边界条件, $z$  方向采用周期边界条件,设定  $z=1 \mu\text{m}$ ,入射光沿  $x$  方向传播。可以得到周期数  $N$  为 3,微腔结构在入射波长分别为  $1300$ 、 $1550$ 、 $2250 \text{ nm}$  条件下的电场  $|E_y|$  的分布图。从图 3(b)~(d)可以看出,入射波长为  $1550 \text{ nm}$  时腔内的场强最大,这说明 SPP 能量被极大地局域在缺陷腔内,当入射波长( $1300 \text{ nm}$ )位于禁带内时光被完全反射不能通过波导结构,当入射波长( $2250 \text{ nm}$ )位于禁带外时入射光可以通过波导结构。

图 4 描述了周期数  $N$  从 1 到 4 时表面等离子布拉格波导的透射率。可以看出此时波导的布拉格谐振峰值波长为  $1550 \text{ nm}$ ,即该波长入射光可激发一个共振表面等离子缺陷模式,且随着周期数的增加波导透射率减小。这种现象可根据光栅最大反射率公式  $\gamma_{\text{max}} = \tanh^2(\kappa l)$  来解释,随着周期数的增加,  $\kappa = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\Delta n_{\text{eff}}}$  为常数,而光栅长度  $l$  增大,因此反射率  $\gamma_{\text{max}}$  增大,透射率减小。

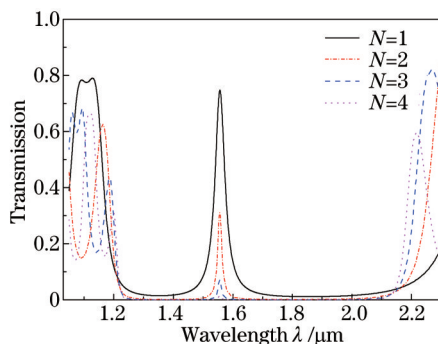


图4  $N$ 周期的表面等离子布拉格波导透射谱

Fig.4 Transmission spectra of  $N$ -period surface plasmonic Bragg waveguide

### 3 微腔特性仿真与理论研究

#### 3.1 计算理论

对于光学微腔,品质因子  $Q$  反映了腔存储能量的性能,是分析腔特性的重要参数,其定义为腔内存储的光能与衰减的光能的比值,可表示为<sup>[14]</sup>

$$Q = 2\pi E_{\text{stored}} / E_{\text{lost}} = \frac{\omega_0 W(t)}{P(t)} = \tau_{\text{photon}} \omega_0, \quad (3)$$

式中  $W(t)$  为腔总能量,  $P(t)$  为辐射功率, 其表达式为  $P(t) = -\frac{dW(t)}{dt}$ ,  $\tau_{\text{photon}}$  是腔内光子寿命,  $Q$  值越高腔存储能量的能力越强。等离子微腔品质因子  $Q$  主要由两种损耗途径来决定, 可以表示为  $\frac{1}{Q_{\text{tot}}} = \frac{1}{Q_{\text{rad}}} + \frac{1}{Q_{\text{abs}}}$ , 其中  $Q_{\text{rad}}$  和  $Q_{\text{abs}}$  分别与辐射损耗和金属的吸收损耗成反比。通过设定碰撞频率  $\gamma$  为零, 忽略了金属的吸收特性计算得到的品质因子即为  $Q_{\text{rad}}$ 。

表征微腔特性的另一个重要参数为模式体积  $V$ , 模式体积越小, 则表明模场的局域能力越好。可以通过计算空间电场总的能量积分与最大的电场能量比值获得, 进行归一化计算之后, 得到微腔模式体积  $V$  为

$$V = \frac{\iiint \varepsilon(\mathbf{r}) E^2(\mathbf{r}) d^3r}{[\varepsilon(\mathbf{r}) E^2(\mathbf{r})]_{\text{max}}} \quad (4)$$

### 3.2 周期数变化对腔特性的影响

设定布拉格光栅厚度为  $h = 100 \text{ nm}$ , 当改变周期数  $N$  时, 缺陷腔的谐振波长、品质因子、模式体积与光栅周期数关系如图 5 所示。由图 5(a) 可知, 随着周期数的增加, 谐振波长在  $1550 \text{ nm}$  附近波动。这是因为当入射波长为  $1550 \text{ nm}$  时, 入射场的位相与周期数变化无关, 然而由于结构参数的设计存在微小误差, 当周期数  $N$  变化时,  $n_{\text{eff}}$  和  $l_c$  不变,  $\varphi_L$  和  $\varphi_R$  有微小的变化, 导致了谐振波长在布拉格波长附近波动。图 5(b) 描述了纳米微腔的  $Q$  和  $V$  值与周期数  $N$  的关系, 可以看出, 随着周期数  $N$  的增大, 品质因子  $Q$  值也增大, 这是因为随着周期数的增加, 光栅结构的反射率越大, 电磁波在腔内谐振往返次数更多, 能量损耗速度更慢, 腔内的局域性更高。当周期数继续增大时,  $Q$  值逐渐趋于稳定, 这表明光栅结构提供的反馈作用对微腔性能的影响减弱, 主要受微腔长度和绝缘层厚度的影响,  $l_c$  和  $h$  不改变,  $Q$  值不再增加。同时微腔的模式体积  $V$  随着周期数  $N$  的增加而减小, 当  $N$  继续增加, 模式体积在  $0.0065 (\lambda/n)^3$  附近上下波动, 周期数增大到 9 时, 获得纳米腔的品质因子为 134.169, 模式体积为  $0.00645 (\lambda/n)^3$ , 从而得到该结构的  $Q/V = 20801.39$ 。

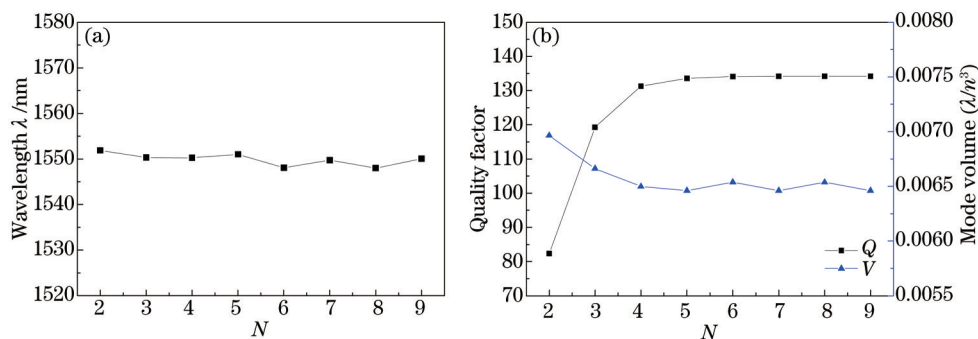


图 5 周期数对腔特性的影响。(a) 对谐振波长的影响; (b) 对模式体积和品质因子的影响  
Fig.5 Effects on the cavity characteristics with different number of periods. (a) Effects on the resonant wavelength; (b) mode volume and quality factor as a function of the grating number

### 3.3 绝缘层厚度对腔特性的影响

图 6(a) 描述了谐振波长与光栅层厚度  $h$  的关系, 可以看到随着  $h$  的增大谐振波长逐渐减小。由图 2 可知光栅层厚度  $h$  对有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的影响很明显, 当  $h$  增加时, 有效折射率  $\text{Re}(n_{\text{effA}})$  和  $\text{Re}(n_{\text{effB}})$  均减小, 则根据布拉格条件得到的布拉格波长减小, 满足共振条件的波长相应发生变化。由图 6(b) 可以看出随着光栅层厚度的增大, 品质因子  $Q$  值单调增加。这是因为光栅层厚度从  $50 \text{ nm}$  增加到  $140 \text{ nm}$  时, 微腔全损耗主要受吸收损耗的影响, 随着绝缘层厚度的增加谐振波长逐渐减少, 趋肤深度  $\delta = \sqrt{2/\mu\omega\sigma}$  随之减小, 则电场到金属中的渗透减小, 导致吸收损耗减小<sup>[15]</sup>, 因此品质因子  $Q$  随之增加。同时可以得到模式体积随着光栅层厚度增加而增大, 由于表面等离子微腔的模式体积极小, 因此得到较大的  $Q/V$  值, 且通过计算可以得到  $Q$  与  $V$  的比值随着绝缘层厚度的增加而减小。

### 3.4 微腔长度对腔特性的影响

图 7 为周期数  $N=3$ , 光栅层厚度  $h=100 \text{ nm}$  时, 缺陷腔长度  $l_c$  对腔特性的影响。由图 7(a) 可知  $l_c$  对谐振波长影响明显, 随着  $l_c$  增加, 谐振波长逐渐增加即向长波方向移动, 仅改变  $l_c$  并不影响  $\varphi_L$  和  $\varphi_R$ , 则由(2)式可知,  $l_c$  增

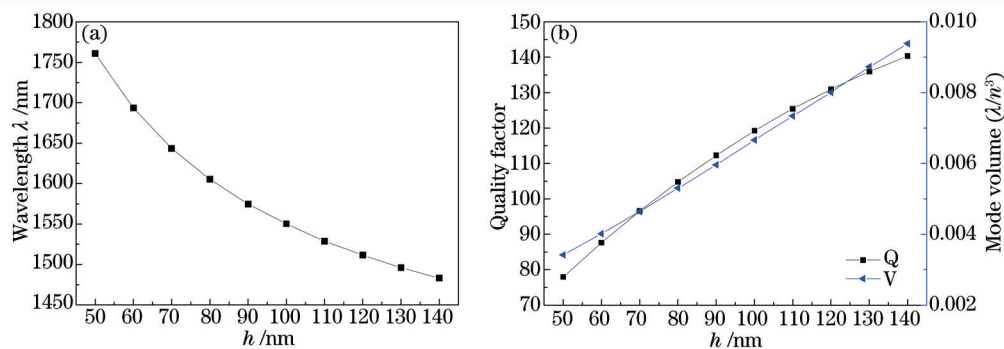


图6 绝缘层厚度对腔特性的影响。(a)对谐振波长的影响;(b)对模式体积和品质因子的影响

Fig.6 Effects on the cavity characteristics with different thicknesses of the insulating layer. (a) Effects on the resonant wavelength;

(b) mode volume and quality factor as a function with different thicknesses of the insulating layer

加,谐振波长随之增大。由图7(b)可以得到品质因子随着 $l_c$ 的增加先增大后减小,在 $l_c$ 为 $\lambda_b/2$ 时达到最大值,此时的谐振波长为1550 nm。当微腔长度 $l_c$ 从380 nm增加到460 nm时, $Q$ 值逐渐增加,这是因为当 $l_c$ 较小时,腔模受到限制, $Q$ 值较小,随着 $l_c$ 增大,模式得到优化, $Q$ 值增加。 $l_c$ 继续增加到560 nm, $Q$ 值逐渐减小,这是由于微腔长度增大到一定值时,光栅结构对光的限制能力减弱,因而 $Q$ 值减小。同时图7(b)描述了微腔长度变化对模式体积的影响,可以看出随着微腔长度的增加, $V$ 值先减小后增大,当 $Q$ 值处于较高值时,模式体积 $V$ 值保持在较小水平,当微腔长度从400 nm增加到460 nm时,模式体积从0.0081  $(\lambda/n)^3$ 降至0.0065  $(\lambda/n)^3$ ,此时 $V$ 值数量级并未发生改变。在 $l_c=460$  nm处 $Q$ 值取得到最大值, $V$ 值取得最小值,则 $Q/V$ 实现最大值。

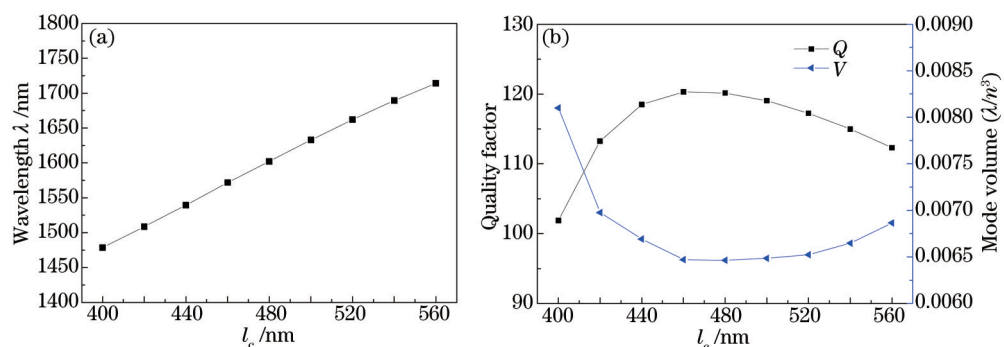


图7 微腔长度对腔特性的影响。(a)对谐振波长的影响;(b)对模式体积和品质因子的影响

Fig.7 Effect on the cavity characteristics with different micro-cavity lengths. (a) Effects on the resonant wavelength;

(b) mode volume and quality factor as a function of the cavity length

图8描述了微腔长度对总的品质因子 $Q_{tot}$ ,吸收损耗品质因子 $Q_{abs}$ 以及辐射损耗品质因子 $Q_{rad}$ 的影响。由图8可以看出吸收损耗品质因子 $Q_{abs}$ 与微腔长度无关,这是因为吸收损耗主要取决于金属层中的能量,微腔长度的改变对这部分能量没有影响。辐射损耗品质因子 $Q_{rad}$ 对于微腔长度的变化很敏感,随着微腔长度的增加先增大后减小,在 $l_c=360$  nm时取得最大值,表明微腔长度改变将会影响模式耦合。此外,总的品质因子 $Q_{tot}$ 随着腔长度的增加先增大后减小,由于 $y$ 方向的泄露损耗限制, $Q_{tot}$ 值随着 $Q_{rad}$ 的变化逐渐接近 $Q_{abs}$ 但不会达到 $Q_{abs}$ 。

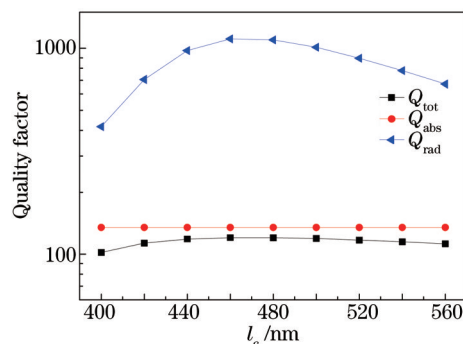


图8 腔长度对 $Q_{tot}$ 、 $Q_{abs}$ 、 $Q_{rad}$ 的影响

Fig.8 Quality factors  $Q_{tot}$ 、 $Q_{abs}$  and  $Q_{rad}$  of the micro-cavity versus length of the defect

## 4 结 论

利用时域有限差分方法分析了基于MIM波导结构的表面等离子激元布拉格纳米微腔的腔特性。研究了周期数、微腔长度以及绝缘层厚度对微腔的谐振波长、品质因数和模式体积等参数的影响。结果表明增加周期数,对腔的 $Q$ 值的提高有局限性,周期数增加到一定程度时, $Q$ 值将不再增加。缺陷腔长度和绝缘层厚度对谐振波长以及 $Q$ 值影响都很明显,可以通过选择合适的周期数以及缺陷腔长度、光栅层厚度来实现所需的光学器件结构。由于存在金属损耗和色散,这种等离子体微腔结构的 $Q$ 值比较低,但是对应的模式体积小,因此可以实现较大的 $Q/V$ 。这种反射器和微腔结构可被应用于光电环路、激光器、滤波器和光学开关中。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Quansheng, Tong Yuying, Zhuang Yuan, *et al.*. Unidirectional excitation of surface plasmon based on metallic slit-groove structure[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0510001.  
陈全胜, 佟玉莹, 庄园, 等. 基于金属狭缝-凹槽结构单向激发表面等离子体[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0510001.
- 2 Rashid Zia, Mark D Selker, Peter B Catrysse, *et al.*. Geometries and materials for subwavelength surface plasmon modes[J]. J Opt Soc Am A, 2004, 21(12): 2442-2446.
- 3 Luo Xin, Zou Xihua, Wen Kunhua, *et al.*. Narrow-band filter of surface plasmon based on dual-section metal-insulator-metal structure[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1123003.  
罗 昕, 邹喜华, 温坤华, 等. 双节MIM结构表面等离子体窄带光学滤波器[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1123003.
- 4 Jianqiang Liu, Lingling Wang, Mengdong He, *et al.*. A wide bandgap plasmonic Bragg reflector[J]. Opt Express, 2008, 16(7): 4888-4894.
- 5 Anders Pors, Sergey I Bozhevolnyi. Efficient and broadband quarter-wave plates by gap-plasmon resonators[J]. Opt Express, 2013, 21(3): 2942-2952.
- 6 Dongjin Lee, Haedong Yim, Seunggol Lee, *et al.*. Tiny surface plasmon resonance sensor integrated on silicon waveguide based on vertical coupling into finite metal-insulator-metal plasmonic waveguide[J]. Opt Express, 2011, 19(21): 19895-19900.
- 7 Bing Wang, Guoping Wang. Plasmon Bragg reflectors and nanocavities on flat metallic surfaces[J]. Appl Phys Lett, 2005, 87(1): 013107.
- 8 Amir Hosseini, Yehia Massoud. A low-loss metal-insulator-metal plasmonic Bragg reflector[J]. Opt Express, 2006, 14(23): 11318-11323.
- 9 Amir Hosseini, Hamid Nejati, Yehia Massoud. Modeling and design methodology for metal-insulator plasmonic Bragg reflectors[J]. Opt Express, 2008, 16(3): 1475-1480.
- 10 Zhanghua Han, Erik Forsberg. Surface plasmon Bragg gratings formed in metal-insulator-metal waveguides[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2007, 19(2): 91-93.
- 11 Yongkang Gong, Leiran Wang, Xiaohong Hu, *et al.*. Broad-bandgap and low-sidelobe surface plasmon polariton with Bragg-grating-based MIM waveguide[J]. Opt Express, 2009, 17(16): 13727-13736.
- 12 Ju Dongquan, Bai Yang, Zhao Wenyu, *et al.*. Tailored unidirectional spectral responses generated by an asymmetric plasmonic cavity [J]. J Opt Soc Am B, 2014, 31(12): 3067-3073.
- 13 Tong Kai, Cui Weiwei, Wang Meiting, *et al.*. Temperature measurement with one dimensional defect photonic crystal[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(2): 762-766.  
童 凯, 崔卫卫, 汪梅婷, 等. 一维缺陷光子晶体温度的测量[J]. 物理学报, 2008, 57(2): 762-766.
- 14 Feng Chen, Feng Guoying, Zhou Hao, *et al.*. Characteristic analysis on photonic crystal laser cavity with one-dimensional photonic bandgap[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0802009.  
冯 琛, 冯国英, 周 昊, 等. 一维光子带隙光子晶体激光腔的特性分析[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0802009.
- 15 Soonhong Kwon. Deep subwavelength plasmonic whispering-gallery-mode cavity[J]. Opt Express, 2012, 20(22): 24918-24924.

栏目编辑: 张 雁