

# 表面等离子体激元微盘的优化设计及应用

卢启景<sup>1</sup> 吴根柱<sup>1,2,3</sup> 陈达如<sup>1,2</sup> 刘 军<sup>1,2</sup> 刘旭安<sup>1,2</sup> 周 沛<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 浙江师范大学光学信息研究所, 浙江 金华 321004

<sup>2</sup> 浙江师范大学与浙江大学光学联合研究实验室, 浙江 杭州 310058

<sup>3</sup> 中国科学院上海微系统与信息技术研究所信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050

**摘要** 表面等离子体激元(SPP)微腔具有很高的品质因子和极小的模式体积,在光电子器件研究方面具有重要的应用价值。采用有限元法对表面等离子体激元的金属覆盖介质微盘谐振腔进行理论模拟,研究考虑微盘底半径、介质层厚度及金属膜厚度等参数对微盘表面等离子体模的品质因子及模体积的影响。研究表明,在光通信波段 1550 nm 附近获得高品质因子(1000 以上),极低模式体积的表面等离子体微盘。最后研究了利用优化设计的微盘进行折射率传感的应用,获得了高达 300 nm/RIU 的折射率传感灵敏度。

**关键词** 激光技术;光学微腔;回音壁模式;表面等离子体激元;有限元法

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0714002

## Optimal Design and Application of Surface Plasmon Polaritons Microdisk

Lu Qijing<sup>1</sup> Wu Genzhu<sup>1,2,3</sup> Chen Daru<sup>1,2</sup> Liu Jun<sup>1,2</sup> Liu Xu'an<sup>1,2</sup> Zhou Pei<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China

<sup>2</sup> Joint Research Laboratory of Optics of Zhejiang Normal University and Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China

<sup>3</sup> State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

**Abstract** Surface plasmon polaritons microcavities have attracted considerable attention due to their high quality factor, ultra-small mode volume and wide applications in optoelectronic devices. A kind of surface plasmon polaritons metal-coated microdisk resonator is theoretically simulated and optimized by using finite element method. The quality factor and mode volume of the plasmonic mode of the microdisk are theoretically investigated by considering different parameters of the microdisk such as the bottom radius, the thickness of dielectric, and the thickness of metal coating. High quality factor ( $>1000$ ), ultra-small mode volume surface plasmon polaritons microcavities are achieved for the optical telecommunication wavelength around 1550 nm. Finally, a refractive index sensing application of the optimized microdisk is also investigated, which achieves a high sensitivity of 300 nm/RIU.

**Key words** laser technique; optical microcavity; whispering gallery mode; surface plasmon polaritons; finite element method

**OCIS codes** 140.4780; 140.3410; 140.3945

## 1 引 言

近年来,基于回音壁模式(WGM)的光学微腔<sup>[1]</sup>引起了众多学者的研究兴趣。从光线理论的角度理

解,WGM模式是指介质微腔中光场在满足表面全反射条件下围绕腔内壁形成的闭合稳定传播模式。正是由于光学微腔的这种模式,它可以把光能量限制在

**收稿日期:** 2011-12-28; **收到修改稿日期:** 2012-02-29

**基金项目:** 浙江省自然科学基金(Y1100041)、浙江省重点科技创新团队(2010R50007)、浙江师范大学创新团队和信息功能材料国家重点实验室开放课题资助课题。

**作者简介:** 卢启景(1986—),男,硕士研究生,主要从事表面等离子体微腔方面的研究。E-mail: luqijing126@126.com

**导师简介:** 吴根柱(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事半导体微腔激光器方面的研究。

E-mail: wugenzhu@zjnu.cn(通信联系人)

很小的空间内,因此腔中的能量密度极大<sup>[2]</sup>。由于此类模式的微腔有极高的品质因子  $Q$  和极低的模式体积  $V$  以及相对简单的制作过程,所以它在要求极细线宽、极高能量密度极高亮度和极细微探测能力的场合中得到重要应用,比如非线性光学<sup>[3,4]</sup>和腔量子电动力学<sup>[5,6]</sup>以及传感器<sup>[7,8]</sup>和极低阈值激光器<sup>[9]</sup>方面都有很广泛的应用。

$Q$  值是对谐振腔光能量储存以及使光循环能力的定量描述,通常定义为微谐振腔储存的能量以及消散能量之间的比值。在实际应用的器件中,微腔的高  $Q$  值意味着谐振行距窄、衰减时间长、光的亮度高;同时,更加紧凑的微腔(低  $V$  值)能满足大规模集成以及在宽波长范围内的单模式工作的要求,所以一直以来人们的研究重点都放在实现微腔的高  $Q$  值、低  $V$  值。但是人们在追求 WGM 微腔极低模式体积同时保持高品质因子的过程中遇到了瓶颈,因为在微腔的尺寸变小(波长或亚波长量级)的时候,由于光学衍射极限的限制,微腔的辐射损耗急剧增加, $Q$  值随着腔的尺寸的减小是以指数形式降低的。因此,高  $Q$  值的光波长尺寸的微谐振腔是难以制造的,也就是说高  $Q$  值的要求和紧凑性能(低  $V$  值)是自相矛盾的。

表面等离子体激元(SPP)<sup>[10,11]</sup>以其特殊的光学性质成为解决上述问题的理想方案,因为 SPP 的电磁场具有很强的表面束缚性,可以突破衍射极限。SPP 微腔<sup>[12~14]</sup>把 SPP 和微腔的共振特性结合起来,不仅利用 SPP 可以极大程度上突破衍射极限,而且利用微腔的共振特性进一步增强腔内能量,因此受到了越来越多的关注。SPP 微腔和光学微腔类似,不同之处在于微腔中束缚的模式不是光学模式,而是 SPP 模式。SPP 微腔也是利用边界对 SPP 的束缚,使 SPP 在金属-介质面高度局域,使 SPP 微腔模式的模式体积可以达到很小<sup>[15,16]</sup>,并且保持相对较高的品质因子,所以这种模式的微腔具有极高的能量密度。这种 SPP 微腔,由于金属的吸收损耗比较大, $Q$  值都不是很高<sup>[17,18]</sup>,最高的也只能达到 1140<sup>[19]</sup>。本文运用有限元方法(FEM)对表面等离子体激元的金属膜覆盖介质的微盘进行优化设计,重点分析微盘底半径、金属膜厚度的改变对微腔的  $Q$  值、模式体积以及二者比值的影响,并从多方面进行理论分析,最终获得高品质因子(1000 以上)、极低模式体积的微腔。最后研究了利用优化设计的微盘进行折射率传感的应用。

## 2 数值模拟及理论分析

SPP 微盘的结构如图 1 所示,盘芯是楔形二氧化硅微盘,采用光刻、干法刻蚀和湿法刻蚀<sup>[20]</sup>得到,最后在微盘表面镀上一层金属膜,本文模拟的金属膜为银膜。之所以选择银,是因为银在光通信波段 1550 nm 附近损耗较小。室温下在 1550 nm 波段,二氧化硅和银介电常数<sup>[21]</sup>分别表示  $\epsilon_1 = 1.444^2$ ,  $\epsilon_2 = -129 + 3.3i$ 。假设盘周围为真空,则腔周围介质的介电常数为  $\epsilon_3 = n_3^2 = 1$ 。在以下的计算中,本文设定波长在 1550 nm 附近、微盘厚度  $d = 2 \mu\text{m}$ 、微盘楔角  $\alpha = 33^\circ$  以及介电常数为  $\epsilon_{1,2,3}$ ,改变微盘底半径  $R_b$  和银膜厚度  $t$ 。为了能够直观地展现出微盘内的模式,运用一种全矢量本征模式求解器<sup>[22]</sup>进行数值模拟。SPP 微盘谐振腔内的本征模式有两种不同的类别:

1) 在金属-介质交界面存在的表面等离子激元模式 SPP<sub>qm</sub>,其中  $q$  为等离子体模式的径向模式数, $m$  为方位角模式数

$$H(r, \phi, z) = H_{\text{SPP}}^{qm}(r, z) \exp(im\phi); \quad (1)$$

2) 介质中存在的光学介质本征模式 DE<sub>hm</sub>,其中  $h$  为介质模式的径向模式数, $m$  为方位角模式数

$$H(r, \phi, z) = H_{\text{DE}}^{hm}(r, z) \exp(im\phi). \quad (2)$$

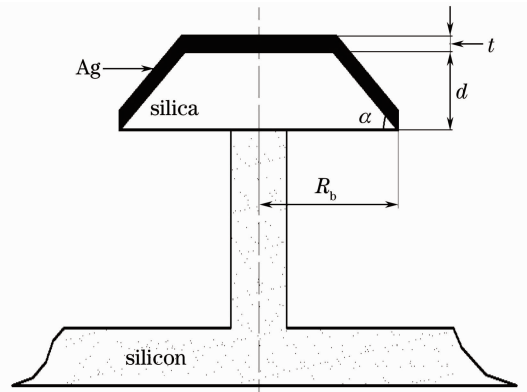


图 1 SPP 微盘截面图

Fig. 1 Cross-section of the SPP microdisk

图 2(a)~(c)分别为 SPP 一阶模, SPP 二阶模, 光学介质一阶模。以下只讨论 SPP 一阶模式。

从 SPP 共振腔特性可知,衡量此类微腔仍可以采用传统光学微腔中定义的参数品质因子  $Q$ ,但对于 SPP 微腔,由于金属吸收损耗的存在, SPP 微腔理论  $Q$  定义为

$$\frac{1}{Q} \approx \frac{1}{Q_{\text{rad}}} + \frac{1}{Q_{\text{abs}}}, \quad (3)$$

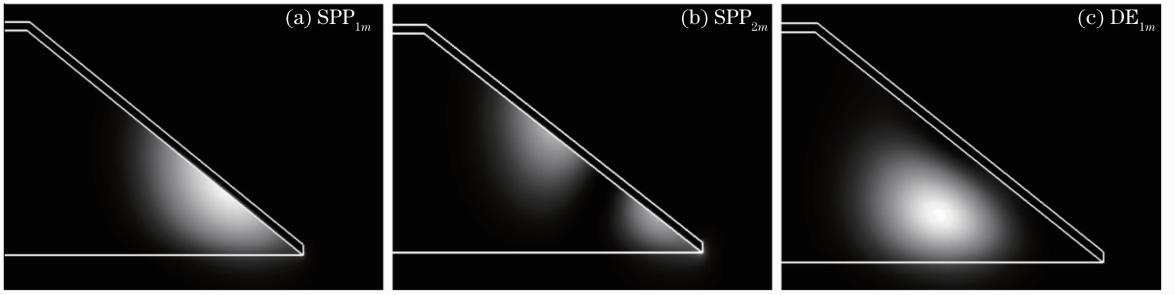


图 2 模场分布图。(a) SPP 一阶模；(b) SPP 二阶模；(c) 光学介质一阶模

 Fig. 2 Field distributions of the different modes. (a)  $SPP_{1m}$ ; (b)  $SPP_{2m}$ ; (c)  $DE_{1m}$ 

式中  $1/Q_{rad}$ 、 $1/Q_{abs}$  分别代表腔的辐射损耗、金属的吸收损耗(二氧化硅的吸收损耗相对于金属的吸收损耗可以忽略不计<sup>[5,22,23]</sup>)。需要说明的是,这时的  $Q$  值是理论值,忽略了由于腔表面的不光滑造成的散射损耗及微腔外环境(比如空气湿度)对腔  $Q$  值的影响。此时,微腔品质因子  $Q$  值及模式体积  $V$  可由以下公式计算出<sup>[23]</sup>:

$$Q = \text{Re}(\omega)/2\text{Im}(\omega), \quad (4)$$

$$V = \int \omega d^3x / \max(\omega), \quad (5)$$

(4)式中  $\omega$  为求解复合本征频率,在(5)式中  $\omega(\omega = [\text{d}\epsilon(\mathbf{r})/\text{d}\omega |E|^2 + \mu_0 |H|^2]/2)$ ,其中  $E, H$  分别为电场,磁场, $\epsilon, \mu_0$  分别为介质介电常数,真空磁导率)为能量密度<sup>[24]</sup>。注意,当微盘底半径大于  $10 \mu\text{m}$  时,  $Q_{rad}$  值在  $10^6$  以上,例如当  $d=10 \mu\text{m}$ ,  $t=80 \text{ nm}$  时,  $Q_{rad}=7.0 \times 10^6$ ,辐射损耗很小,对 SPP 微腔理论品质因子  $Q$  没有影响,可以忽略,所以此时 SPP 微腔理论品质因子  $Q$  主要受金属吸收损耗的限制,即  $Q \approx Q_{abs}$ 。但是当微盘底半径小于  $10 \mu\text{m}$  时,此时不可忽略辐射损耗,这时必须先用(4)式求出  $Q_{abs}$ 、忽略金属介电常数的虚部<sup>[19]</sup>(即  $\epsilon_2 = -129$ )用(4)式求出的即为  $Q_{rad}$ ,然后再用(3)式求出模式的总品质

因子。

本文系统计算了金属膜厚度  $t$  分别在  $40, 60, 80, 100, 120, 140 \text{ nm}$ (在这个厚度范围内,足以将光限制在微盘内)下,微盘底半径  $R_b$  从  $5 \mu\text{m}$  变化到  $50 \mu\text{m}$  时,腔内  $SPP_{1m}$  模式的  $Q$  值及  $V$  的变化,如图 3 所示。图 3(a) 为  $SPP_{1m}$  模式的  $Q$  值的变化曲线,从图中可以看出,当  $R_b$  增大时,  $Q$  值是单调增长的,这是因为  $R_b$  增大时,吸收损耗系数变小导致  $Q$  值增加,而且在不同的  $t$  下,  $Q$  值也不一样。在  $R_b$  一定的情况下,当  $t$  从  $40 \text{ nm}$  增加到  $80 \text{ nm}$  时,  $Q$  值变大;当  $t$  从  $80 \text{ nm}$  增加到  $140 \text{ nm}$  时,  $Q$  值变小,可以看出,  $t$  为  $80 \text{ nm}$  时  $Q$  值最大。当  $R_b$  为  $5 \mu\text{m}$  时,由于辐射损耗的急剧增加导致模式的  $Q$  值很低(100 多),当  $R_b$  进一步减小时,不会有等离子体模式的出现。从图 3(b) 中可以看出,模式体积  $V$  随  $R_b$  的变大而增加,但  $t$  的变化,对模式体积没有太大影响。

由于很多物理过程不是仅仅和  $Q$  值有关的,和模式体积  $V$  也是有关的,比如自发辐射的 Purcell 因子正比于  $Q/V$ 、物质-光子强耦合效应正比于  $Q/\sqrt{V}$ 、拉曼激光器阈值正比于  $V/Q^2$  以及生物分子探测的灵敏度正比于  $Q/V$  等。因此如何实现高  $Q/V$  是本文的研究重点。

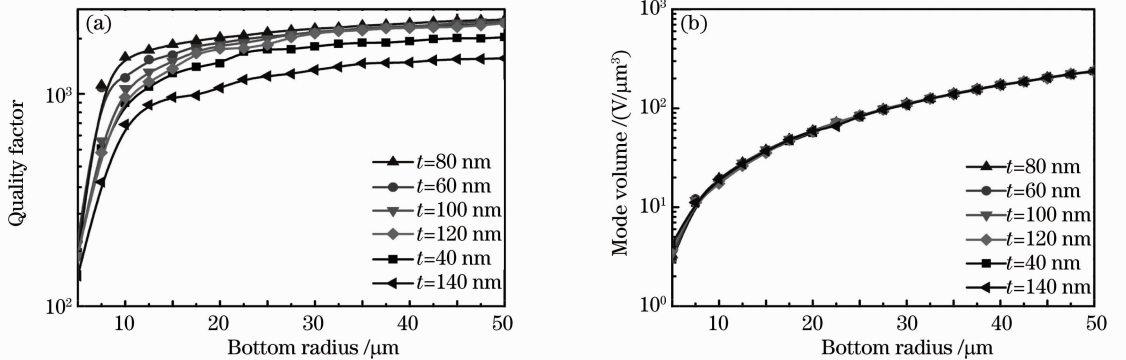


图 3 不同银金属膜厚度下,  $SPP_{1m}$  模式的 (a)  $Q$  值和 (b) 模体积随微盘底半径改变的变化曲线  
Fig. 3 Curves of  $Q$  factor (a) and mode volume (b) of  $SPP_{1m}$  mode versus bottom radius with different thicknesses of silver coating

为此,计算了不同金属膜厚度和不同微盘底半径下的 $\lambda^3 Q/V$ 值(见图4),其中模体积 $V$ 用波长的立方进行归一化。从图4中可以看出,金属膜厚度在40、60、80 nm下, $\lambda^3 Q/V$ 值在微盘底半径 $R_b = 7.5 \mu\text{m}$ 时有最大值,而金属膜厚度在100、120、140 nm下,在微盘底半径 $R_b = 10 \mu\text{m}$ 时有最大值。在 $R_b = 5 \mu\text{m}$ 处,由于模体积的急剧减小微腔还保持较高的 $\lambda^3 Q/V$ 值,但从图3(a)中可以看出,此时微腔 $Q$ 值很小,低 $Q$ 值的微腔在实验中很难实现。在设计微腔时,必须从实现高 $\lambda^3 Q/V$ 值、高 $Q$ 值这两方面考虑。所以,综合图3和图4计算的结果得到,微腔底半径在 $7.5 \sim 10 \mu\text{m}$ 、银膜厚度在 $60 \sim 80 \text{ nm}$ 时,可以获得高 $\lambda^3 Q/V$ 值、高 $Q$ 值的微腔。在此范围内,微腔 $Q$ 值保证在1000以上,比一般的等离子体微腔要高很多<sup>[19,23,25,26]</sup>,例如当 $R_b = 10 \mu\text{m}$ 、 $t = 80 \text{ nm}$ 时,品质因子 $Q$ 值可达到1486。

下面从辐射损耗、吸收损耗、模式能量在介质中的分布这几个方面来详细分析模式品质因子的变化原因(计算时设定金属膜厚度 $t = 80 \text{ nm}$ )。

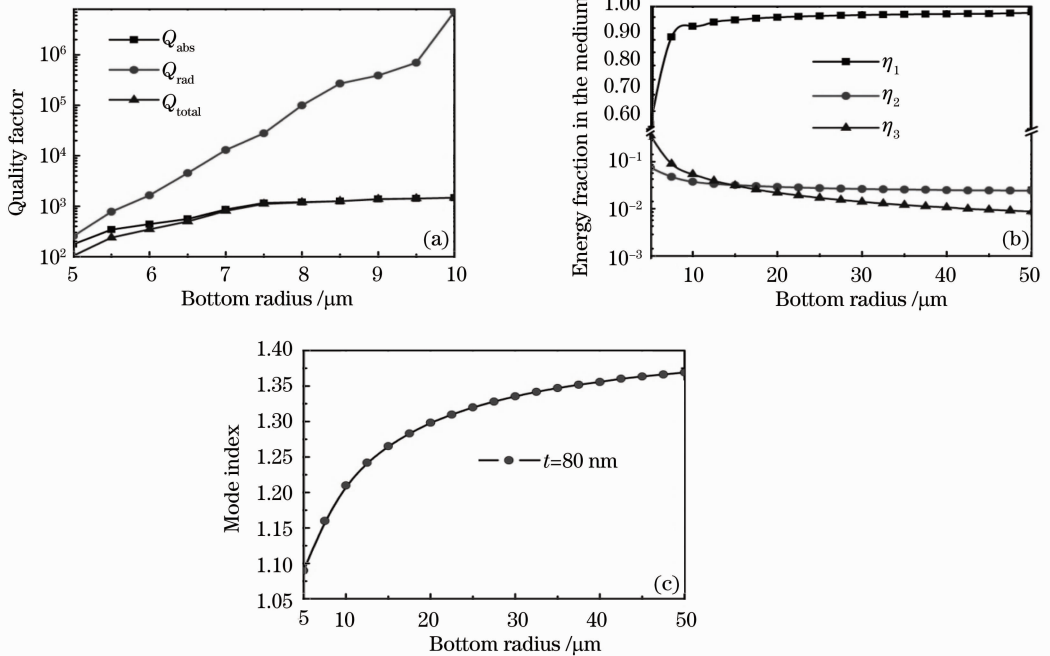


图5 在银膜厚度 $t = 80 \text{ nm}$ 下。(a)  $\text{SPP}_{1m}$ 模式总品质因子 $Q_{\text{total}}$ 、吸收损耗相关的品质因子 $Q_{\text{abs}}$ 、辐射损耗相关的品质因子 $Q_{\text{rad}}$ ; (b)  $\text{SPP}_{1m}$ 模式的能量在二氧化硅、银膜、腔外周围介质中的分布分数比例 $\eta_{1,2,3}$ ; (c)  $\text{SPP}_{1m}$ 模式的有效折射率 $n_e$ 随微盘底半径的变化

Fig. 5 (a) Total, absorption-related and radiation-related, quality factors, namely,  $Q_{\text{total}}$ ,  $Q_{\text{abs}}$ , and  $Q_{\text{rad}}$ ; (b) energy distribution fraction  $\eta_{1,2,3}$  in silica, silver coating and surrounding medium, respectively; (c) mode index of the  $\text{SPP}_{1m}$  mode depending on the bottom radius. Here,  $t = 80 \text{ nm}$

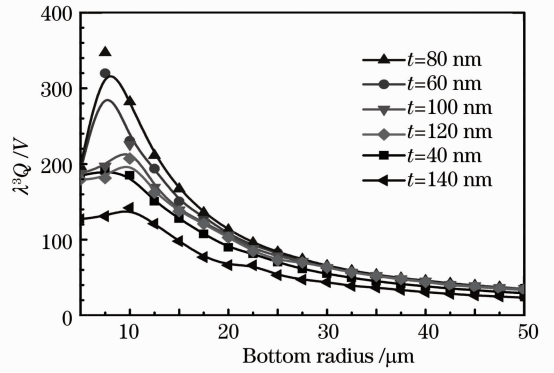


图4 不同银金属膜厚度下, $\text{SPP}_{1m}$ 模式的 $\lambda^3 Q/V$ 值随微盘底半径改变的变化曲线

Fig. 4 Curves of  $\lambda^3 Q/V$  factor of  $\text{SPP}_{1m}$  mode versus bottom radius with different thicknesses of silver coating

从图5(a)中可以看出,当微盘底半径从 $10 \mu\text{m}$ 减小到 $5 \mu\text{m}$ 时, $Q_{\text{rad}}$ 有明显的下降,此时辐射损耗非常大,已不能忽略辐射损耗对腔品质因子的影响;并且 $Q_{\text{abs}}$ 也有很明显的下降,表明当微盘尺寸减小时,有更多的能量渗透到金属膜中,微腔的损耗已经



非常严重,所以造成了总品质因子的下降。为了从另一个角度解释微腔品质因子的变化,计算了微盘尺寸变化时  $SPP_{1,m}$  模式的能量在二氧化硅、银膜、腔外介质中的分布比例  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$ 。如图 5(b) 所示,当微盘底半径变小时,  $\eta_1$  减小,  $\eta_2, \eta_3$  增大,当微盘底半径从  $10 \mu\text{m}$  减小到  $5 \mu\text{m}$  时,这一趋势特别明显。 $\eta_1$  的减小代表腔总品质因子的减小,  $\eta_2$  的增大代表金属吸收损耗的增加,  $\eta_3$  的增大代表散射损耗的增加,  $\eta_2, \eta_3$  的增大导致了腔品质因子的减小和图 5(a) 中计算分析结果一致。

同时还计算了模式有效折射率  $n_c$  的变化,如图 5(c) 所示,有效折射率的计算公式如下:

$$n_c = mc / 2\pi R_b f, \quad (5)$$

式中  $m$  为径向模式数,  $f$  为求解的本征频率。当微盘尺寸增加时,有效折射率随之增加。模式有效折射率是非常重要的一个参数,是因为它决定了当用锥形光纤波导激发 SPP 模式时的相位匹配条件<sup>[19]</sup>。当一个微腔尺寸给定后,腔内各模式的有效折射率也就定了,也就是说锥形光纤波导内模式的有效折射率一定要和腔内要激发的模式的有效折射率相匹配才能激发该模式并耦合到波导内。

### 3 SPP 微腔在传感方面的应用

微盘内的  $SPP_{1,m}$  模式可以用锥形光纤波导激发,所以通过此类方法可以将  $SPP_{1,m}$  模式耦合到光纤中,以此可以得到该模式的共振谱线。当外界环境(比如折射率、温度、压强)改变时会使腔内谐振波长移动,而谱线移动可以准确地测量出来,所以这类微腔可以作为传感器件<sup>[27]</sup>,并且具有很高的灵敏度。利用本文设计的模型( $R_b = 10 \mu\text{m}, t = 80 \text{ nm}$ ),当盘外周围介质的折射率改变时,可以计算出腔内谐振

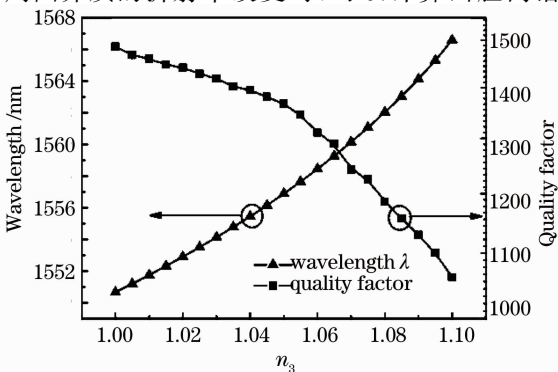


图 6  $n_3$  变化时的波长移动及 Q 值的变化曲线

Fig. 6 Curves of wavelength and Q factor for different  $n_3$

波长的移动,如图 6 所示。图中计算是当折射率改变 0.005 的情况下,记录腔内波长的移动,结果具有很高的灵敏度,能够达到  $300 \text{ nm}/\text{RIU}$  (每单位折射率改变时波长的改变值),所以可以把此类微腔应用到湿度传感器上,可以通过观察腔内谐振波长的漂移,以此确定外部空气的折射率及湿度值。同时当腔外折射率变化时,  $SPP_{1,m}$  模式的 Q 值也有下降,从这个角度也能看出,表面等离子体激元的微腔对腔外折射率的变化非常敏感。

### 4 结 论

本文优化设计了表面等离子体激元微盘,运用有限元法研究了等离子体激元的微盘的模式特性。重点分析了盘尺寸、金属膜厚度、辐射损耗和吸收损耗对  $SPP_{1,m}$  模式品质因子 Q、模体积 V 的影响。数值模拟结果表明,在光通讯波段  $1550 \text{ nm}$  附近,对厚度  $d = 2 \mu\text{m}$ 、微盘楔角  $\alpha = 33^\circ$  的带有银金属膜的微盘,底半径在  $7.5 \sim 10 \mu\text{m}$ 、银膜厚度在  $60 \sim 80 \text{ nm}$  时,可以获得高  $\lambda^3 Q/V$  值、高 Q 值(1000 以上)的微腔,并从模式的损耗和能量分布两方面分析品质因子变化的原因;同时计算模式有效折射率的变化,为锥形光纤波导和微盘内的模式耦合提供依据。最后探讨了此类表面等离子体激元的微盘用于传感器件的可能性。结果表明,当盘外周围空气湿度变化时,腔内谐振波长的移动灵敏度可达  $300 \text{ nm}/\text{RIU}$ ,具有很高的灵敏度。

### 参 考 文 献

- 1 K. J. Vahala. Optical microcavities [J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 839~846
- 2 R. W. Boyd, J. E. Heebner. Sensitive disk resonator photonic biosensor[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(31): 5742~5747
- 3 A. Polman, B. Min, J. Kalkman *et al.*. Ultra-low threshold erbium-implanted toroidal microlaser on silicon[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(7): 1037~1039
- 4 T. Carmon, K. Vahala. Visible continuous emission from a silica microphotonic device by third-harmonic generation [J]. *Nat. Phys.*, 2007, **3**(6): 430~435
- 5 S. M. Spillane, T. J. Kippenberg, K. J. Vahala *et al.*. Ultrahigh-Q toroidal microresonators for cavity quantum electrodynamics[J]. *Phys. Rev. A*, 2005, **14**(3): 1094~1105
- 6 T. Aoki, B. Dayan, E. Wilcut *et al.*. Observation of strong coupling between one atom and a monolithic microresonator[J]. *Nature*, 2006, **443**(7112): 671~674
- 7 Gu Zhengtian, Feng Shimeng, Liang Peihui *et al.*. Sol-gel film sensor based on surface plasmon resonance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 83~87
- 8 顾铮天, 冯仕猛, 梁培辉 等. 表面等离子体激元共振溶胶-凝胶薄膜传感器[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 83~87
- 9 L. Maleki, A. B. Matsko, A. A. Savchenkov *et al.*. Tunable delay line with interacting whispering-gallery-mode resonators

- [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **17**(1): 626~628
- 9 C. H. Dong, Y. F. Xiao, Z. F. Han *et al.*. Low-threshold microlaser in Er: Yb phosphate glass coated microsphere[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(5): 342~344
- 10 E. Ozbay. Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions[J]. *Science*, 2006, **311**(5758): 189~193
- 11 Zhou Lin, Zhu Yongyuan. Propagation characteristics of surface plasmon polaritons in a metal heterowaveguide array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1047~1050  
周 林, 朱永元. 金属异质波导阵列中的表面等离子体元传播特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1047~1050
- 12 A. Hosseini, Y. Massoud. Nanoscale surface plasmon based resonator using rectangular geometry[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(18): 181102
- 13 H. T. Miyazaki, Y. Kurokawa. Squeezing visible light waves into a 3-nm-thick and 55-nm-long plasmon cavity[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(9): 097401
- 14 C. E. Hofmann, E. J. R. Vesseur, L. A. Sweatlock *et al.*. Plasmonic modes of annular nanoresonators imaged by spectrally resolved cathodoluminescence[J]. *Nano Lett.*, 2007, **7**(12): 3612~3617
- 15 Y. Song, J. Wang, M. Yan *et al.*. Subwavelength hybrid plasmonic nanodisk with high Q factor and Purcell factor[J]. *J. Opt.*, 2011, **13**(7): 075001
- 16 S. A. Maier. Plasmonic field enhancement and SERS in the effective mode volume picture[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(5): 1957~1964
- 17 H. Ditlbacher, A. Hohenau, D. Wagner *et al.*. Silver nanowires as surface plasmon resonators[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **95**(25): 257403
- 18 H. T. Miyazaki, Y. Kurokawa. Squeezing visible light waves into a 3-nm-thick and 55-nm-long plasmon cavity[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(9): 097401
- 19 B. Min, E. Ostby, V. Sorger *et al.*. High-Q surface-plasmon-polariton whispering-gallery microcavity [J]. *Nature*, 2009, **457**(7228): 455~458
- 20 D. K. Armani, T. J. Kippenberg, S. M. Spillane *et al.*. Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip [J]. *Nature*, 2003, **421**(6926): 925~928
- 21 P. B. Johnson, R. W. Christy. Optical constants of the noble metals[J]. *Phys. Rev. B*, 1972, **6**(12): 4370~4379
- 22 M. Oxborrow. Traceable 2-D finite-element simulation of the whispering-gallery modes of axisymmetric electromagnetic resonators[J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, 2007, **55**(6): 1209~1218
- 23 C. L. Zou, Y. F. Xiao, Z. F. Han. High-Q surface-plasmon-polariton whispering-gallery microcavity[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(12): 2495~2498
- 24 R. F. Oulton, V. J. Sorger, D. A. Genov. A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement and long-range propagation[J]. *Nat. Photonics*, 2008, **2**(8): 496~500
- 25 Y. F. Xiao, C. L. Zou, B. B. Li *et al.*. High-Q exterior whispering-gallery modes in a metal-coated microresonator[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, **105**(15): 153902
- 26 E. J. R. Vesseur, F. J. García de Abajo, A. Polman. Modal decomposition of surface-plasmon whispering gallery resonators[J]. *Nano Lett.*, 2009, **9**(9): 3147~3150
- 27 Lü Qiang, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua *et al.*. Sensitivity of surface plasma resonance sensor for different wavelengths[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 972~976  
吕 强, 黄德修, 元秀华 等. 不同波长下表面等离子体共振传感器的灵敏度[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 972~976

栏目编辑: 韩 峰