

# 激光与光电子学进展

## 基于 anapole 模式高灵敏度检测的等离子体结构设计

李智慧, 王艳红\*, 武京治

中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051

**摘要** 设计一种基于 anapole 模式的高灵敏度传感器, 由金属反射层、SiO<sub>2</sub> 薄膜和开槽硅圆盘构成。利用硅纳米阵列中的 anapole 模式激发金属反射层以产生等离子体共振, 通过模式匹配和相邻结构之间的耦合可以在周期性纳米结构中产生尖锐的共振峰。采用时域有限差分法对结构进行仿真分析, 研究不同参数对传感器灵敏度的影响。仿真结果表明, 纳米结构可以显著增强局部电场, 同时降低能量的吸收率。利用圆偏振光可以在纳米结构周围实现自旋-轨道角动量的转换, 有利于对神经递质等生物分子的传感。

**关键词** 衍射; anapole 模式; 等离子体; 谐振波; 高灵敏性

中图分类号 O436 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0305001

## Plasmonic Structure Design for High-Sensitivity Detection Based on anapole Mode

Li Zhihui, Wang Yanhong\*, Wu Jingzhi

School of Information and Communication Engineering, North University of China,  
Taiyuan, Shanxi 030051, China

**Abstract** A high sensitivity sensor based on anapole mode is designed, which consists of a metal reflector, a SiO<sub>2</sub> thin film and a slotted silicon disk. The anapole mode in silicon nanoarray is used to excite the metal reflector layer to generate plasma resonance, and sharp resonance peaks can be generated in the periodic nanostructures through mode matching and coupling between adjacent structures. The structure is simulated and analyzed by finite difference time domain method, and the influence of different parameters on the sensitivity of the sensor is studied. The simulation results show that the nanostructures can significantly enhance the local electric field and reduce the energy absorption rate. The spin-orbital angular momentum conversion around nanostructures can be realized by using circularly polarized light, which is beneficial to the sensing of biomolecules such as neurotransmitters.

**Key words** diffraction; anapole mode; plasma; resonance wave; high sensitivity

**OCIS codes** 050.4865; 050.5745; 060.4510

### 1 引言

人脑中神经元和神经递质的功能和组织一直是生命科学领域中的重要研究课题之一。在过去的几

十年中,研究者已经使用了各种传感器基于电化学和荧光的方法来识别样品,而这些传感器在纳米(nm)至微米( $\mu\text{m}$ )的检测范围内表现良好。在采用电化学的方法识别样品的过程中,信号会受到外部

收稿日期: 2020-08-27; 修回日期: 2020-09-24; 录用日期: 2020-09-30

\*E-mail: wanyanhong@nuc.edu.cn

环境(如电磁辐射)的影响,而电磁干扰对体内的分子,尤其会对神经系统造成伤害<sup>[1]</sup>。近年来,使用光学共振的金属纳米结构来控制 and 聚集衍射极限尺度下的电磁场是很普遍的方法之一。已有研究结果表明,使用等离子体金属纳米天线能够极大地增强单个量子发射器与其周围光子之间的相互作用,这不仅能够增强发光,还能实现皮秒级超快发射和定向发射的控制,从而使其非常适合于单分子的超灵敏生物检测。能量转移的过程中,金属中自由电子的能量会产生损耗,这不会抑制荧光发射,还会导致天线及其周围环境产生大量的焦耳热,该热量足以熔化纳米粒子并杀死细胞,而一些生物分子(如蛋白质和核酸等)的传感需要在适温下进行,因此等离子体纳米天线的应用受到根本的限制<sup>[2]</sup>。

anapoles 模式可以在同时含有电偶极矩和环形偶极矩的纳米结构中被激发,这些电偶极矩和环形偶极矩会导致辐射场发生相消干涉,并且在远场中可以观察到特定波长处透射光谱率的明显下降。anapole 一直是人们感兴趣的研究对象之一,现已有研究人员在玻璃衬底上制作硅纳米盘,并且在光学频率范围内可以激发 anapole 模式<sup>[3]</sup>。对于光学频率范围内的 anapole 模式,从物理学的角度可以简单理解为,当在同一结构中存在电偶极子(ED)和环形偶极子(TD)时会激发 anapole 模式,使得电偶极子和环形偶极子各自的辐射模式可以发生相消干涉,从而抵消远场中的全散射光,并且具有非零的近场激励<sup>[4]</sup>。本文设计一种基于 anapole 模式的紧凑型(尺度为几百纳米)和高灵敏度液体折射率传感器,旨在通过改变其共振波长来实现对神经递质等生物分子的高灵敏度检测。

## 2 结构与方法

anapole 介电纳米结构如图 1 所示。纳米硅圆盘的直径  $d$  为 310 nm,高  $h$  为 50 nm, $\text{SiO}_2$  薄膜的厚度  $t$  为 80 nm 并将其放置在由金属材料构成的金属背反射膜上,将纳米硅圆盘放在  $\text{SiO}_2$  薄膜上并在其中心开凿矩形槽,其长  $l$  为 130 nm,宽  $w$  为 10 nm,极化周期  $T$ (相邻两个硅圆盘圆心之间的距离)为 600 nm。整个结构在水下工作,激发波长在可见光的范围内。

为了优化设计,采用时域有限差分(FDTD)法对结构进行仿真计算。在合理计算时间的情况下,为保证数值精度,将硅圆盘区域内的网格尺寸设为 3 nm,硅圆盘以外的区域采用自动分级网格。设置的结构为周期阵列,利用完全匹配层来吸收  $z$  传播方向上离开

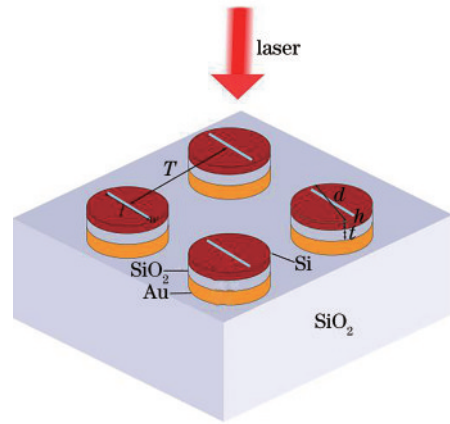


图 1 anapole 介电纳米结构示意图

Fig. 1 Schematic of anapole dielectric nanostructure

模拟域的波。仿真过程中,选用圆偏振光进行激发。

## 3 分析与讨论

为了给出结构的设计思想,在结构参数不变的情况下,对单个结构和周期结构进行计算,两种结构的透射光谱曲线如图 2 所示。从图 2 可以看到,周期结构在波长为 800 nm 处的波峰出现明显的骤降现象,透射率下降约为 66%,而且波峰很窄。

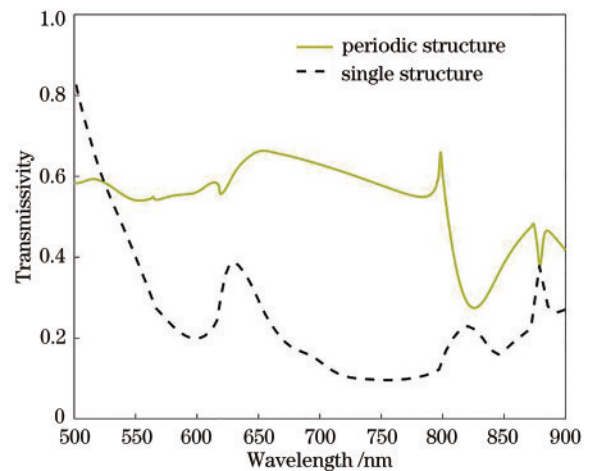


图 2 两种结构的透射光谱曲线

Fig. 2 Transmission spectrum curves of two structures

为了提高传感器的性能,接下来分析器件的结构参数对灵敏度的影响。传感器的  $T$ 、 $h$ 、 $t$ 、 $l$  和  $w$  决定传感器的灵敏度,因此研究 5 个参数中的一个发生变化而其他参数不变的传感器性能。

周期阵列中,每个纳米结构的极化周期  $T$  可以表示为<sup>[5]</sup>

$$T = \frac{E_0}{1/P - S}, \quad (1)$$

式中:  $E_0$  为入射平面波的振幅;  $P$  为极化率;  $S$  为偶极子之和。当波矢垂直于阵列平面时,  $S$  可以表示为

$$S = \sum_{j \neq i} \left[ \frac{(1 - ik \cdot |r_{ij}|)(3 \cos^2 \theta_{ij} - 1) \exp(ik \cdot |r_{ij}|)}{|r_{ij}|^3} + \frac{k^2 \sin^2 \theta_{ij} \exp(ik \cdot |r_{ij}|)}{|r_{ij}|} \right], \quad (2)$$

式中:  $k$  为入射平面波的波数, 其中  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为入射平面波的波长;  $r_{ij}$  为从偶极子  $i$  到偶极子  $j$  的向量;  $\theta_{ij}$  为  $r_{ij}$  与极化方向 (由入射电场引起) 之间的夹角。

当  $1/P$  和  $S$  的实部相等时, 则 (1) 式分母中的实部为零, 阵列中纳米结构的极化度变大, 这是激发表面等离子共振的条件之一<sup>[6]</sup>。图 3 为不同周期的透射光谱曲线。从图 3 可以看到, 随着周期的增加, 散射效率和衍射耦合强度逐渐降低, 因此透射光谱曲线发生右移且振幅减小。

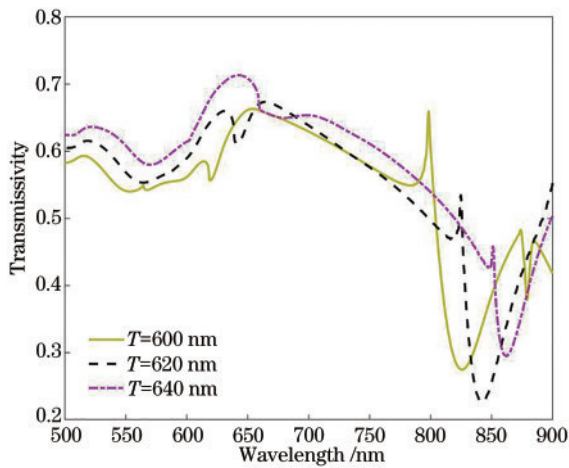


图 3 不同周期下的透射光谱曲线

Fig. 3 Transmission spectrum curves under different periods

当 anapole 模式的两个组成部分 ED 和 TD 在靠近金属反射层处发生共振时会与反射层相互作用, 这会改变结构的散射水平和能量耦合<sup>[7]</sup>, 因此将纳米硅圆盘放在  $\text{SiO}_2$  薄膜上。采用低折射率介电材料  $\text{SiO}_2$  层覆盖金属, 通过改变其厚度来增强纳米结构的共振 (即随着共振波振幅的增加, 透射光谱曲线的下降趋势更大)。图 4 为不同条件下的透射光谱曲线。从图 4(a) 可以看到, 随着  $\text{SiO}_2$  层厚度的增加, 共振波的振幅随之增加。从图 4(b) 可以看到, 随着硅高度的增加, 透射光谱曲线逐渐右移且峰值变大, 由此可以说明硅的高度主要影响共振波的振幅。

纳米硅圆盘内开槽长度和宽度的变化会改变共振波长, 也会改变增强因子。不同槽长和槽宽对透射光谱的影响如图 5 所示。从图 5 可以看到, 虽然不同的槽长和槽宽会给谐振峰值带来影响, 但影响还是很

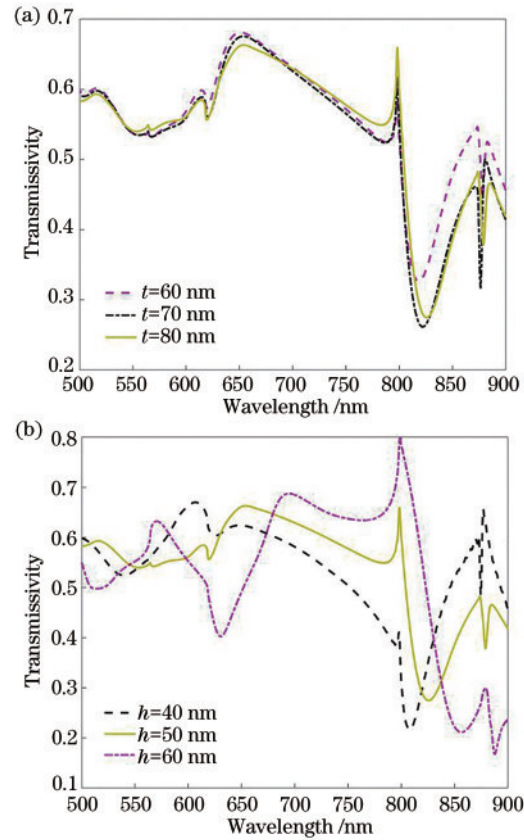


图 4 不同条件下的透射光谱曲线。(a) 不同厚度的  $\text{SiO}_2$ ; (b) 不同高度的 Si

Fig. 4 Transmission spectrum curves under different conditions. (a)  $\text{SiO}_2$  of different thickness; (b) Si of different heights

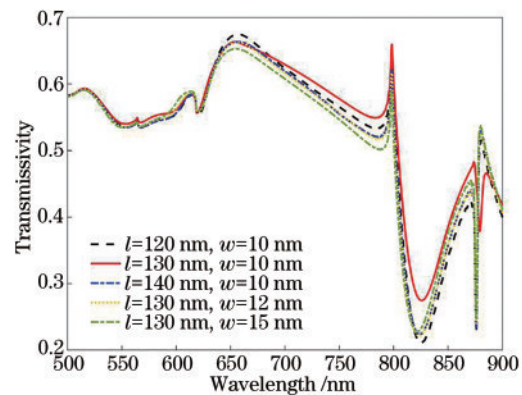


图 5 不同槽长和槽宽的透射光谱曲线

Fig. 5 Transmission spectrum curves of different slot lengths and slot widths



小的。槽长或槽宽主要会对电场产生影响,但槽过长或过短都不利于场增强。当槽长太短时,槽不能完全与场相互作用,因此不能实现最大的场增强;当槽长太长时,槽将与硅圆盘的边缘接触,使得电场不能被集中,因此不利于场增强。只有当槽的长度与硅圆盘的直径成一定比例,影响才会最小化,从而可以获得最高的增强因子。此外,通过减小(增加)槽的宽度也可以实现更高(更低)的场增强<sup>[8]</sup>。

当设计的介电纳米结构发生共振时,纳米结构内部的电场分布如图 6 所示。从图 6 可以看到,电场均被集中在纳米硅圆盘的中心开槽处,而且强度

非常强,圆盘中心的受限电场表明该结构具有电磁能量耦合的能力。不仅如此,从虚线框中可以很清晰地看到,利用圆偏振光可以激发硅圆盘周围产生的漩涡场。因为采用圆偏振光激发可以将入射圆偏振平面波的自旋角动量(SAM)转换为散射场的轨道角动量(OAM),而这种散射场正是由于所使用的高折射率材料(硅)构成的纳米结构介导的<sup>[9]</sup>,而且产生的旋涡场非常局部化,直径只有几百纳米,诱导的光学力足够强,可以推动特定尺寸的纳米粒子沿着纳米结构周围作螺旋轨迹运动,这有利于对神经递质等生物分子的传感。

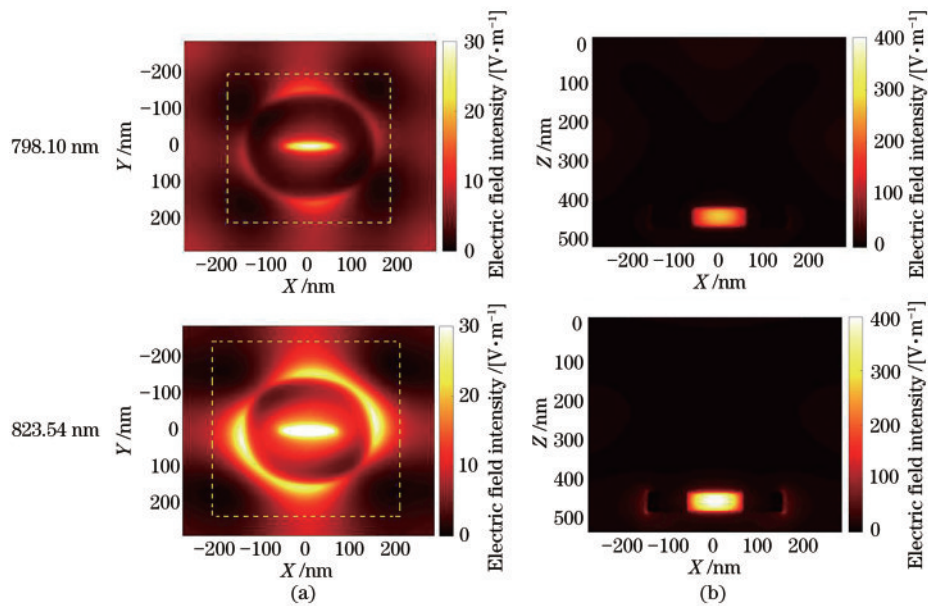


图 6 纳米结构在不同情况下的电场分布。(a)表面;(b)截面

Fig. 6 Electric field distribution of nanostructures under different conditions. (a) Surface; (b) cross section

为了证明所设计的结构能够实现对神经递质等生物分子的高灵敏度检测,图 7 为不同折射率(1.330~1.380)<sup>[10]</sup>对透射光谱的影响。从图 7 可以看到,共振波长曲线随着折射率的增加不断右移且

峰值不断减小。图 7 插图为 1.340~1.341 范围内的透射曲线放大图。从图 7 插图可以看到,在折射率改变很小(仅有 0.001)的情况下,共振波长也会发生变化,从而证明该结构传感的灵敏度。

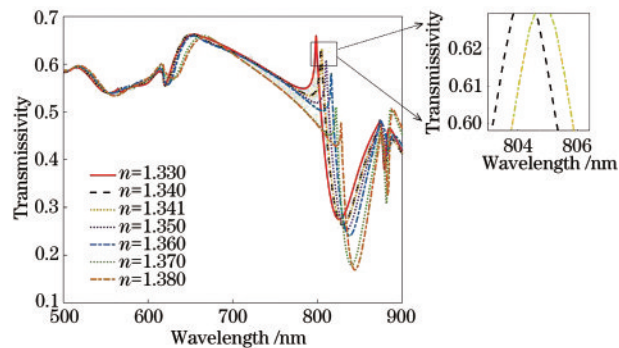


图 7 不同折射率的透射光谱曲线

Fig. 7 Transmission spectrum curves of different refractive index

## 4 结 论

对于神经传感的应用来说,anapole电介质纳米结构有很大的优势。如anapole模式可以在纳米结构的中心处产生高度集中的电磁近场<sup>[11]</sup>;与该模式相关的电场被限制在纳米天线内,而不会延伸到周围介质或邻近的纳米天线中<sup>[12]</sup>;该结构所需的材料普通,制造起来简单;通过观察来自每个单独结构的远场散射光谱,可以很容易地测量共振波长;使用平面波就可以很容易地激发anapole模式;作为一种全介电结构,纳米天线不会受到所有基于金属的

等离子体结构所共有的光损耗和热效应的影响<sup>[13]</sup>。

本课题组设计一种基于 anapole 模式的紧凑型高灵敏度液体折射率传感器。仿真结果表明,通过优化结构的几何参数来确定最优结构,从而改变其折射率来判断传感灵敏度。该结构制备简单,使得利用最先进的微加工技术实现对神经递质分子的高灵敏度检测成为可能,而且对实现高分辨率化学和生物检测具有重要的指导意义。

### 参 考 文 献

- [1] Rithesh R D, Prasanth S, Vineeshkumar T V, et al. Surface plasmon resonance based fiber optic dopamine sensor using green synthesized silver nanoparticles[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 224: 600-606.
- [2] Zhao J, Wang Y, Wang Y P. Graphene-oxide-enhanced surface plasmon resonance fiber sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(23): 230601.  
赵静,王英,王义平. 氧化石墨烯增强型表面等离子体共振光纤传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(23): 230601.
- [3] Cambiasso J, Grinblat G, Li Y, et al. Bridging the gap between dielectric nanophotonics and the visible regime with effectively lossless gallium phosphide antennas[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(2): 1219-1225.
- [4] Basharin A A, Kafesaki M, Economou E N, et al. Dielectric metamaterials with toroidal dipolar response [J]. *Physical Review X*, 2015, 5: 011036.
- [5] Kravets V G, Kabashin A V, Barnes W L, et al. Plasmonic surface lattice resonances: a review of properties and applications [J]. *Chemical Reviews*, 2018, 118(12): 5912-5951.
- [6] Hou H J, Liu J Y, Xiao B W, et al. Formation of orthogonal and parallel surface-lattice resonances with asymmetric nanoparticle array [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(15): 152501.  
侯浩杰,刘钧妍,肖博文,等. 基于非对称纳米颗粒阵列的垂直与平行表面晶格共振[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(15): 152501.
- [7] Miroshnichenko A E, Evlyukhin A B, Yu Y F, et al. Nonradiating anapole modes in dielectric nanoparticles[J]. *Nat Commun*, 2015, 6: 8069.
- [8] Yang Y Q, Zenin V A, Bozhevolnyi S I. Anapole-assisted strong field enhancement in individual all-dielectric nanostructures[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1960-1966.
- [9] Huang Y, Zhang Y R, Zhong Z Q, et al. Rapid polarization rotation smoothing scheme based on interference of circularly polarized vortex beamlets [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0905003.  
黄媛,张寅瑞,钟哲强,等. 基于涡旋圆偏振光干涉的偏振快速旋转束匀滑方案[J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0905003.
- [10] Wan J X, Li Y L. Recent advances in detection methods for neurotransmitters [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2020, 48(3): 307-315.  
万金霞,李毓龙. 神经递质检测方法的研究进展 [J]. *分析化学*, 2020, 48(3): 307-315.
- [11] Li J, Verellen N, van Dorpe P. Enhancing magnetic dipole emission by a nano-doughnut-shaped silicon disk[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(8): 1893-1898.
- [12] Evlyukhin A B, Novikov S M, Zywiets U, et al. Demonstration of magnetic dipole resonances of dielectric nanospheres in the visible region[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(7): 3749-3755.
- [13] Albella P, de la Osa R A, Moreno F, et al. Electric and magnetic field enhancement with ultralow heat radiation dielectric nanoantennas: considerations for surface-enhanced spectroscopies [J]. *ACS Photonics*, 2014, 1(6): 524-529.