

doi: 10.3788/gzxb20154406.0624002

# 混合表面等离子体微盘腔模式特征及传感特性

张蒙<sup>1,2</sup>, 吴根柱<sup>1,2,3</sup>, 王聪<sup>1,2</sup>, 刘彬斌<sup>1,2</sup>, 陈达如<sup>1,2</sup>

(1 浙江师范大学 信息光学研究所; 浙江省光信息检测与显示技术研究重点实验室, 浙江 金华 321004)

(2 浙江师范大学 与浙江大学光学联合研究实验室, 杭州 310058)

(3 浙江师范大学 行知学院, 浙江 金华 321004)

**摘要:**为了实现高  $Q$  值极小模体积的表面等离子体微腔, 提出一种混合表面等离子体微盘腔, 介质微盘上放置横截面为矩形的金属纳米环形条, 微盘腔中间由低折射率材料隔离。用有限元法对混合微腔的模式特性进行数值模拟, 研究了其品质因子、有效模式体积和腔外能量比随器件几何尺寸的变化规律。结果表明, 所设计微盘腔具有较低的传播损耗、较强的光场约束能力和较高的腔外能量比, 品质因子高达 7 000, 最小模体积仅为  $0.315 \mu\text{m}^3$ , 可实现高灵敏度折射率传感。

**关键词:**混合表面等离子体微腔; SPP-WG 混合模式; 品质因子; 有效模式体积; 高灵敏度传感

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)06-0624002-5

## Mode and Sensing Properties of Hybrid Plasmonic Microcavity

ZHANG Meng<sup>1,2</sup>, WU Gen-zhu<sup>1,2,3</sup>, WANG Cong<sup>1,2</sup>, LIU Bin-bin<sup>1,2</sup>, CHEN Da-ru<sup>1,2</sup>

(1 Institute of Information Optics; Key Laboratory of Researching Optical Information Detecting and Display Technology of Zhejiang Province, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

(2 Joint Research Laboratory of Optics of Zhejiang Normal University and Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

(3 Xingzhi College, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

**Abstract:** A hybrid plasmonic microcavity consisting of a silicon microdisk which is separated from a silver toroidal strip by a low-permittivity dielectric is proposed to achieve high quality factor as well as small mode volume. Mode properties such as quality factor, effective mode volume and energy ratio have been investigated by employing a finite element method and analyzed considering the different structure geometry. Simulation results reveal that this kind of hybrid microcavity maintains low propagation loss with high quality factor  $\sim 7000$ , high field limits with small mode volume  $0.315 \mu\text{m}^3$ , high energy ratio and can realize a refractive index sensor with high sensitivity.

**Key words:** Hybrid plasmonic microcavity; Hybrid plasmonic mode; Quality factor; Effective mode volume; High sensitive sensor

**OCIS Codes:** 240.6680; 130.6010; 310.6628

## 0 引言

随着微加工技术和集成光学的发展, 光子器件不断小型化, 如光子晶体<sup>[1]</sup>、回音壁模式(Whispering Gallery Mode, WGM)

光学微腔<sup>[2-4]</sup>和表面等离子体光学器件<sup>[5-6]</sup>等, 具

有宽带宽、高密度、高速度和低功耗等优点。光子晶体微腔和介质回音壁模式光学微腔器件由于受衍射极限的影响, 光场模式尺寸一般被限制在微米量级以上。表面等离子体激元(Surface Plasmon Polariton, SPPs)是由光和金属表面电子相互作用引起的一种电磁波模式, 既具有光子学的速度, 又具有电子学的尺度, 能够

基金项目: 浙江省自然科学基金(Nos. LY15F050001, 2011C21038, 2011C22051)、国家自然科学基金(No. 61007029)和浙江省点技术创新团队(No. 2010R50007)资助

第一作者: 张蒙(1988—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为球微腔传感。Email: 1505636304@qq.com

导师(通讯作者): 吴根柱(1967—), 男, 教授, 主要研究方向为新型半导体激光器。Email: wugenzhu@zjnu.cn

收稿日期: 2014-12-10; 录用日期: 2015-01-13

在亚波长结构中对光进行约束和操控。研究人员把SPPs与介质微腔结合在一起产生了各种结构的SPP微腔,如表面等离子体微环谐振腔<sup>[7-12]</sup>和表面等离子体微盘谐振腔<sup>[13]</sup>等。

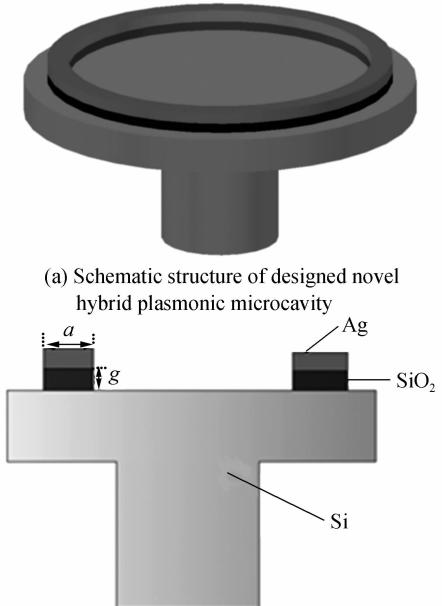
SPP微腔依靠其表面等离子体效应对光场进行有效限制,获得超过衍射极限的极小有效模体积( $\sim 0.1\mu\text{m}^3$ )回音壁模式的光,但是受高折射率介质微腔和表面金属层的约束,光能量大部分被限制在腔内,很少漏出腔外,而且金属损耗较大。SPP微腔利用微腔外部泄露出去的模式谐振光波长对周围环境变化的敏感特性来制作各种传感器,如折射率传感器,因此在SPP微腔外部要保留一定强度的近场耦合光。混合表面等离子体(Hybrid Plasmonic Polariton, HPP)回音壁模式(WGM)微腔(HPP-WG微腔)可以有效地解决此问题。HPP-WG微腔采用类似于文献[14]提出的混合表面等离子体纳米波导结构进行设计,在介质微腔上放置金属环、金属条或金属盘,由介电常量小的介质或空气作为中间隔离层。当间隔层厚度比较小时,微腔内的介质纯回音壁模式会与金属-低介电常量介质-微腔界面上的表面等离子体模式相互耦合,形成束缚在介质微腔内和间隔层处的SPP-WG混合模式。由于低折射率隔离层的存在,这种SPP-WG混合模式金属损耗小,品质因子较高,同时能保证部分光场在微腔外部分布。

HPP-WG微腔结构<sup>[15-17]</sup>把有源材料部分制成纳米波导结构,虽然在理论上能保证其优点,但实际上较难实现。除了工艺上有难度等原因外,由于存在金属损耗,如果把有源材料尺寸设计成相对太小或与金属接触面积相等,则因腔内光功率太小,导致金属吸收损耗大于腔内增益而在HPP-WG微腔内不能形成谐振模式。文献[18]为了尽量减少金属接触面积,在微环体材料表面上放置金属纳米环,但在实际工艺上较难实现。本文设计了一种由横截面为矩形的金属纳米环形条放置在较大体积半导体微盘上,中间由低折射率材料隔离而构成的混合表面等离子体微盘腔。该结构不仅在工艺上通过光刻等方法容易实现,并且把有源材料制成了相对大体积微盘,能保证足够光能量克服金属纳米条带来的吸收损耗,从而在该HPP-WG微腔内获得SPP-WG混合模式的谐振模式。

## 1 物理模型

HPP-WG微腔结构见图1(a),主要由一个半导体微盘和一个横截面为矩形的金属纳米环形条组合而成,在微盘和金属条之间有一层薄的低折射率介质层。金属条同轴放置在微盘上方,中间是低折射率介质层。低折射率介质层构成了微盘和金属条之间的间隙,根据混合表面等离子体效应向金属中辐射的能量会更多集中在间隙中,使得HPP-WG微腔的金属损耗降低。

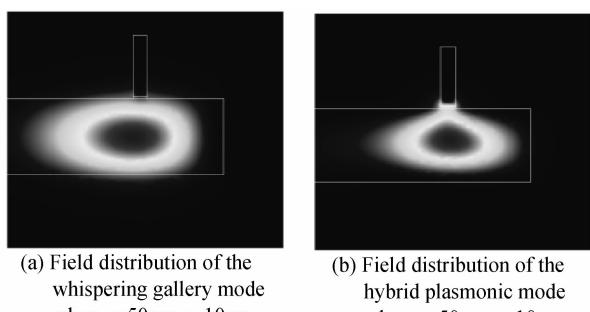
图1(b)是该结构的截面图,以Si为半导体微盘材料,其厚度 $t=250\text{ nm}$ ,半径 $R=5\mu\text{m}$ ,Ag为金属条材料,其金属条宽度 $a$ 在 $50\sim 200\text{ nm}$ 之间,高度 $b=200\text{ nm}$ , $\text{SiO}_2$ 为间隙材料,其厚度 $g$ 在 $2\sim 20\text{ nm}$ 之间。该结构中如果取 $g=0$ 则变成一般的SPP微腔。



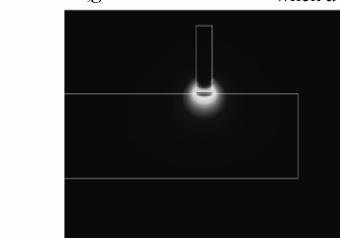
(b) The cross section of the hybrid plasmonic microcavity

图1 混合表面等离子体微腔的结构示意图及其横截面  
Fig. 1 Schematic structure and cross section of designed hybrid plasmonic microcavity

一般SPP微腔( $g=0$ )中可存在介质纯回音壁模式和纯SPP模式两种不同模式,而在HPP-WG微腔( $g>0$ )中可存在介质纯回音壁模式(纯WG模式)和SPP-WG混合模式两种本征模式,其光场分布分别如图2(a)和(b),图2(c)为一般SPP微腔中的纯SPP



(a) Field distribution of the whispering gallery mode when  $a=50\text{nm}, g=10\text{nm}$   
(b) Field distribution of the hybrid plasmonic mode when  $a=50\text{nm}, g=10\text{nm}$



(c) Field distribution of the plasmonic mode when  $a=50\text{nm}, g=0\text{nm}$

图2 模场分布  
Fig. 2 Field distribution

模式.

根据麦克斯韦方程组,在 HPP-WG 微腔中 SPP-WG 混合模式电磁场分量表示为

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

式中  $q$  为混合模式的径向模式数,  $m$  为方位角模式数. 而其纯 WG 模式电磁场分量表示为

$$H(r, \varphi, z) = H_{\text{WG}}^{hm}(r, z) \exp(im\varphi) \quad (2)$$

式中  $h$  为介质纯回音壁模式的径向模式数,  $m$  为方位角模式数.

由于纯 WG 模式的光能量主要集中在腔内,较少溢出腔外,而纯 SPP 模式因金属损耗很大较难形成谐振模式,故本文主要讨论 SPP-WG 混合模式.

## 2 数值仿真及分析

该 HPP-WG 微腔的工作波长  $\lambda=1550$  nm, 硅、二氧化硅和银的相对介电常量<sup>[19]</sup> 分别为  $\epsilon_{\text{Si}}=12.25$ ,  $\epsilon_{\text{SiO}_2}=2.25$ ,  $\epsilon_{\text{Ag}}=-129+3.3i$ . 该微腔周围介质为空气, 其折射率  $n=1.0$ . 为了能够直观地展现出该微腔的 SPP-WG 混合模式, 运用一种基于有限元分析法的全矢量本征模求解器<sup>[20]</sup>进行数值模拟. 主要讨论 SPP-WG 混合模式的品质因子  $Q$  和有效模式体积  $V_{\text{eff}}$  等模式特性. 品质因子  $Q$  计算公式<sup>[21]</sup>为

$$Q=\text{Re}(f)/2\text{Im}(f) \quad (3)$$

式中  $f$  是本征频率, 是一个复数. 另外, 品质因子  $Q$  可以被分解为以下两项: 与腔辐射损耗相关的  $Q_{\text{rad}}$  和与金属吸收损耗相关的  $Q_{\text{abs}}$ .

$$1/Q_{\text{total}}=1/Q_{\text{rad}}+1/Q_{\text{abs}} \quad (4)$$

需要注意的是, 一方面硅的吸收损耗相对于金属吸收损耗可以忽略不计, 另一方面计算的是  $Q$  的理论值, 忽略了腔表面不光滑造成的散射损耗. 这里应用完美匹配层来计算总  $Q$  值(包括  $Q_{\text{rad}}$  和  $Q_{\text{abs}}$ ).

有效模式体积  $V_{\text{eff}}$  计算公式<sup>[21]</sup>为

$$V=\int w(\mathbf{r}) d^3(\mathbf{r}) / w(\mathbf{r})_{\max} \quad (5)$$

式中  $w=[d(w\epsilon(\mathbf{r}))/dw|E(\mathbf{r})|^2+\mu_0|H(\mathbf{r})|^2]/2$  是能量密度,  $H(\mathbf{r})$ 、 $E(\mathbf{r})$ 、 $\epsilon(\mathbf{r})$  和  $\mu_0$  分别是磁场强度、电场强度、介质介电常量和真空磁导率.

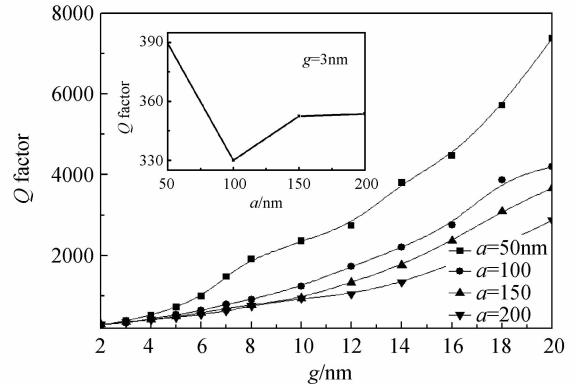
为了更好地了解 SPP-WG 混合模式对腔内光场的对外“提取”作用<sup>[18]</sup>, 定义能量比值  $\eta$  为微盘外的能量占总能量的百分比,  $\eta$  计算公式<sup>[22]</sup>为

$$\eta=\int_{\text{out}} w(\mathbf{r}) d^3(\mathbf{r}) / \int_{\text{all}} w(\mathbf{r}) d^3(\mathbf{r}) \quad (6)$$

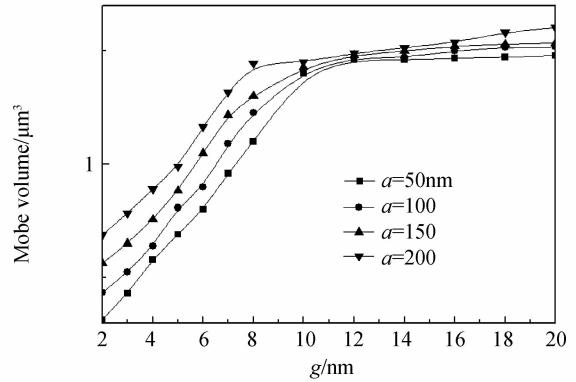
能量比  $\eta$  也可以衡量纯 WG 模式与纯 SPP 模式耦合的强弱.

HPP-WG 微腔的模式特性随金属条宽度  $a$  和低折射率介质层厚度  $g$  的变化情况, 如图 3.

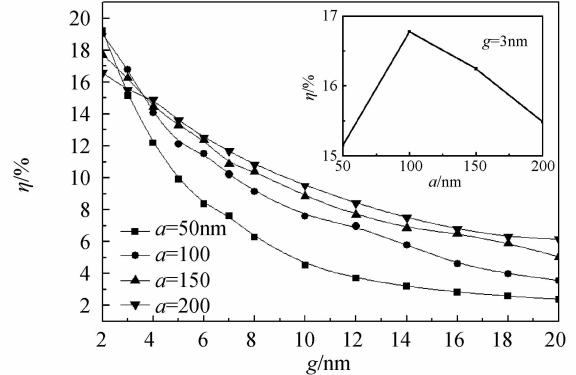
图 3(a) 为品质因子  $Q$  随金属条宽度  $a$  和低折射率介质层厚度  $g$  变化的情况. 当 HPP-WG 微腔的金属



(a) Quality factor of the hybrid plasmonic modes versus wide  $a$  and gap  $g$



(b) Effective mode volume of the hybrid plasmonic modes versus wide  $a$  and gap  $g$



(c) Energy ratio of the hybrid plasmonic modes versus wide  $a$  and gap  $g$

图 3 混合表面等离子体微腔模式特征随金属条宽度  $a$  及间隙  $g$  的变化

Fig. 3 Mode properties of the hybrid plasmonic modes versus wide  $a$  and gap  $g$

条宽度  $a$  为一定值时, 品质因子  $Q$  随着  $g$  的增大而增大, 这是由  $a$  保持不变  $g$  逐渐增大时金属吸收损耗逐渐减小导致的, 也表明 SPP-WG 混合模式随  $g$  逐渐增大而逐渐趋于纯 WG 模式的趋势, 计算结果表明, 当  $g \geq 30$  nm 时 SPP-WG 混合模式基本上趋于纯 WG 模式; 反之, 如果  $g$  逐渐减小, 金属吸收损耗会逐渐增大而  $Q$  值逐渐减小, SPP-WG 混合模式逐渐趋于纯 SPP 模式, 当  $g=0$  nm 时 SPP-WG 混合模式演变成纯 SPP 模式, 如图 2(c). 当 HPP-WG 微腔的低折射率介质层

厚度  $g$  为一定值时,品质因子  $Q$  随着  $a$  逐渐增大而变化的情况较为复杂。当  $g=2 \text{ nm}$  时,  $Q$  随着  $a$  的增大而增大; 当  $g \geq 4 \text{ nm}$  时,  $Q$  随着  $a$  的增大而减小; 当  $g=3 \text{ nm}$  时,  $Q$  随着  $a$  的增大先减小再增大, 如图 3(a) 插图所示。此现象是由于在金属吸收损耗和辐射损耗两者之间存在折中关系: 当  $g$  增大时, 金属吸收损耗减小而辐射损耗增大; 当  $a$  增大时, 金属吸收损耗增大而辐射损耗减小。当  $a=50 \text{ nm}, g=2 \text{ nm}$  时  $Q$  值最高可达到 7 000 左右, 比同类混合表面等离子体微腔结构<sup>[16-17]</sup>都要大, 这主要是由本文设计的特定混合表面等离子体微腔结构所决定的。

图 3(b) 为有效模式体积  $V_{\text{eff}}$  随金属条宽度  $a$  和低折射率介质层厚度  $g$  的变化。当金属条宽度  $a$  为一定值时, 当  $g < 10 \text{ nm}$  时,  $V_{\text{eff}}$  随  $g$  增大而单调增大, 当  $g > 10 \text{ nm}$  时,  $V_{\text{eff}}$  随  $g$  增大而增大的趋势变缓慢, 最后趋于稳定。这是因为随着  $g$  增大, 表面等离子体效应减弱, WG 模式与表面等离子体模式之间耦合也变弱, SPP-WG 混合模式特征逐渐趋于纯 WG 模式, 而 WG 模式的  $V_{\text{eff}}$  要远大于 SPP 模式的  $V_{\text{eff}}$ , 并随着  $g$  改变保持不变。当  $a=50 \text{ nm}, g=2 \text{ nm}$  时,  $V_{\text{eff}}$  为  $0.315 \mu\text{m}^3$ ; 当  $a=200 \text{ nm}, g=20 \text{ nm}$  时,  $V_{\text{eff}}$  为  $1.6 \mu\text{m}^3$ , 这都远小于一般 SPP 微腔情况<sup>[21,23]</sup>。

图 3(c) 为能量比  $\eta$  随金属条宽度  $a$  和低折射率介质层厚度  $g$  的变化。当 HPP-WG 微腔的金属条宽度  $a$  为一定值时, 能量比  $\eta$  随着  $g$  的增大而减小; 当 HPP-WG 微腔的低折射率介质层厚度  $g$  为一定值时, 能量比  $\eta$  随着  $a$  逐渐增大而变化的情况较为复杂: 当  $g=2 \text{ nm}$  时,  $\eta$  随着  $a$  的增大而减小; 当  $g \geq 4 \text{ nm}$  时,  $\eta$  随着  $a$  的增大而增大; 当  $g=3 \text{ nm}$  时,  $\eta$  随着  $a$  的增大先增大再减小, 如图 3(c) 插图所示。易见, 当  $a(g)$  不变时, 能量比  $\eta$  随  $g(a)$  的变化趋势与品质因子  $Q$  随  $g(a)$  的变化趋势恰好相反, 即  $Q$  越大时,  $\eta$  反而越小。这是因为当能量比  $\eta$  越大时, 也就是泄露到微腔外能量越大, 在金属和在空气中辐射的能量占总能量的比例越大, 导致金属吸收损耗和辐射损耗就越大而  $Q$  值越小; 反之, 当能量比  $\eta$  减小时腔内能量向外泄露减少而  $Q$  值增大。

### 3 HPP-WG 微腔在传感方面应用

HPP-WG 微腔可应用于传感领域, 主要由于微腔自身内部或者自身与外界相互作用的灵敏反应, 诸如频率或光谱的变化。当外界环境(比如折射率、温度、压强)改变时, 谐振波长会有一个小的漂移, 该谱线漂移可以被准确地测量出来。对于本文提出的 HPP-WG 微腔模型( $a=50 \text{ nm}, g=2 \text{ nm}$ ), 当 HPP-WG 微腔周围介质的折射率改变时, 可以得到腔内谐振波长移动的变化曲线, 如图 4, 基于该 HPP-WG 微腔制成的折射率传

感器, 其灵敏度表示为  $S=d\lambda/dn$ , 计算图 4 中曲线斜率可得此折射率传感器灵敏度为  $100 \text{ nm/RIU}$ , 基本上能达到同类设计器件的灵敏度值<sup>[23-24]</sup>。

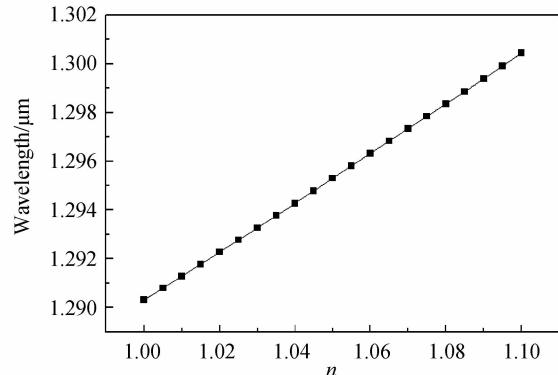


图 4  $n$  变化时波长移动的变化曲线

Fig. 4 Curves of wavelength for different  $n$

实际上从数值仿真结果可知能量比  $\eta$  和品质因子  $Q$  随金属条宽度与低折射率介质层厚度变化的趋势不一致性, 如当能量比  $\eta$  减小时而  $Q$  值增大。在传感应用情况下, 为确保传感器灵敏度, 同时期望较高的  $Q$  值和  $\eta$ , 为此应选择一种最佳折中方案。如考虑到克服微腔辐射损耗和吸收损耗一般微腔器件应保证  $Q$  值在 1 000 左右, 从图 3(a) 和图 3(c) 可看出, 此时为了使传感灵敏度尽量大(即能量比尽量大), 微腔尺寸应选择为  $a=50 \text{ nm}, g=6 \text{ nm}$  或  $a=100 \text{ nm}, g=8 \text{ nm}$  等, 经计算得到对应灵敏度分别为  $82 \text{ nm/RIU}$  和  $67 \text{ nm/RIU}$ , 与上述灵敏度值( $100 \text{ nm/RIU}$ )相比都略微下降。该 HPP-WG 微腔也可应用到高灵敏度温度或湿度传感上, 其温度或湿度值也可以通过观察谐振波长的漂移来精确测定。

### 4 结论

提出了一种混合表面等离子体微腔, 这种微腔由低折射率介质层把介质微盘和横截面为矩形的金属纳米环形条隔离而构成。用有限元法分析了该混合微腔结构的模式特性, 结果表明该混合微腔具有较高的品质因子和较小有效模式体积。最后对其折射率传感特性进行了分析, 说明了该混合微腔在实现高灵敏度折射率传感器方面存在潜在应用价值。

#### 参考文献

- [1] THYLEN L, MIN Q, SRINIVASAN A. Photonic crystals-a step towards integrated circuits for photonics[J]. *Physical Chemistry*, 2004, **5**(9): 1268-1283.
- [2] XU Q, SCHMIDT B, PRADHAN S, et al. Micrometre-scale silicon electro-optic modulator[J]. *Nature*, 2005, **435**(7040): 325-327.
- [3] KIPPENBERG T J, SPILLANE S M, ARMANI D K, et al. Fabrication and coupling to planar high-Q silica disk microcavities[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **83**(4): 797-799.
- [4] SHAINLINE J, ELSTON S, LIU Z J, et al. Subwavelength

- silicon microcavities [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(25): 23323-23331.
- [5] BARNES W L, DEREUX A, EBSESEN T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 824-830.
- [6] MAIER S A. Plasmonics: The promise of highly integrated optical devices [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, **12**(6): 1671-1677.
- [7] BOZHEVOLNYI S I, VOLKOV V S, DEVVAUX E, et al. Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators [J]. *Nature*, 2006, **440**(7083): 508-511.
- [8] CHEN J J, LI Z, YUE S, et al. Hybrid long-range surface plasmon-polariton modes with tight field confinement guided by asymmetrical waveguides[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(26): 23603-23609.
- [9] CHEN Y H, GUO L J. High Q long-range surface plasmon polariton modes in sub-wavelength metallic microdisk cavity [J]. *Plasmonics*, 2011, **6**(1): 183-188.
- [10] LU HUA, LIU X M, GONG Y K, et al. Multichannel plasmonic waveguide filters with disk-shaped nanocavities[J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(10): 2613-2616.
- [11] VESSEUR E J R, JAVIER G D A, POLMAN A. Modal decomposition of surface-plasmon whispering gallery resonators[J]. *Nano Letters*, 2009, **9**(9): 3147-3150.
- [12] WANG Q, ZHAO H, DU X, et al. Hybrid photonic-plasmonic molecule based on metal/Si disks [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(9): 11037-11047.
- [13] WANG X L, JIANG H Q, CHEN J X, et al. Optical bistability effect in plasmonic racetrack resonator with high extinction ratio[J]. *Optical Express*, 2011, **19**(20): 19415-19421.
- [14] OULTON R F, SORGER V J, ZENTGRAF T, et al. Plasmon lasers at deep subwavelength scale [J]. *Nature*, 2009, **461**(7264): 629-632.
- [15] XIANG C, CHAN C K, WANG J. Proposal and numerical study of ultra-compact active hybrid plasmonic resonator for sub-wavelength lasing applications[J]. *Scientific Reports*, 2014, **4**(1): 03720.
- [16] XIAO Y F, LI B B, JIANG X, et al. High quality factor, small mode volume, ring-type plasmonic microresonator on a silver chip[J]. *Journal of Physics B: Atomic Molecular and Optical Physics*, 2010, **43**(3): 035402.
- [17] HU Y W, LI B B, LIU Y F, et al. Hybrid photonic-plasmonic mode for refractometer and nanoparticle trapping [J]. *Optics Communications*, 2013, **291**(3): 380-385.
- [18] LU Q J, CHAN D R, WU G Z, et al. A hybrid plasmonic microresonator with high quality factor and small mode volume[J]. *Journal of Optics*, 2012, **14**(12): 125503.
- [19] OXBORROW M. Traceable 2-D finite-element simulation of the whispering-gallery modes of axisymmetric electromagnetic resonators[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2007, **55**(6): 1209-1218.
- [20] JOHNSON P B, CHRIETY R W. Optical constants of the noble metals[J]. *Physical Review B*, 1972, **6**(12): 4370-4379.
- [21] MIN B, OSTBY E, SORGER V, et al. High-Q surface-plasmon-polariton whispering-gallery microcavity [J]. *Nature*, 2009, **457**(7228): 455-458.
- [22] ZOU C L, SUN F W, XIAO Y F, et al. Plasmon modes of silver nanowire on a silica substrate[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(18): 183102.
- [23] XIAO Y F, ZOU C L, LI B B, et al. High-Q exterior whispering-gallery modes in a metal-coated microresonator [J]. *Physical Review Letters*, 2010, **105**(15): 153902.
- [24] LU Qi-jing, WU Gen-zhu, CHEN Da-ru, et al. Optimal design and application of surface plasmon polarizations microdisk[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0714002. 卢启景, 吴根柱, 陈达如, 等. 表面等离子体激元微盘的优化设计及应用[J]. 光学学报, 2012, **32**(7): 0714002.
- [25] ZHANG Yang-yang, ZHU Fang-ming, SHEN Lin-fang, et al. Terahertz surface plasmonpolaritons on metal surfaces corrugated byshallowly dielectric-filled grooves [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(4): 389-393. 张羊羊, 朱方明, 沈林放, 等. 介质填充浅槽周期结构表面上的太赫兹表面等离子体激元[J]. 光子学报, 2012, **41**(4): 389-393.
- [26] GAO Yong, FENG Song, YANG Yuan, et al. The structure design of ridged SiGe-OI optical waveguide based on optiwave [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1692-1696. 高勇, 冯松, 杨媛, 等. 基于 Optiwave 的脊形 SiGe-OI 光波导结构设计[J]. 光子学报, 2009, **38**(7): 1692-1696.
- [27] WANG Cong, WU Gen-zhu, ZHOU Pei, et al. Mode properties of hybrid plasmonic waveguidewith with an metal nano-rib[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0916001. 王聪, 吴根柱, 周沛, 等. 纳米金属肋混合表面等离子体波导模式特性分析[J]. 光子学报, 2014, **43**(9): 0916001.
- [28] LIU Jun, WU Gen-zhu, CHEN Da-ru, et al. Metallo-dielectric confined semiconductor microdisk laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(12): 1464-1469. 刘军, 吴根柱, 陈达如, 等. 金属-电介质约束的半导体微盘激光器[J]. 光子学报, 2012, **41**(12): 1464-1469.