

基于金属圆弧孔阵列强透射的折射率传感特性

肖功利^{1,2}, 刘小刚¹, 杨宏艳³, 蒋行国¹, 王宏庆¹, 郑龙¹, 刘利¹,
李海鸥¹, 李琦¹, 张法碧¹, 傅涛¹, 陈永和¹

¹ 桂林电子科技大学广西精密导航技术与应用重点实验室, 广西 桂林 541004;

² 广西信息科技实验中心, 广西 桂林 541004;

³ 桂林电子科技大学计算机与信息安全学院, 广西 桂林 541004

摘要 提出了一种由左右、上下对称的一大一小圆弧组成的金属圆弧孔阵列结构。利用该结构形成的法布里-珀罗腔来加强表面等离激元的耦合作用, 以获得较好的强透射现象; 同时研究了基于该现象的折射率传感特性。采用有限时域差分法研究了该孔阵列结构中大小圆弧孔的半径、两圆弧的圆心距和阵列周期对强透射现象的影响。研究发现, 当大圆弧半径为 95 nm、小圆弧半径为 70 nm、两圆弧的圆心距为 100 nm、周期为 425 nm 时, 该结构具有较好的强透射现象, 其灵敏度为 279 nm/RIU, 为下一代高性能微纳米等离子体传感器的设计提供了理论参考。

关键词 表面光学; 折射率传感特性; 有限时域差分法; 金属圆弧孔阵列; 强透射; 法布里-珀罗腔; 表面等离激元

中图分类号 TN252

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0224001

Refractive Index Sensing Property Based on Extraordinary Optical Transmission of Metal Circular Arc Hole Array

Xiao Gongli^{1,2}, Liu Xiaogang¹, Yang Hongyan³, Jiang Xingguo¹, Wang Hongqing¹,
Zheng Long¹, Liu Li¹, Li Haiou¹, Li Qi¹, Zhang Fabi¹, Fu Tao¹, Chen Yonghe¹

¹ *Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;*

² *Guangxi Experiment Center of Information Science, Guilin, Guangxi 541004, China;*

³ *School of Computer Science and Information Security, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China*

Abstract The metal circular arc hole array structure consisting of two symmetrical large and small circular arcs, at the positions of up and down, left and right, is proposed. In order to obtain an extraordinary optical transmission phenomenon, we use Fabry-Perot cavity formed by the structure to enhance the coupling of surface plasmon polariton (SPP). At the same time, a refractive index sensing property is investigated based on the phenomenon. The effects of the radiuses of big and small circular arc holes, the center distance of two circular arcs and the array period on extraordinary optical transmission phenomenon are investigated with the utilization of finite-difference time-domain (FDTD) method. It is found that when the radius of the big and small circular arcs are 95 nm and 70 nm, respectively, the center distance of the two circular arcs is 100 nm and the period is 425 nm, this structure has an extraordinary optical transmission phenomenon and its sensitivity is 279 nm/RIU. These results serve as a theory reference for the design of next-generation high-performance micro-nano plasmonics sensors.

Key words optics at surfaces; refractive index sensing property; finite-difference time-domain method; metal circular

收稿日期: 2017-05-15; 收到修改稿日期: 2017-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(61465004,61765004,61764001)、广西自然科学基金(2017GXNSFAA198164,2016GXNSFAA380006,2013GXNSFAA019338,2013GXNSFAA0199335)、桂林电子科技大学研究生教育创新计划(2016YJCX95,YJCX201522)、广西精密导航技术与应用重点实验室主任基金(DH201703,DH201702,DH201701)

作者简介: 肖功利(1975—),男,副教授,主要从事微纳光电子器件与表面等离激元方面的研究。

E-mail: xgl.hy@126.com(通信联系人)

1 引 言

1998年 Ebbesen 等^[1]首次报道了光通过金属亚波长孔阵列时的超强透射(EOT)现象,该现象在等离子体滤波器、热辐射和生化传感等领域具有的潜在应用价值引起了研究人员的广泛关注^[2-4]。EOT的工作机制主要是通过光与金属-电介质界面产生的表面等离子激元(SPP)的耦合作用来加强透射^[3-4]。最初的研究主要探讨金属-电介质结构中的孔阵列、材料和周期等参数^[5-6]对 EOT 的影响。随着研究的深入,研究人员发现基于 EOT 现象的传感特性具有高灵敏度、可实时监测、无标记、成本低等优点,这使它逐渐成为新型传感器的研究方向之一^[7-9],其物理机理是利用电介质的介电常数对 EOT 的透射峰波长极为敏感的特性^[8]。

近年来,基于 EOT 特性的光纤型传感器成为研究热点。2001年, Haynes 等^[9]设计了一种亚波长纳米颗粒状结构传感器,其线性度和灵敏度都较好;2009年, Sandblad 等^[10]在光纤末端设计了一种亚波长条状阵列的折射率传感器,其灵敏度为 195 nm/RIU;2011年, Lin 等^[11]设计了一种亚波长金纳米点阵列结构的折射率传感器,该传感器具有较好的灵敏度;2013年, Jia 等^[12]在光纤末端利用模板转移技术获得的折射率传感器的灵敏度为 167 nm/RIU。然而,这些报道主要集中于对单一阵列结构传感器的研究,存在着透射率不高或灵敏度低等不足,而且基于复合圆弧孔阵列结构的 EOT 折射率传感特性的报道很少。基于此,本文提出了一种由左右、上下对称的一大一小圆弧组成的金属圆弧孔阵列结构,利用该结构形成的法布里-珀罗(F-P)腔来加强 SPP 的耦合作用,以期获得较好的 EOT 现象,并基于该现象研究了折射率的传感特性。采用有限时域差分(FDTD)法系统研究了大小圆弧孔半径(R 、 r)、圆弧圆心距(d)和周期(P)等主要参数对 EOT 现象的影响。通过优化这些结构参数后发现,当 R 、 r 分别为 95 nm 和 70 nm, d 为 100 nm, P 为 425 nm 时,该结构可获得较好的 EOT 现象。在最优参数条件下,对该结构的折射率传感灵敏度进行了分析。

2 结构设计与数值模拟

图 1(a)为本课题组设计的金属圆弧孔阵列结

构三维示意图。其中圆柱形下半部分为二氧化硅衬底,上半部分为金膜。为了更好地研究 EOT 特性,金膜厚度 $H=60$ nm,金膜上均匀排列着 N 个相同周期的由左右、上下对称的一大一小圆弧组成的金属圆弧孔阵列结构,其中大圆弧孔与小圆弧孔相连接,大圆弧孔和两个小圆弧孔的圆心在同一条直线上,圆弧孔和金膜表面的电介质均为空气,其相对介电常数为 1。图 1(b)为金膜表面单个周期孔阵列结构的 x - y 平面示意图,阵列周期为 P ,大小圆弧孔半径分别为 R 和 r ,大小圆弧孔圆心之间的距离为 d 。平面波光束垂直入射,入射光波的波长范围为 750~1300 nm。采用 FDTD 法对该结构进行数值仿真。其中 x 、 y 方向设置为周期性的边界条件, z 方向为完美匹配层的边界条件。为了提高仿真精度,网格大小设置为 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 4$ nm。光透过金属孔阵列结构的透射率 T 定义为

$$T = P_{\text{out}}/P_{\text{in}} = |E_{\text{out}}/E_{\text{in}}|^2, \quad (1)$$

式中 P_{out} 为金属狭缝阵列透射光波功率, P_{in} 为入射光波功率, E_{out} 为透射光波电场强度, E_{in} 为入射光波电场强度。

图 1(c)为模拟计算得到的单一大圆孔、对称小圆孔和复合圆弧孔阵列结构的零阶透射光谱图。在这三种结构中都出现了窄带强透射峰, T_{peak} 、 λ_{peak} 分别为透射峰处的透射率和波长。大圆和大圆弧孔的半径均为 85 nm,对称小圆和小圆弧孔的半径均为 55 nm。对称的小圆弧孔的 λ_{peak} 为 773 nm,其 T_{peak} 为 41%;大圆弧孔的 λ_{peak} 为 786 nm,其 T_{peak} 为 64%;复合圆弧孔的 λ_{peak} 为 971 nm,其 T_{peak} 为 92%。此结果表明,与单一的大小圆孔阵列结构相比,该复合结构呈现出了较好的 EOT 现象。 ΔT_{peak} 分别提高了 28%和 51%,且透射峰的位置也出现了红移现象。这是由于复合圆弧孔阵列结构中形成一个 F-P 腔,加强了耦合作用^[9]。为了清楚地反映其耦合情况,对这三种结构的透射峰波长在 x - y 截面的电场能量密度分布进行研究,结果如图 1(d)~(f)所示。从图中可以看出,相比较于其他两种结构,复合圆弧孔阵列结构的电场强度相对较强,电场主要分布在圆弧孔和金膜的表面。这表明在光的照射下,圆弧孔阵列的 SPP 被激发,由于光在复合圆弧孔 F-P 腔中不断共振,从而使耦合作用越来越强。

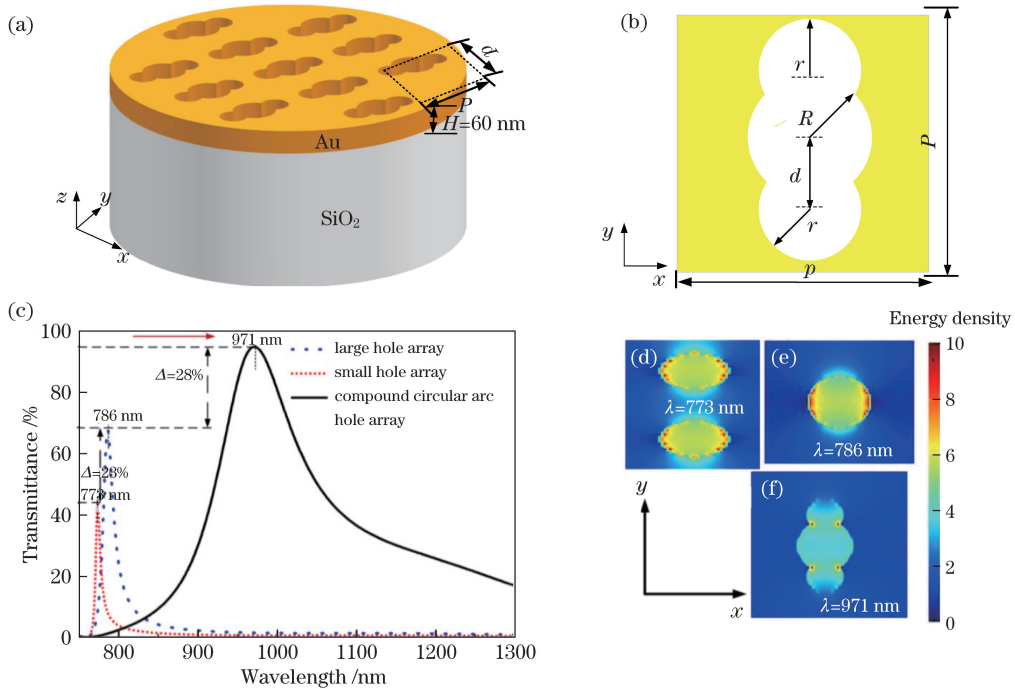


图 1 金属圆弧孔阵列结构。(a)三维示意图；(b) x - y 截面的二维示意图；(c)三种不同结构的透射率与波长的关系；(d)~(f)透射峰波长处的电场能量密度分布图

Fig. 1 Metal circular arc hole array structure. (a) Three-dimensional schematic; (b) two-dimensional schematic of x - y section; (c) transmittance as a function of wavelength for three different structures; (d)-(f) electric-field energy density distributions at transmission peak wavelengths

3 结果与讨论

为深入研究该复合圆弧孔阵列结构的透射现象,详细探讨 R 、 r 、 d 、 P 对 λ_{peak} 和 T_{peak} 的影响,图 2(a)所示为不同 R 时复合圆弧孔阵列结构透射率与波长的关系,图 2(b)为与之对应的大圆弧孔半径 R 与 λ_{peak} 、 T_{peak} 的关系。由图 2 可以看出,随着大圆弧孔半径 R 以 10 nm 步长从 65 nm 增加到 105 nm, λ_{peak} 从 1049 nm 有规律地蓝移到 922 nm,即透射峰

对应的波长减小。这是由于大圆弧孔半径 R 增大导致该结构周围的有效折射率变小,且 λ_{peak} 与有效折射率呈正向相关, λ_{peak} 会向短波长处移动,这与文献[8]报道的变化趋势一致。 T_{peak} 先增大后减小,在 $R=95$ nm 处达到最大。透射率先增大是由于当半径相对较小时,光的透射系数主要受 SPP 影响;随着半径逐渐增大,金属中的局域有限表面等离子体(LSPR)效应增强,并与 SPP 的耦合更加强烈,形成的能量也随之增加,光的透射效率也会增大。但是

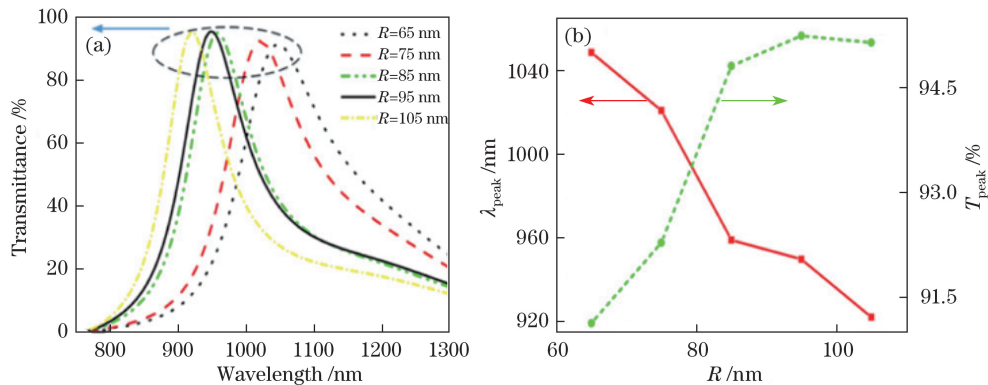


图 2 (a)当 $r=55$ nm、 $d=105$ nm 时,不同 R 下复合圆弧孔阵列结构透射率与波长的关系;(b) λ_{peak} 、 T_{peak} 与 R 的关系

Fig. 2 (a) Transmittance as a function of wavelength for compound circular arc hole array at different R when $r=55$ nm and $d=105$ nm; (b) relationship between λ_{peak} or T_{peak} and R

当半径达到一定值时, SPP 与 LSPR 的波矢相匹配, 光的透射系数达到最大, 继续增加半径, 能量在 F-P 腔内不断进行谐振而引起损耗, 从而使 T_{peak} 逐渐减小。

在 $R=95\text{ nm}$ 、 $d=105\text{ nm}$ 的条件下, 讨论 r 对 EOT 现象的影响。图 3(a) 为改变不同 r 时透射率与波长的关系, 其中 r 在 $40\sim 80\text{ nm}$ 范围内, 每隔 10 nm 改变一次。由图 3 可以看出: 不同 r 时均有 EOT 现象出现; 透射峰 λ_{peak} 随 r 的改变而改变, 透射峰位置出现了有规律的红移, 这是由于透射峰的位置与该结构周围的有效折射率呈正向相关, 当 r 增大时, 该结构周围的有效折射率增大, λ_{peak} 也随之

增大。图 3(b) 更加清楚地反映了图 3(a) 的变化趋势。从图 3(b) 中可以发现: 当 r 在 $40\sim 70\text{ nm}$ 区间时, 透射率 T_{peak} 随 r 增大而增加; 当 r 在 $70\sim 80\text{ nm}$ 区间时, T_{peak} 随 r 增大而减小, T_{peak} 在 $r=70\text{ nm}$ 时达到最大, T_{peak} 在 $94.7\%\sim 96.4\%$ 之间变化; 随着 r 从 40 nm 增大到 80 nm , λ_{peak} 从 915 nm 增大到 1010 nm 。

当 $R=95\text{ nm}$ 、 $r=70\text{ nm}$ 时, 不同 d 下复合圆弧孔阵列结构的透射率与波长的关系如图 4 所示。其中大小圆弧的圆心距 d 为 $90\sim 110\text{ nm}$, 步长为 5 nm , 图 4(b) 为与之对应的小圆弧孔的 d 与 λ_{peak} 和 T_{peak} 的关系。从图 4(a)、(b) 可知, 随着 d 增大,

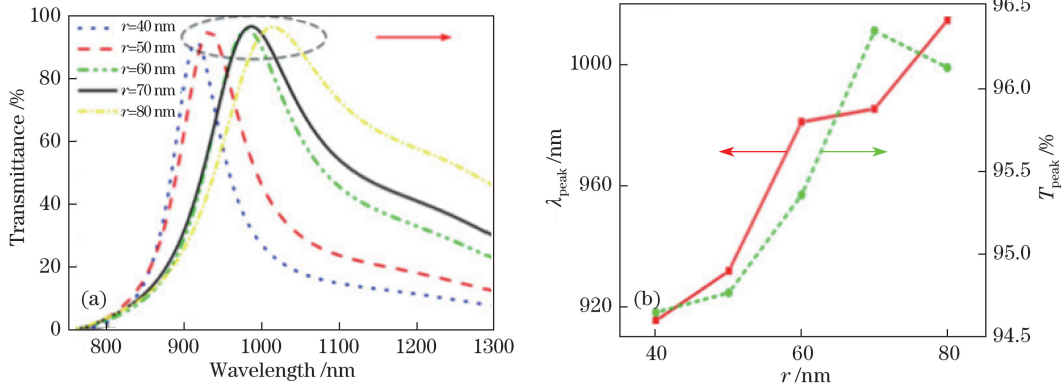


图 3 (a) 当 $R=95\text{ nm}$ 、 $d=105\text{ nm}$ 时, 不同 r 下复合圆弧孔阵列结构透射率与波长的关系; (b) λ_{peak} 、 T_{peak} 与 r 的关系
Fig. 3 (a) Transmittance as a function of wavelength for compound circular arc hole array at different r when $R=95\text{ nm}$ and $d=105\text{ nm}$; (b) relationship between λ_{peak} or T_{peak} and r

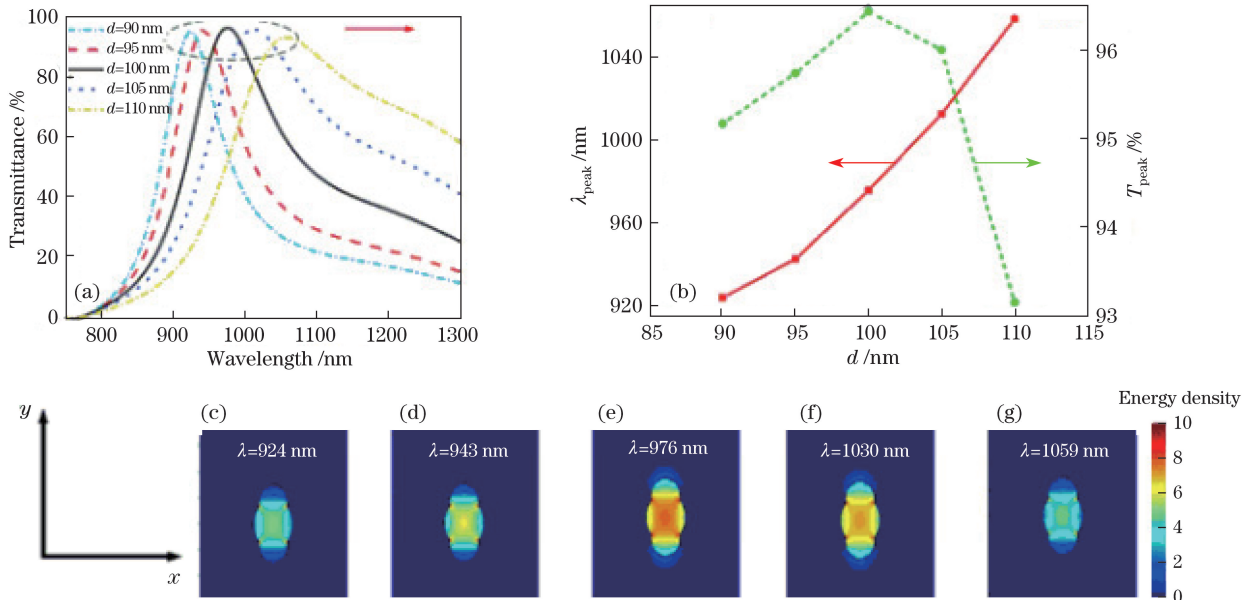
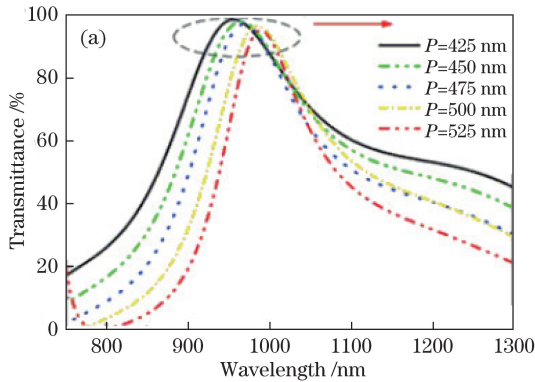


图 4 (a) 当 $R=95\text{ nm}$ 、 $r=70\text{ nm}$ 时, 不同 d 下复合圆弧孔阵列结构透射率与波长的关系; (b) λ_{peak} 、 T_{peak} 与 d 的关系; (c)~(g) 不同透射峰波长处的电场能量密度分布

Fig. 4 (a) Transmittance as a function of wavelength for compound circular arc hole array at different d when $R=95\text{ nm}$ and $r=70\text{ nm}$; (b) relationship between λ_{peak} or T_{peak} and d ; (c)-(g) electric-field energy density distributions at different transmission peak wavelengths

T_{peak} 先增大后减小,在 $d=100\text{ nm}$ 时达到最大, λ_{peak} 不断红移,即透射峰对应的波长不断增大。图 4(c)~(g)为此结构不同 d 下透射峰的电场能量密度分布,从图中可以看出,所有局域电场的能量被高度聚集在夹缝内,这是由于当光波耦合进入波导时,有横磁(TM)波模式被激发(即 SPP 波被激发)。沿着波导金属界面传播的 SPP 经过纳米阵列狭缝时激发了金属狭缝边缘的 LSPR,并与之产生强耦合,这时的强透射是 LSPR 和入射波与 SPP 的共同激发和耦合作用^[13-18]导致的,从而对透射场的能量产生影响。图 4(c)~(g)中的电场强度总体趋势是先增大后减小, $\lambda=976\text{ nm}$ 时的电场最强, $\lambda=1059\text{ nm}$ 时的电场最弱,这与图 4(a)中的圆心距与透射率的光谱图趋势一一对应。另由图 4(c)~(g)可知:当圆心距相对较小时,光的透射系数主要由



SPP 引起,随着圆心距逐渐增大, LSPR 效应逐渐增强,并与 SPP 的耦合越来越强,形成的能量也随之增加,光的透射效率逐渐增大。但是当圆心距达到一定值时,光的透射系数已经达到最大,继续增大圆心距,能量在 F-P 内不断进行谐振而激发高阶模,从而引起损耗,使 T_{peak} 逐渐减小。

图 5(a)为 $R=95\text{ nm}$ 、 $r=70\text{ nm}$ 、 $d=100\text{ nm}$ 时,复合圆弧阵列结构透射率与波长的关系,图 5(b)为与之对应的周期 P 与 λ_{peak} 、 T_{peak} 的关系。其中, λ_{peak} 与周期 P 的关系为

$$\lambda_{\text{peak}} = \frac{P}{\sqrt{i^2 + j^2}} \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m}}, \quad (2)$$

式中 i 、 j 为衍射级数,一般取整数,在这里取 $i=1$ 、 $j=0$ 或 $i=0$ 、 $j=1$; ϵ_m 、 ϵ_d 分别为金属和周围环境的电介质常数。

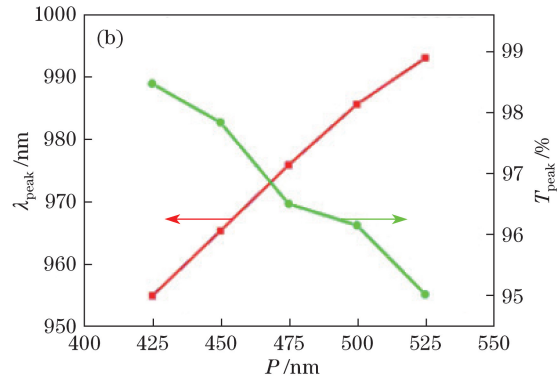


图 5 (a)当 $R=95\text{ nm}$ 、 $r=70\text{ nm}$ 、 $d=100\text{ nm}$ 时,不同 P 下复合圆弧孔阵列结构透射率与波长的关系;
(b) λ_{peak} 、 T_{peak} 与 P 的关系

Fig. 5 Transmittance as a function of wavelength for compound circular arc hole array at different P when $R=95\text{ nm}$, $r=70\text{ nm}$, and $d=100\text{ nm}$; (b) relationship between λ_{peak} or T_{peak} and P

由图 5 可见,随着单位周期从 425 nm 增大到 525 nm (步长为 25 nm), λ_{peak} 从 955 nm 逐渐红移到 1017 nm 。由(2)式可得:当 ϵ_d 、 ϵ_m 、 i 、 j 一定时, λ_{peak} 与 P 的变化趋势相同,因此当周期增大时,透射峰逐渐红移, T_{peak} 从 99% 逐渐减小到 95% 。与文献[19]相比,本研究设计的结构具有更好的透射特性和更宽的传输带宽。

图 6 所示为 $R=95\text{ nm}$ 、 $r=70\text{ nm}$ 、 $d=100\text{ nm}$ 、 $P=425\text{ nm}$ 时,复合圆弧孔阵列结构折射率 n 对透射特性和灵敏度的影响。其中,灵敏度的计算公式为

$$S = \frac{d\lambda_{\text{peak}}}{dn}, \quad (3)$$

式中 S 为灵敏度, $d\lambda_{\text{peak}}$ 为透射峰的移动距离, dn 为传感器周围环境折射率的变化量。图 6(a)为透射

率与波长的关系图,可以看出:随着折射率从 1.0 增加到 1.8 , T_{peak} 总体呈下降的趋势;折射率为 1.0 时,透射率最大,为 99% ;折射率为 1.8 时,透射率最小,为 87% ; λ_{peak} 从 956.89 nm 红移到 1180.39 nm ,这是由于 λ_{peak} 正比于 \sqrt{n} ,折射率增大导致 λ_{peak} 红移。图 6(b)为折射率与峰值移动距离的关系。从图中可以看出,在上述最优条件下,该结构的灵敏度为 $279\text{ nm}/\text{RIU}$ 。与文献[14]相比,该结构有更好的灵敏度,这个结果可以说明复合圆弧孔亚波长阵列结构在高性能 SPP 传感器的设计中具有重要作用。

4 结 论

采用 FDTD 法从理论上系统探讨了 R 、 r 、 d 、 P 等主要几何参数对金属圆弧孔阵列 EOT 现象的影

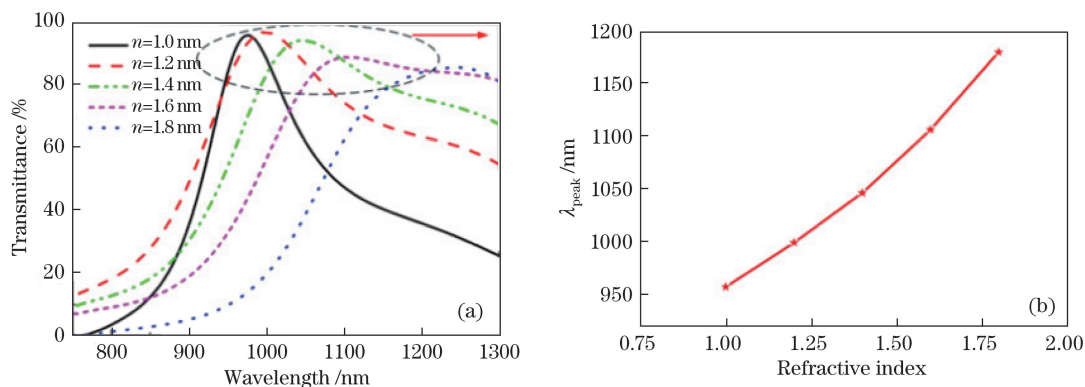


图 6 (a)当 $R=95$ nm, $r=70$ nm, $d=100$ nm, $P=425$ nm 时,不同折射率下复合圆弧孔阵列结构透射率与波长的关系;
(b)折射率与 λ_{peak} 的关系

Fig. 6 Transmittance as a function of wavelength for compound circular arc hole array at different refractive indices when $R=95$ nm, $r=70$ nm, $d=100$ nm, and $P=425$ nm; (b) relationship between λ_{peak} and refractive index

响,并研究了基于该现象的折射率传感特性。主要研究结果如下:1)与单一的大小圆孔阵列结构相比,该结构展现出了更好的 EOT 现象,其 T_{peak} 可达到 92%;该结构比单一的大圆孔阵列和对称小圆孔阵列的 ΔT_{peak} 分别提高了 28% 和 51%。这是由于该结构形成的 F-P 腔通过加强 SPP 的耦合作用来增强 EOT 现象;2)通过改变 R 、 r 、 d 、 P 可以调节 T_{peak} 的大小和 λ_{peak} 的位置,随着 r 、 d 增大, T_{peak} 先增大后减小, λ_{peak} 有规律地红移;随着 P 增大, T_{peak} 逐渐减小, λ_{peak} 有规律地红移;随着 R 增大, T_{peak} 先增大后减小, λ_{peak} 有规律地蓝移;3)当 $R=95$ nm、 $r=70$ nm、 $d=100$ nm、 $P=425$ nm 时,该结构具有较好的 EOT 现象,其最大的 T_{peak} 为 99%,此时的折射率灵敏度为 279 nm/RIU。这些研究结果为设计下一代高性能等离子体折射率传感器提供了理论参考。

参 考 文 献

- [1] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, *et al.* Extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, 391(6668): 667-669.
- [2] Whitney A V, Elam J W, Stair P C, *et al.* Toward a thermally robust operando surface-enhanced Raman spectroscopy substrate[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2007, 111(45): 16827-16832.
- [3] Liu X, Tyler T, Starr T, *et al.* Taming the blackbody with infrared metamaterials as selective thermal emitters[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(4): 045901.
- [4] Lu L, Yang Y H, Li H Y. Study of polarization-maintaining photonic crystal fibers with zero birefringent temperature sensitive coefficient[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1006006.
- [5] 陆林, 杨远洪, 李红颖. 零双折射温度敏感系数保偏光子晶体光纤研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1006006.
- [5] Hao F, Nordlander P, Sonnefraud Y, *et al.* Tunability of subradiant dipolar and Fano-type plasmon resonances in metallic ring/disk cavities: Implications for nanoscale optical sensing[J]. *ACS Nano*, 2009, 3(3): 643-652.
- [6] Parsons J, Hendry E, Burrows C P, *et al.* Localized surface-plasmon resonances in periodic nondiffracting metallic nanoparticle and nanohole arrays[J]. *Physical Review B*, 2009, 79(7): 073412.
- [7] Yang H Y, Xiao G L. Extraordinary transmission properties of gold aperture array-dielectric and gold-dielectric aperture array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 32(11): 1130002.
- [7] 杨宏艳, 肖功利. 金孔阵列-电介质与金-电介质孔阵列的强透射特性[J]. *光学学报*, 2013, 32(11): 1130002.
- [8] Homola J. Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species[J]. *American Chemical Society*, 2008, 108: 462-493.
- [9] Haynes C L, van Dugne R P. Nanosphere lithography: A versatile nanofabrication tool for studies of size-dependent nanoparticle optics[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2001, 105(24): 5599-5611.
- [10] Sandblad P, Arnell R, Samuelsson J, *et al.* Approach for reliable evaluation of drug proteins interactions using surface plasma resonance technology[J]. *Analytical Chemistry*, 2009, 81(9): 3551-3559.
- [11] Lin Y, Zou Y, Lindquist R G. A reflection-based localized surface plasmon resonance fiber-optic probe for biochemical sensing[J]. *Biomedical Optics Express*, 2011, 2(3): 478-484.
- [12] Jia P, Jiang H, Sabarinathan J, *et al.* Plasmonic

- nanohole array sensors fabricated by template transfer with improved optical performance[J]. *Nanotechnology*, 2013, 24(6): 195501.
- [13] Lin Y, Yang Z, Mo Y, *et al.* E-beam patterned gold nanodot arrays on optical fiber tips for localized surface plasmon resonance biochemical sensing[J]. *Sensors*, 2010, 10(10): 9397-9406.
- [14] Li S, Zhong J. Simultaneous amplitude-contrast and phase-contrast surface plasmon resonance imaging by use of digital holography[J]. *Biomedical Optics Express*, 2012, 3(12): 3190-3202.
- [15] Najiminaini M, Vasefi F, Kaminska B, *et al.* Nanohole array structure with improved surface plasmon energy matching characteristics[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(4): 043105.
- [16] Ruan Z, Qiu M. Enhanced transmission through periodic arrays of subwavelength holes: The role of localized waveguide resonances[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(23): 233901.
- [17] Wang C, Gu J, Han J, *et al.* Role of mode coupling on transmission properties of subwavelength composite hole-patch structures[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(25): 251102.
- [18] Wei L D, Wang H Q, Yang H Y, *et al.* Optic transmission characteristics of embedded metal strip based on metal-insulator-metal waveguide[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(9): 092401.
韦力丹, 王宏庆, 杨宏艳, 等. 内嵌金属块的金属-绝缘体-金属波导光透射特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(9): 092401.
- [19] Degriion A, Ebbesen T W. The role of localized surface plasmon modes in the enhanced transmission of periodic subwavelength apertures[J]. *Journal of Optics A*, 2005, 7(2): S90-S96.