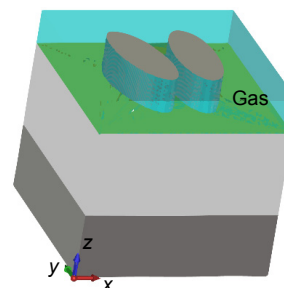




# 基于 Fano 共振的等离子体共振传感器

方佳文, 张明, 张飞, 喻洪麟\*

重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030



**摘要:** 基于表面等离子体共振的金属纳米结构传感器具有测量精度高、易集成的特点, 已广泛应用于生物、化学、材料、光子学和生命科学等诸多领域。然而由于表面等离子体共振在可见光波段具有较大的辐射损耗, 导致等离子体共振传感器谐振峰较宽, 极大地限制了传感器的性能。本文采用不对称双椭圆柱结构在等离子体共振传感器中引入不对称性, 产生 Fano 共振以实现窄带光谱特性。通过优化结构参数, 在 681 nm 波长处, 得到了半高全宽(FWHM)仅为 10.8 nm 的谐振谷。该传感器在环境折射率 1.0~1.1 的变化范围内, 折射率灵敏度可以达到 299 nm/RIU, 品质因数可以达到 27.8。该传感器在高折射率灵敏度传感应用方面有着巨大的潜力。

**关键词:** 等离子体共振; 传感器; Fano 共振

**中图分类号:** O534; TP212

**文献标志码:** A

## Plasmonic sensor based on Fano resonance

Jiawen Fang, Ming Zhang, Fei Zhang and Honglin Yu\*

Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System, Ministry of Education, Chongqing University,  
Chongqing 400030, China

**Abstract:** Plasmonic sensor based on metallic nanostructures is a promising platform for applications, such as biology, chemistry, materialogy, photonics and bioscience due to their attractive properties. However, the sensitivity of plasmonic sensors is usually limited by broad-spectral features due to large radiative loss of metallic nanostructures in visible region. In this paper, we introduce structural asymmetry to generate the Fano resonance in the metallic nanostructure composed of asymmetric ellipsoidal pair. The distinct Fano-like resonance around wavelength of 681 nm possesses sharp peak as narrow as 10.8 nm. And the Fano mode exhibits high refractive index sensitivity as large as 299 nm/RIU. Due to the excitation of sharp spectral features, high figure of merit of 27.8 at the Fano resonance is obtained in a wide refractive index range of 1.0~1.1. This device is promising for the applications of high sensitivity microchip sensor.

**Keywords:** plasmon resonance; sensor; Fano resonance

**DOI:** 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.02.012

**Citation:** *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(2): 221-225

## 1 引言

金属纳米结构在电磁波的作用下会激发出表面等离子体激元, 实现纳米尺度下电磁场能量的局域增强

和调控, 在表面增强拉曼散射、生物/化学传感器、等离子体波导、太阳能电池、集成光子器件等领域有着巨大的应用前景<sup>[1-5]</sup>。利用金属纳米结构产生的局域表面等离子体共振效应, 可以获得区别于传统表面等离子体共振结构的独特性能。此外, 金属纳米结构中的局域电磁场增强特性与周围环境密切相关, 为高灵敏

收稿日期: 2016-10-24; 收到修改稿日期: 2016-12-18

\*E-mail: hlyu@cqu.edu.cn

度的生物传感器的实现提供了一种新的方式<sup>[6]</sup>。目前,虽然已经有很多基于表面等离子体共振的金属纳米结构应用于生物传感,但由于表面等离子体共振存在较大的辐射损耗,导致传感器谐振峰的带宽较宽,限制了等离子体共振传感器的性能<sup>[7-8]</sup>。通过在金属纳米结构中引入不对称性产生 Fano 共振可以实现窄带光谱特性,提高等离子体共振传感器的性能<sup>[9-10]</sup>。相比于常规的等离子体共振模式, Fano 共振利用超辐射和亚辐射模式之间的干涉,极大地降低甚至完全抑制了系统的辐射损耗,实现了窄的光谱线宽、强的电磁场增强、高折射率灵敏度等一系列优异的电磁特性。目前,已经在大量结构中发现了 Fano 共振,比如周期扰动光栅<sup>[11-13]</sup>、分裂环<sup>[14-16]</sup>、不对称金属颗粒二聚体<sup>[10]</sup>、金属纳米球壳<sup>[17]</sup>、非共轴环和圆盘组成的微腔<sup>[18-19]</sup>。Fano 共振型电磁超结构在生物/化学传感、光学开关和表面增强拉曼散射(SERS)等领域具有巨大的应用前景<sup>[20-22]</sup>。

本文采用不对称双椭圆柱结构,在金属纳米电磁超结构中引入不对称性来产生 Fano 共振。通过优化结构参数,在 681 nm 波长处,得到了半高全宽(FWHM)仅为 10.8 nm 的 Fano 共振谐振谷,并且该波长处的反射率为 0。该传感器在环境折射率 1.0~1.1 的变化范围内,折射率灵敏度可以达到 299 nm/RIU,品质因数可以达到 27.8。该传感器在高折射率灵敏度传感方面有着巨大的潜力。

## 2 仿真设计和计算方法

本文设计的基于 Fano 共振的表面等离子体传感器结构示意图如图 1 所示。该结构为典型的金属-介质

-金属(MIM)结构,反射层、介质层和双椭圆柱结构的厚度分别为  $d$ ,  $h_1$  和  $h_2$ 。该单元结构在  $x$ ,  $y$  方向上呈周期性分布,周期为  $P$ 。椭圆柱的短轴和长轴分别为  $R_x$  和  $R_y$ , 双椭圆柱中心间隔定义为  $D_x$ 。为了在金属纳米结构中引入不对称性,我们将椭圆柱 II 围绕其中心逆时针旋转  $\alpha$  角。

电磁场的数值计算采用基于有限元方法的商业软件 CST Microwave Studio。计算区域仅包括一个结构单元,结构单元的  $x$ ,  $y$  方向的边界条件设置为 unit cell,  $z$  方向的边界条件设置为 open。反射层、介质层和双椭圆柱结构的材料分别为 silver, silica 和 silver。金属银的材料参数通过 Drude 模型得到<sup>[23]</sup>:

$$\epsilon_m(\omega) = \epsilon_\infty - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\gamma\omega), \quad (1)$$

式中:  $\omega_p=1.38 \times 10^{16}$  Hz,  $\epsilon_\infty=3.7$ ,  $\gamma=2.73 \times 10^{13}$  Hz, 其中  $\omega_p$  表示等离子体共振频率,即自由的传导电子在金属银中传播的自然振荡频率,  $\epsilon_\infty$  表示金属在频率趋于无穷大时的相对介电常数,  $\gamma$  是金属中自由电子的碰撞衰减频率,  $\omega$  为入射光的角频率。二氧化硅的介电常数根据参考文献[24], 设置为 2.25。  $x$  偏振的平面波垂直入射到不对称双椭圆柱阵列所在的平面(即沿  $z$  轴负向入射)。

## 3 仿真结果与讨论

经过仿真计算, 不对称双椭圆柱结构优化参数如下: 反射层、介质层和结构层的厚度分别为  $d=150$  nm,  $h_1=200$  nm,  $h_2=70$  nm;  $x$ 、 $y$  方向周期  $P=250$  nm; 椭圆柱长、短轴  $R_y=150$  nm,  $R_x=75$  nm; 两个椭圆柱中心间隔  $D_x=50$  nm; 旋转角度  $\alpha=25^\circ$ 。图 2 为仿真计算得到

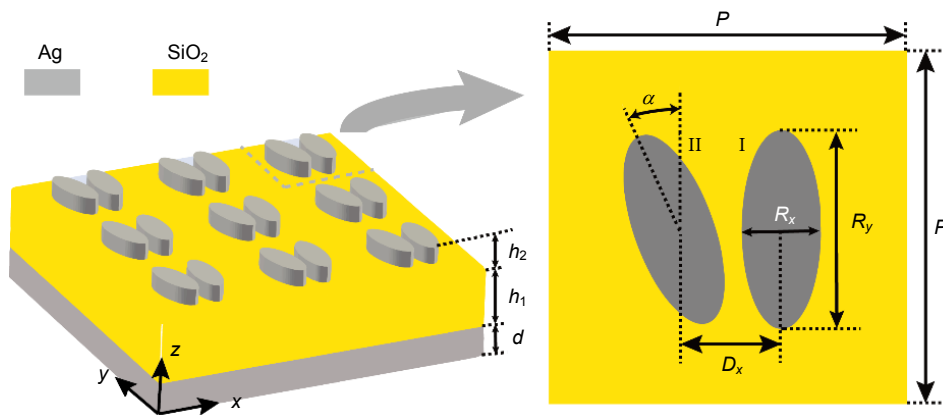


图 1 双椭圆柱结构阵列和单元结构示意图。

Fig. 1 Arrays and unit cell of the asymmetric ellipsoidal pair.

的对称结构  $\alpha=0^\circ$  和非对称结构  $\alpha=25^\circ$  时的反射率谱线图。从图中可以看出  $\alpha=25^\circ$  (不对称结构) 时, 在 681 nm 波长处产生了 Fano 共振。当  $\alpha=0^\circ$  (对称结构) 时, 没有产生 Fano 共振。这表明了本结构中不对称性是产生 Fano 共振的必要条件。在此结构中, 偶极子共振模式可以由入射电磁波直接激发, 但是四偶极子共振模式的产生需要不对称环境的诱导<sup>[25]</sup>。破坏结构的对称性可以在结构中同时产生偶极子和四偶极子共振模式, 这两种共振模式发生耦合作用, 产生 Fano 共振<sup>[26]</sup>。这里偶极子模式和四偶极子模式分别作为“亮”模式和“暗”模式。从图中可以得到反射率谱线的半高全宽仅为 10.8 nm, Fano 共振的窄带特性是由于四偶极子模式的产生减小了 Fano 共振的辐射损耗。相较于之前的等离子体共振传感器实现了窄带光谱特性, 提高了传感器的性能。

为了分析 Fano 共振产生的机理, 图 3 给出了  $\alpha=25^\circ$  的情况下, 偶极子共振模式 ( $\lambda=582\text{nm}$ ) 和 Fano 共振模式 ( $\lambda=681\text{nm}$ ) 电场  $z$  分量分布图。选取的界面为椭圆柱上表面  $x-y$  平面, 图中虚线为双椭圆柱的轮廓, “+”、“-”号代表了电场中正负电荷分布。从图 3 中可以看出, 每个椭圆柱中都存在电流分布, 电流的方向从正电荷指向负电荷。 $\lambda=582\text{ nm}$  波长处, 激发了电偶极子共振模式, 在双椭圆柱结构中产生了方向相同的电流。 $\lambda=681\text{ nm}$  波长处, 激发了四偶极子共振模式, 在双椭圆柱结构中产生了方向相反的电流。偶极子模式和四偶极子模式分别构成了“亮”模式和“暗”模式, 两种模式的相互耦合产生了 Fano 共振。相较于偶极子共振模式, 四偶极子共振模式中产生的反向电流将电磁场能量局域在双椭圆柱结构的间隙中, 极大地抑制了等离子体共振的辐射损耗, 从而实现窄带光谱特性。

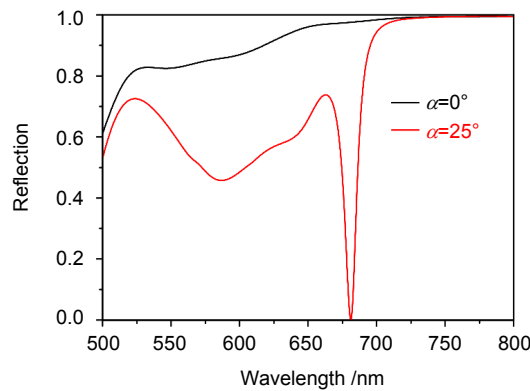


图 2 对称结构 ( $\alpha=0^\circ$ ) 和不对称结构 ( $\alpha=25^\circ$ ) 反射率谱线图。

Fig. 2 Reflection spectra of the symmetric structure ( $\alpha=0^\circ$ ) and the asymmetric structure ( $\alpha=25^\circ$ ).

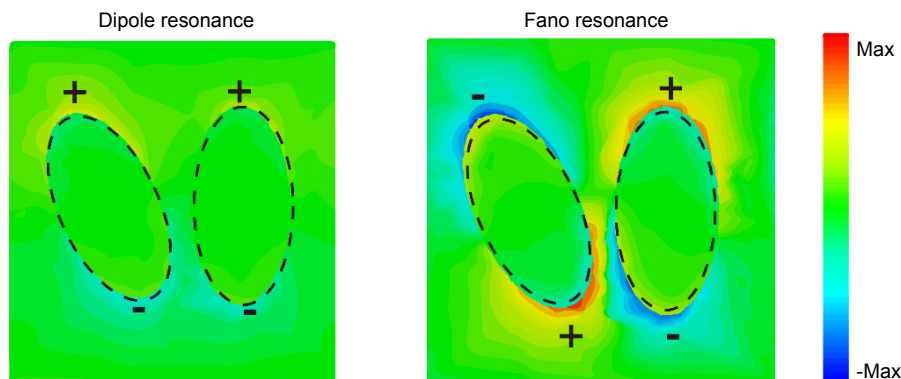


图 3  $\alpha=25^\circ$  时, 偶极子共振模式和 Fano 共振模式下不对称双椭圆柱结构表面的电场  $z$  分量分布图

Fig. 3 Z component of electric fields located at the top of the asymmetric double elliptical cylinders structures in the case of  $\alpha=25^\circ$  at the dipole resonance ( $\lambda=582\text{ nm}$ ) and the Fano resonance ( $\lambda=681\text{ nm}$ ).

为了分析不对称度对 Fano 共振的影响,本文改变椭圆柱 II 的旋转角度  $\alpha$ , 对结构进行了仿真计算。图 4(a)给出了  $\alpha=0^\circ\sim 25^\circ$ (间隔  $5^\circ$ )的反射率谱线图。随着  $\alpha$  的增大,即不对称度变大, Fano 共振的强度变大并且共振峰发生红移。图 4(b)给出了  $\alpha=10^\circ$ 和  $\alpha=25^\circ$ 时, Fano 共振频率处的磁场  $z$  分量分布图。从图中可以看出结构不对称时,在两个椭圆柱中产生了方向相反,幅值相等的电流,磁场能量被局域在两个椭圆柱的间隙中。比较  $\alpha=10^\circ$ 和  $\alpha=25^\circ$ 的磁场  $z$  分量分布图,可以看出随着不对称度的增大,更多的磁场能量被局域在两个椭圆柱之间,导致 Fano 共振的强度增强。

### 4 传感特性研究

通过改变不对称双椭圆柱结构周围环境的折射率, Fano 共振频率会发生漂移。基于这一特性,可以

将该结构应用于折射率传感器。为了评估等离子体共振传感器的性能,我们定量和定性分析了两个主要的指标:折射率灵敏度( $S$ )和品质因数( $FOM$ )。折射率灵敏度定义为每单位折射率变化引起的共振谷(峰)波长的移动。折射率灵敏度的计算公式为

$$S = \frac{\partial \lambda_{\text{res}}(\text{nm})}{\partial n_s(\text{RIU})} \quad (2)$$

另一个评判传感器的重要指标是品质因数( $FOM$ ),其计算公式为

$$FOM = \frac{S(\text{nm} \cdot \text{RIU}^{-1})}{FWHM(\text{nm})} \quad (3)$$

式中:  $S$ 为折射率灵敏度,  $FWHM$ 为共振谷的半高全宽。

图 4 给出了该结构在周围环境折射率  $n=1.0\sim 1.1$ (间隔为 0.02)变化范围内的反射率谱线图。

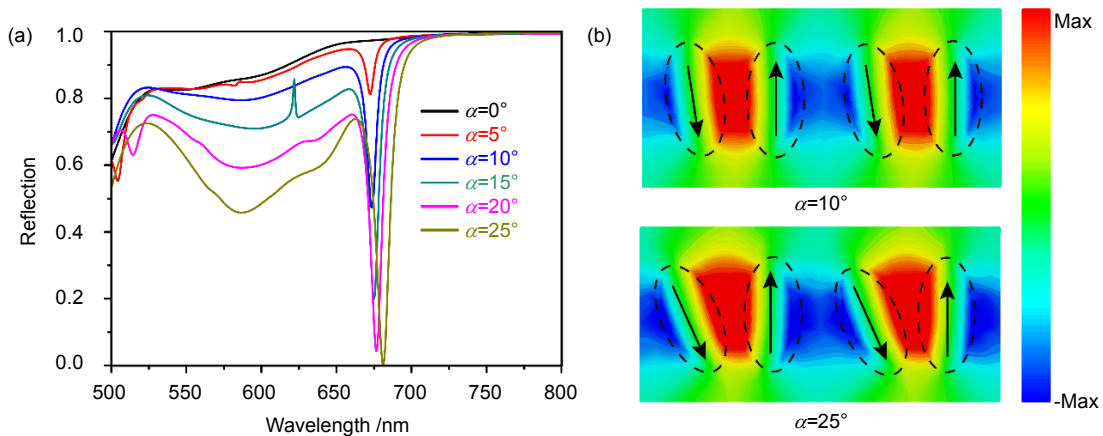


图 4 (a) 不同旋转角度  $\alpha$  的反射率谱线图. (b)  $\alpha=10^\circ$ 和  $\alpha=25^\circ$ 时, Fano 共振频率处双椭圆柱表面磁场  $z$  分量分布图

Fig. 4 (a) Reflection spectra of different rotation angles  $\alpha$ . (b) Z component of magnetic fields located at the top of the asymmetric double elliptical cylinders structures in the case of  $\alpha=10^\circ$  and  $\alpha=25^\circ$  at the Fano resonance.

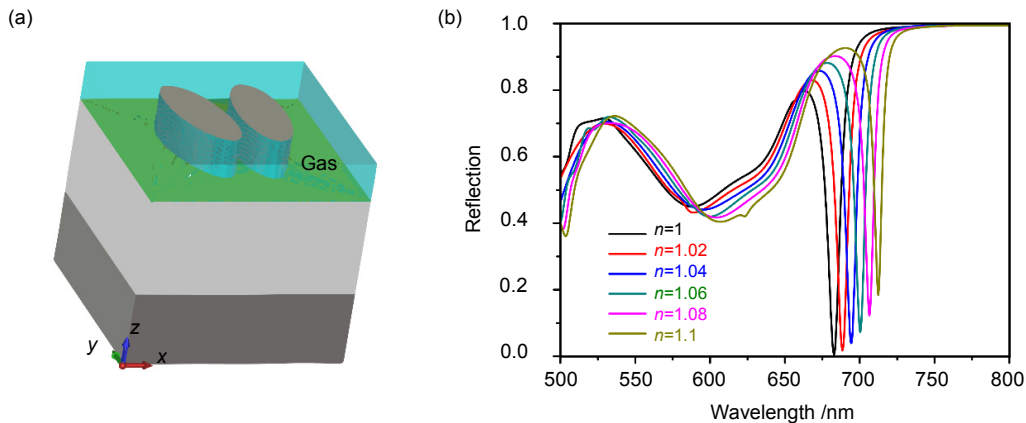


图 5 (a) 不对称双椭圆结构填充气体示意图. (b)  $n=1.0\sim 1.1$ (间隔 0.02)变化范围内反射率谱线图.

Fig. 5 (a) Asymmetric double elliptical cylinders filled of gas in the gap. (b) Reflection spectra with refractive index  $n$  varying from 1.0 to 1.1 with an increment of 0.02.

随着折射率的增大, 反射谱线发生了近似等间距的红移。由上述折射率灵敏度和品质因数计算公式可得, 该结构的折射率灵敏度  $S=299$  nm/RIU, 品质因数  $FOM=27.9$ 。该传感器通过引入 Fano 共振, 提高了折射率灵敏度和品质因数, 能够应用于高灵敏度传感器。

## 5 结论

本文设计和研究了基于 Fano 共振的等离子体共振传感器, 通过采用不对称双椭圆柱结构在金属纳米结构中引入不对称性来产生 Fano 共振。结构中的 Fano 共振是由偶极子模式和四偶极子模式耦合作用产生的, 四偶极子模式减小了 Fano 共振的辐射损耗。 $\alpha=25^\circ$  时, 反射率谱线的半高全宽仅为 10.8 nm, 实现了窄带特性。并且在一定的范围内, 随着旋转角度  $\alpha$  的增大, 即不对称度的增大, Fano 共振的强度也会增大。在环境折射率  $n=1.0\sim 1.1$  的变化范围内, 传感器的折射率灵敏度  $S$  可以达到 299 nm/RIU, 品质因数  $FOM$  可以达到 27.8, 提高了基于表面等离子体共振的金属纳米结构传感器的性能, 在高灵敏度传感器的应用上有着巨大的潜力。

## 基金项目

国家自然科学基金资助项目(项目号 61575032)。

## 参考文献

- Polman A. Applied physics: plasmonics applied[J]. *Science*, 2008, **322**(5903): 868–869.
- Schuller J A, Barnard E S, Cai Wenshan, et al. Plasmonics for extreme light concentration and manipulation[J]. *Nature Materials*, 2010, **9**(3): 193–204.
- Guo Yinghui, Yan Lianshan, Pan Wei, et al. A plasmonic splitter based on slot cavity[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(15): 13831–13838.
- Atwater H A, Polman A. Plasmonics for improved photovoltaic devices[J]. *Nature Materials*, 2010, **9**(10): 205–213.
- Pu Mingbo, Hu Chenggang, Wang Min, et al. Design principles for infrared wide-angle perfect absorber based on plasmonic structure[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(18): 17413–17420.
- Stewart M E, Anderton C R, Thompson L B, et al. Nanostructured plasmonic sensors[J]. *Chemical Reviews*, 2008, **108**: 494–521.
- Kabashin A V, Evans P, Pastkovsky S, et al. Plasmonic nanorod metamaterials for biosensing[J]. *Nature Materials*, 2009, **8**(11): 867–871.
- Larsson E M, Alegret J, Käll M, et al. Sensing characteristics of NIR localized surface plasmon resonances in gold nanorings for application as ultrasensitive biosensors[J]. *Nano Letters*, 2007, **7**(5): 1256–1263.
- Rodriguez S R K, Abass A, Maes B, et al. Coupling bright and dark plasmonic lattice resonances[J]. *Physical Review X*, 2011, **1**(2): 021019.
- Moritake Y, Kanamori Y, Hane K. Experimental demonstration of sharp Fano resonance in optical metamaterials composed of asymmetric double bars[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(13): 4057–4060.
- Cetin A E, Altug H. Fano resonant ring/disk plasmonic nanocavities on conducting substrates for advanced biosensing[J]. *ACS Nano*, 2012, **6**(11): 9989–9995.
- Song Maowen, Yu Honglin, Wang Changtao, et al. Sharp Fano resonance induced by a single layer of nanorods with perturbed periodicity[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(3): 2895–2903.
- Pu Mingbo, Hu Chenggang, Huang Cheng, et al. Investigation of Fano resonance in planar metamaterial with perturbed periodicity[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(1): 992–1001.
- Fedotov V A, Rose M, Prosvirnin S L, et al. Sharp trapped-mode resonances in planar metamaterials with a broken structural symmetry[J]. *Physical Review Letters*, 2007, **99**(14): 147401.
- Merbold H, Bitzer A, Feurer T. Near-field investigation of induced transparency in similarly oriented double split-ring resonators[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(9): 1683–1685.
- Liu Shaoding, Yang Zhi, Liu Ruiping, et al. Plasmonic-induced optical transparency in the near-infrared and visible range with double split nanoring cavity[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(16): 15363–15370.
- Mukherjee S, Sobhani H, Lassiter J B, et al. Fano shells: nanoparticles with built-in Fano resonances[J]. *Nano Letters*, 2010, **10**(7): 2694–2701.
- Hao Feng, Sonnefraud Y, Van Dorpe P, et al. Symmetry breaking in plasmonic nanocavities: subradiant LSPR sensing and a tunable Fano resonance[J]. *Nano Letters*, 2008, **8**(11): 3983–3988.
- Liang Yuzhang, Peng Wei, Li Lixia, et al. Tunable plasmonic resonances based on elliptical annular aperture arrays on conducting substrates for advanced biosensing[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(16): 3909–3912.
- Fu Yuan Hsing, Zhang Jingbo, Yu Yefeng, et al. Generating and manipulating higher order Fano resonances in dual-disk ring plasmonic nanostructures[J]. *ACS Nano*, 2012, **6**(6): 5130–5137.
- Chang Weishun, Lassiter J B, Swanglap P, et al. A plasmonic fano switch[J]. *Nano Letters*, 2012, **12**(9): 4977–4982.
- Ye Jian, Wen Fangfang, Sobhani H, et al. Plasmonic nanoclusters: near field properties of the Fano resonance interrogated with SERS[J]. *Nano Letters*, 2012, **12**(3): 1660–1667.
- Bozhevolnyi S I, Jung J. Scaling for gap plasmon based waveguides[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(4): 2676–2684.
- Malitson I H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1965, **55**(10): 1205–1209.
- Fedotov V A, Rose M, Prosvirnin S L, et al. Sharp trapped-mode resonances in planar metamaterials with a broken structural symmetry [J]. *Physical Review Letters*, 2007, **99**(14):147401.
- Luk'yanchuk B, Zheludev N I, Maier S A, et al. The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials[J]. *Nature materials*, 2010, **9**: 707–715.