



DOI: 10.12086/oe.2018.180207

## 同轴纳米柱对亚波长金属牛眼结构 EOT 的调控

杨泽华<sup>1</sup>, 宋 阳<sup>2</sup>, 陈 爽<sup>1</sup>, 高亚臣<sup>1\*</sup><sup>1</sup>黑龙江大学电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;<sup>2</sup>辽宁省朝阳师范高等专科学校信息工程系, 辽宁 朝阳 122000

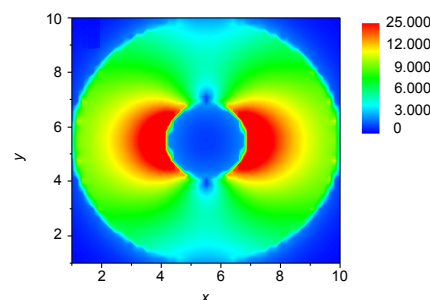
**摘要:** 牛眼结构是一种典型的纳米光学结构。本文设计了一种带有同轴纳米柱的牛眼结构, 利用时域有限差分法(FDTD)研究了该结构的增强透射效应。研究发现, 柱的半径和高度对透射特性具有显著的影响, 恰当选择柱的半径和高度会得到最大的透射强度。另外, 牛眼结构对环境折射率有较高的灵敏度。理论分析表明, 该种结构的透射增强效应是由局域表面等离子激元与表面极化等离子激元相互作用产生。这为纳米光学元件的研发与应用提供一个新思路。

**关键词:** 表面等离子激元; 光异常透射; 牛眼结构; 时域有限差分法

中图分类号: O734

文献标志码: A

引用格式: 杨泽华, 宋阳, 陈爽, 等. 同轴纳米柱对亚波长金属牛眼结构 EOT 的调控[J]. 光电工程, 2018, 45(11): 180207



## Control of EOT of subwavelength metal bullseye structures by coaxial nano-columns

Yang Zehua<sup>1</sup>, Song Yang<sup>2</sup>, Chen Shuang<sup>1</sup>, Gao Yachen<sup>1\*</sup><sup>1</sup>College of Electronic Engineering, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China;<sup>2</sup>Department of Information Engineering, Chaoyang Teachers' College, Chaoyang, Liaoning 122000, China

**Abstract:** The bullseye structure is a classic nano-optical structure. This article designs a new bullseye structure with coaxial nano-pillars. We used the time-domain finite difference method (FDTD) to study the EOT of the structure. Studies show that the radius and height of the column have a significant impact on the transmission characteristics. The proper choice of the radius and height of the column will support the maximum transmission intensity. In addition, the bullseye structure has a higher sensitivity to the environmental refractive index. Theoretical analyses show that the enhancement transmission effect of the structure is caused by the interaction between the local surface plasmon and the surface plasmon polarization. This provides a new idea for the development and application of nano-photonics components.

**Keywords:** surface plasmon; EOT; bullseye structure; finite difference time domain method

**Citation:** Yang Z H, Song Y, Chen S, et al. Control of EOT of subwavelength metal bullseye structures by coaxial nano-columns[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(11): 180207

收稿日期: 2018-04-20; 收到修改稿日期: 2018-06-08

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目(F2018027)

作者简介: 杨泽华(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事纳米光子学的研究。E-mail: 20151045@s.hjlu.edu.cn

通信作者: 高亚臣(1969-), 男, 博士, 教授, 主要从事非线性光学材料与纳米光子学的研究。E-mail: gaoyachen@hjlu.edu.cn

## 1 引言

1998年, Ebbesen 团队首次报道了亚波长金属孔阵列中的光异常增强透射现象(extraordinary optical transmission, EOT)<sup>[1]</sup>。从此, 人们对 EOT 的产生机理进行了广泛研究, 提出了几种理论模型。Ebbesen、Ghaemi 等人提出了表面等离子激元激发与 Wood 异常效应<sup>[2-5]</sup>, 认为当亚波长孔隙的散射与干涉效应产生的一阶衍射波满足表面等离子激元的相位匹配条件时, 产生共振激发, 导致异常透射效应。2004年 Koerkamp 等人研究了矩形孔径的长宽比对透射峰值与中心波长的影响, 证实了局域波导共振在透射增强效应中的作用, 给出了一阶透射公式, 认为局域波导共振与等离子激元共振耦合导致了 EOT<sup>[6-8]</sup>; 类似模型还有 Lezec 与 Thio 于 2004 年提出的复合衍射消逝波模型<sup>[9-10]</sup>。

目前, 人们主要研究了方形孔<sup>[6,11]</sup>、圆孔<sup>[1]</sup>、三角孔<sup>[12-13]</sup>、楔形狭缝<sup>[14-15]</sup>、凹槽阵列<sup>[16-18]</sup>、多层与复合结构<sup>[19-20]</sup>等结构的 EOT。牛眼结构属于圆孔结构, 是 Thio 在 2002 年提出的一种周期性表面波纹包围的单孔结构, 由于具有循环对称性, 在随机偏振光下能够使惠更斯波更好地匹配等离子激元模式, 因而较方形孔结构、凹槽阵列结构有着更高的透射系数<sup>[21]</sup>。2004年, Lezec 研究发现, 通过在牛眼结构的出射窗构造图形化界面可以调控透射光的发散角, 最大可达 $\pm 5^\circ$ <sup>[22]</sup>。此外, 牛眼结构已经被应用于太赫兹共振<sup>[23-24]</sup>、太赫兹天线<sup>[25]</sup>、选择性透镜<sup>[26]</sup>等领域。

本文进一步改进了牛眼结构, 在孔径中加入了一个同轴纳米柱。本文采用时域有限差分法(time-domain finite difference method, FDTD)对新结构的透射特性进行了计算。研究了柱的半径和高度对透射特性的影响, 分析了此结构中 EOT 的物理机制, 并对不同介质环境中的纳米柱牛眼结构的透射率进行了计算。

## 2 结构与计算方法

图 1 为所设计带有同轴纳米柱的牛眼结构, 图 1(a) 为 X-Z 面的截面图, 图 1(b) 为 X-Y 面的截面图。整个结构以 SiO<sub>2</sub> 为基底, Ag 薄膜厚度为 300 nm, 中心孔径为 150 nm, 在孔径周围刻蚀周期  $P=600$  nm 的同轴凹槽, 深度为 60 nm, 宽度为 300 nm。

内径满足:  $R_1 = kP - 150(k=1,2,3,\dots)$  nm,

外径满足:  $R_2 = kP + 150(k=1,2,3,\dots)$  nm。

FDTD Solution 是以时域有限差分法为基础, 通过求解麦克斯韦旋度方程来计算电磁波特性的仿真软

件。本文应用 FDTD Solution 研究了该结构的透射特性。光源采用高斯脉冲激励的宽带平面光源, 波长范围为 200 nm~1000 nm, 偏振方向平行于 X 轴。Ag 的介电常数采用 Palik 手册中的数据<sup>[27]</sup>。

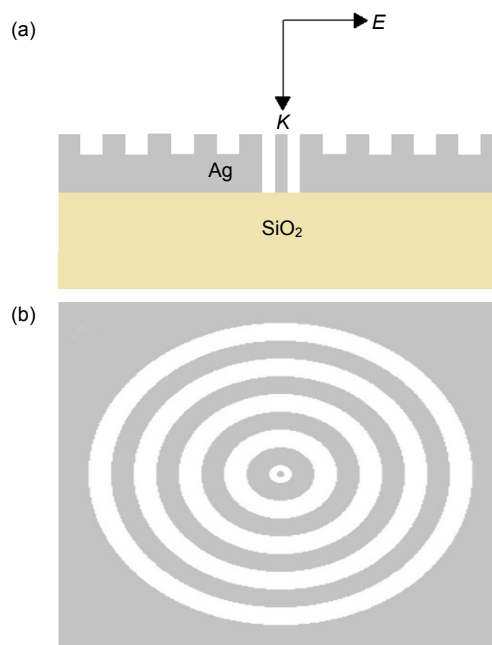


图 1 纳米柱牛眼结构的模型。(a) X-Z 面截面图; (b) X-Y 面截面图  
Fig. 1 Model of the bullseye structure with nano-column. (a) X-Z cross section; (b) X-Y cross section

## 3 仿真结果与讨论

### 3.1 纳米柱的半径对透射特性的影响

纳米柱半径分别为 0 nm, 45 nm, 75 nm, 90 nm, 100 nm 时, 计算得到的牛眼结构在 200 nm~1000 nm 区间的透射谱如图 2 所示。

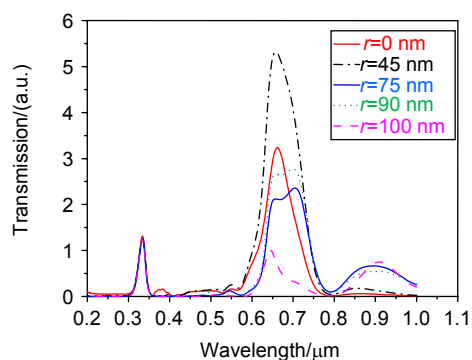


图 2 纳米柱半径不同的牛眼结构的透射率  
Fig. 2 Transmittance of the bullseye structures with different radii nano-columns

由图 2 可以看到，所有纳米柱牛眼结构都在  $\lambda = 332 \text{ nm}$  处出现一个透射峰，其峰值不受纳米柱半径变化的影响。同时，透射谱在  $600 \text{ nm} \sim 700 \text{ nm}$  间都出现了强的透射峰。其中，不含纳米柱的牛眼结构 ( $r = 0 \text{ nm}$ ) 在  $\lambda = 660 \text{ nm}$  处出现透射峰，这与 Lezec 所报道的实验结果一致<sup>[16]</sup>。当  $r = 45 \text{ nm}$  时，透射峰出现在  $\lambda = 653 \text{ nm}$ ，相对  $r = 0 \text{ nm}$  时蓝移了  $7 \text{ nm}$ ；当  $r = 75 \text{ nm}$ ， $90 \text{ nm}$  时，透射谱出现了两个透射峰，分别为  $\lambda_1 = 653 \text{ nm}$  和  $\lambda_2 = 714 \text{ nm}$ ；但当  $r = 100 \text{ nm}$  时，在  $\lambda = 643 \text{ nm}$  处出现 EOT。另外，纳米柱半径  $r = 75 \text{ nm}$ ，

$90 \text{ nm}$ ， $100 \text{ nm}$  的牛眼结构在  $\lambda = 900 \text{ nm}$  处出现了相对较弱的宽透射峰。总体看来，纳米柱对透射峰的位置影响不大，而对峰值影响较大。相对无填充结构，当  $r = 45 \text{ nm}$  时，透射率提高了约  $70\%$ ；当  $r = 100 \text{ nm}$  时，透射率下降了约  $60\%$ 。由此看出，通过改变填充纳米柱的半径可以实现对主透射峰强度的调控。

为了研究纳米柱半径影响牛眼结构的主透射峰的机理，我们对纳米柱半径不同的牛眼结构在相应的共振波长下的电场分布进行了仿真。其中  $r = 0 \text{ nm}$ ， $45 \text{ nm}$ ， $100 \text{ nm}$  时的电场分布如图 3 所示。由图 3(a)、3(b)

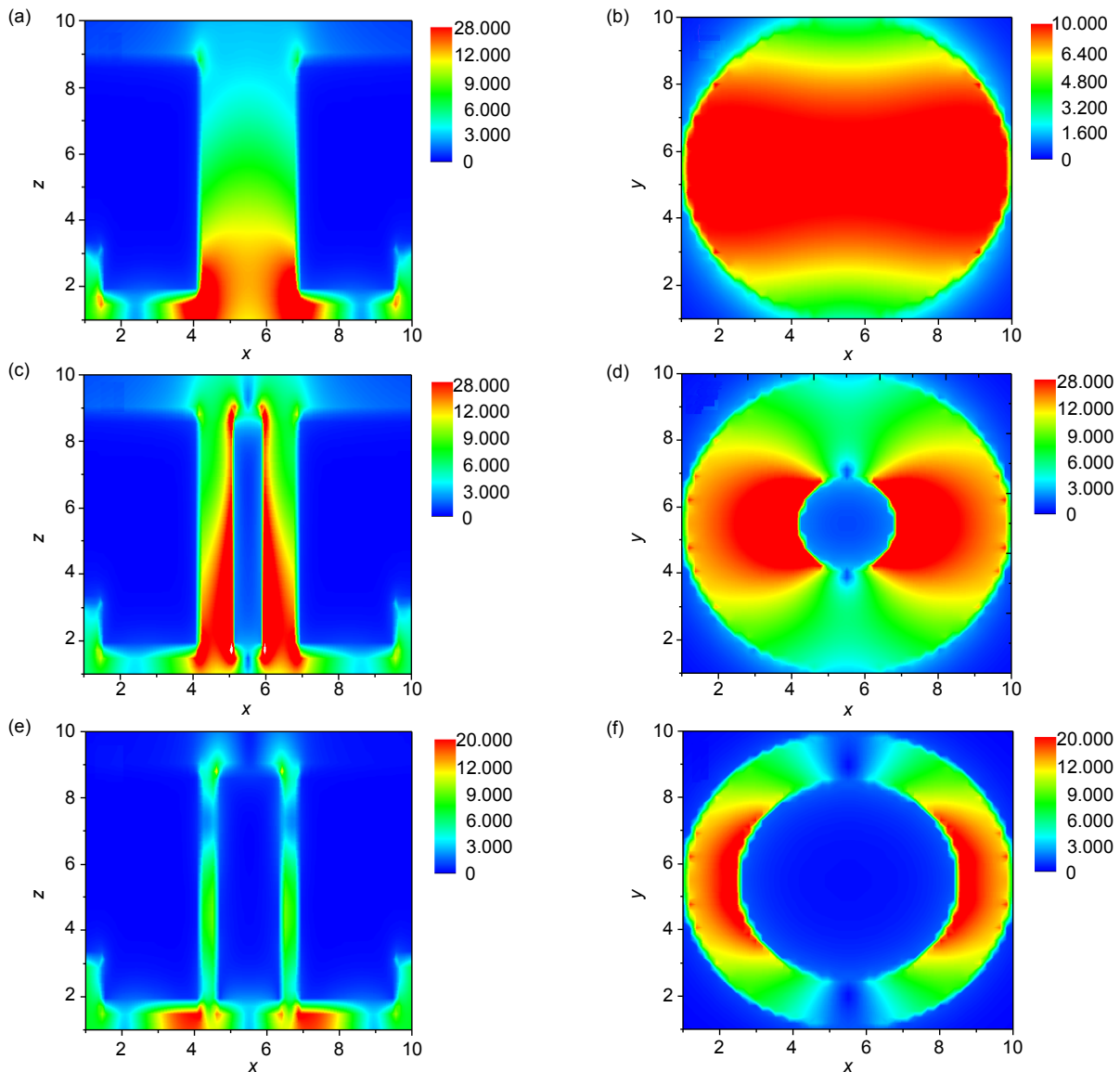


图 3 纳米柱半径不同时，牛眼结构在共振波长下的电场分布。(a) XOZ 电场 ( $\lambda=660 \text{ nm}$ ,  $r=0 \text{ nm}$ )；(b) XOY 电场 ( $\lambda=660 \text{ nm}$ ,  $r=0 \text{ nm}$ )；(c) XOZ 电场 ( $\lambda=653 \text{ nm}$ ,  $r=45 \text{ nm}$ )；(d) XOY 电场 ( $\lambda=653 \text{ nm}$ ,  $r=45 \text{ nm}$ )；(e) XOZ 电场 ( $\lambda=647 \text{ nm}$ ,  $r=100 \text{ nm}$ )；(f) XOY 电场 ( $\lambda=647 \text{ nm}$ ,  $r=100 \text{ nm}$ )

Fig. 3 Electric field distributions of the bullseye structures with different-radii nano-columns at the resonance wavelengths. (a) XOZ electric field ( $\lambda=660 \text{ nm}$ ,  $r=0 \text{ nm}$ )；(b) XOY electric field ( $\lambda=660 \text{ nm}$ ,  $r=0 \text{ nm}$ )；(c) XOZ electric field ( $\lambda=653 \text{ nm}$ ,  $r=45 \text{ nm}$ )；(d) XOY electric field ( $\lambda=653 \text{ nm}$ ,  $r=45 \text{ nm}$ )；(e) XOZ electric field ( $\lambda=647 \text{ nm}$ ,  $r=100 \text{ nm}$ )；(f) XOY electric field ( $\lambda=647 \text{ nm}$ ,  $r=100 \text{ nm}$ )

可以看到, 表面极化等离子激元(surface plasmon polarization, SPP)与由孔径、凹槽产生的局域表面等离子激元(local surface plasmon, LSP)在入射孔边沿处发生了耦合, 在  $\lambda = 660 \text{ nm}$  时产生共振, 导致了透射增强; 在图 3(c)中, 可观察到纳米柱半径  $r = 45 \text{ nm}$  的牛眼结构的共振位置位于纳米柱的前端两侧; 图 3(d)显示了纳米柱激发的 LSP 与原复合场耦合并产生共振, 导致了主透射峰的蓝移和峰值变化。由图 3(e)、3(f)可以看到, 当  $r = 100 \text{ nm}$  时, 由于纳米柱的半径较大, 其产生的 LSP 仅在入射口处与原复合场发生耦合, 导致了孔径内的电场强度较低, 透射峰值小。

在图 2 中, 当  $r = 75 \text{ nm}$ ,  $90 \text{ nm}$  时, 透射谱出现了两个强透射峰。为了研究峰分裂的物理机理, 我们对  $r = 75 \text{ nm}$ ,  $90 \text{ nm}$  时的电场分布进行了仿真, 结果如图 4 所示。图 4(a)、4(b)为纳米柱半径  $r = 75 \text{ nm}$  的牛眼结构在  $\lambda_1 = 654 \text{ nm}$  和  $\lambda_2 = 714 \text{ nm}$  时的静态电场分布, 可以看到在两种波长的光的激励下, 该牛眼结

构的共振位置都在纳米柱的前端两侧, 其中  $\lambda_1 = 654 \text{ nm}$  时的电场强度略低于  $\lambda_2 = 714 \text{ nm}$  时的电场强度。另外, 当  $\lambda_1 = 654 \text{ nm}$  时, 凹槽内的电场集中在脊与谷的边沿, 电场强度较高; 而  $\lambda_2 = 714 \text{ nm}$  时, 电场在凹槽处的分布相对均匀, 电场强度较低。这两种分布属于 Thio 提出的牛眼结构的两种驻波模式<sup>[21]</sup>。图 5 为在两种模式下的电场分布的示意图。当电场分布为模式 1 时, 凹槽内电荷极化只发生在脊和谷的面内。在入射光的激励下, 纳米柱发生极化, 并与凹槽内的电场产生耦合。当电场分布为模式 2 时, 凹槽的极化发生在凹槽的脊和谷之间。在入射光的激励下, 由于纳米柱两侧的凹槽呈现相同极性, 纳米柱极化出强度不同的两极, 从而产生了不均匀的电场分布。

为了全面地研究纳米柱的半径对透射峰值的影响, 我们对纳米柱半径在  $0 \sim 105 \text{ nm}$  区间的牛眼结构的主透射峰值进行了计算, 并用无纳米柱的牛眼结构的透射峰值对结果进行了归一化, 拟合得到透射峰值

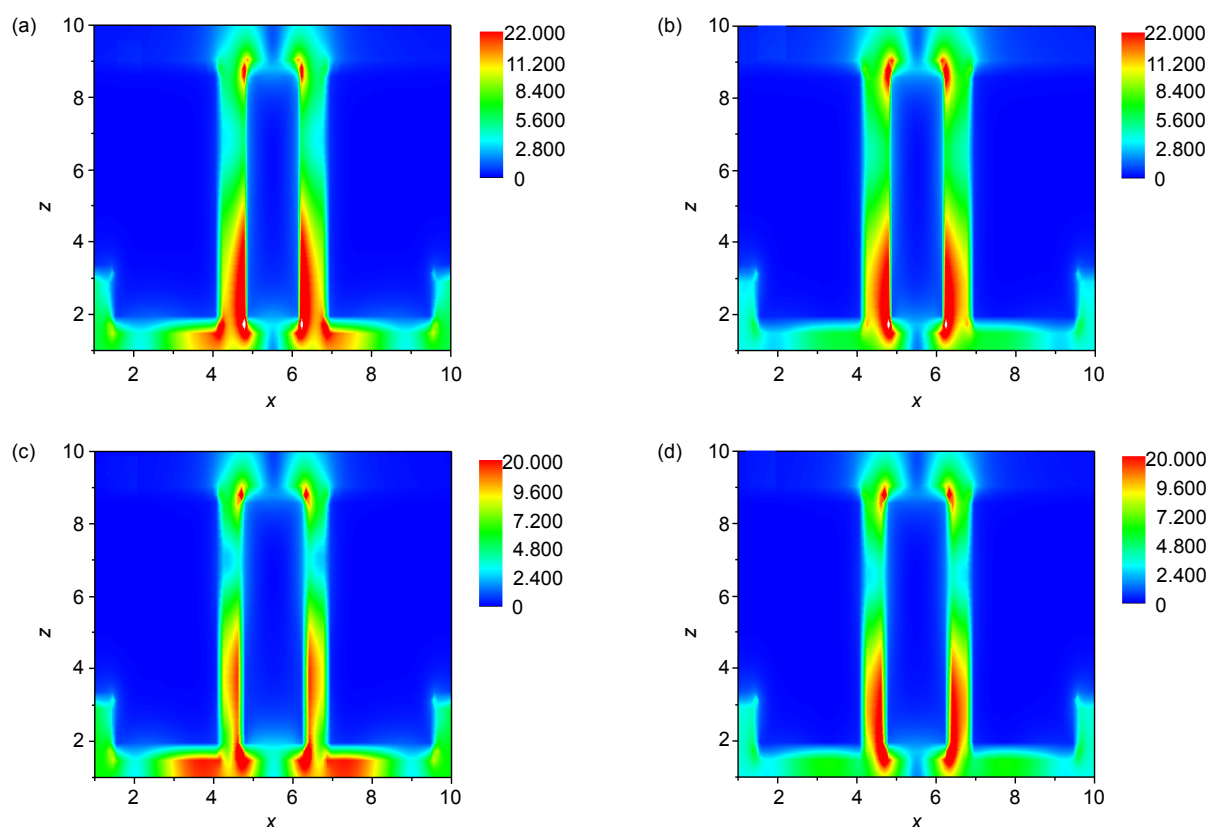


图 4 纳米柱的半径不同时, 牛眼结构在共振波长下的电场分布。(a) XOZ 电场( $\lambda=654 \text{ nm}$ ,  $r=75 \text{ nm}$ ); (b) XOZ 电场( $\lambda=714 \text{ nm}$ ,  $r=75 \text{ nm}$ ); (c) XOZ 电场( $\lambda=654 \text{ nm}$ ,  $r=90 \text{ nm}$ ); (d) XOZ 电场( $\lambda=714 \text{ nm}$ ,  $r=90 \text{ nm}$ )

Fig. 4 Electric field distributions of the bullseye structures with different-radii nano-columns at the resonant wavelengths. (a) XOZ electric field( $\lambda=654 \text{ nm}$ ,  $r=75 \text{ nm}$ ); (b) XOZ electric field( $\lambda=714 \text{ nm}$ ,  $r=75 \text{ nm}$ ); (c) XOZ electric field( $\lambda=654 \text{ nm}$ ,  $r=90 \text{ nm}$ ); (d) XOZ electric field( $\lambda=714 \text{ nm}$ ,  $r=90 \text{ nm}$ )

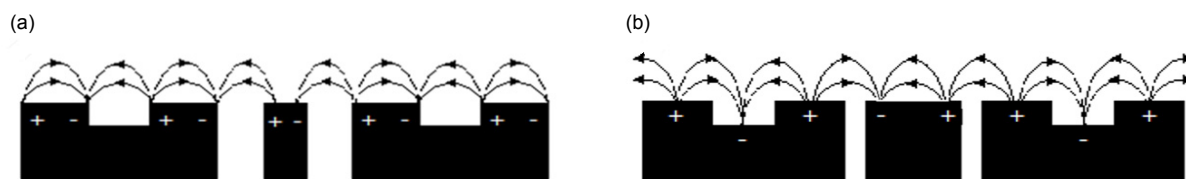


图 5  $r=75\text{ nm}$  时电场分布的两种模式。(a) 模式 1; (b) 模式 2

Fig. 5 Two modes of electric field distribution of the bullseye structure with 75 nm nano-column. (a) Mode 1; (b) Mode 2

关于纳米柱半径的函数图(图 6)。由图可看到,透射强度随纳米柱半径呈现非线性变化。总体来看,当纳米柱半径  $r \leq r_0/2 = 75\text{ nm}$  时,透射强度相比原结构的 EOT 具有显著的增强效应,其中在  $r = 46\text{ nm}$  时达到峰值 1.75,即透射强度增强 75%。当半径大于  $r_0/2$  时,透射电场强度较原结构有减弱效应,其中在  $r = 96\text{ nm}$  时达到极小值 0.18,即透射强度衰减 82%。因此,调控纳米柱半径可以有效地控制牛眼结构的透射率。

### 3.2 纳米柱高度对于透射特性的影响

为了研究同轴纳米柱的高度对透射光强的影响,我们计算了半径  $r = 45\text{ nm}$ ,高度  $h$  分别为 30 nm, 20 nm, 15 nm, 10 nm, 5 nm 的纳米柱牛眼结构的透射率,结果如图 7 所示。不同高度的纳米柱牛眼结构都在波长 600 nm~700 nm 间出现主透射峰,各峰值波长相对  $h = 30\text{ nm}$  时的  $\lambda = 653\text{ nm}$  发生较小的红移,最大为 7 nm。另外,所有结构在  $\lambda = 332\text{ nm}$  处存在一个透射峰,不随纳米柱高度发生频移或峰值变化。总体来看,纳米柱的高度对峰的位置影响不大,但对峰值

有明显影响。其中当  $h = 20\text{ nm}$  时,透射率相对  $h = 30\text{ nm}$  时增强 15%;当  $h = 5\text{ nm}$  时,透射率相对  $h = 30\text{ nm}$  时减小约 30%,这表现了纳米柱的高度对牛眼结构的透射率有一定调控能力,但相对纳米柱半径较弱。

为了研究纳米柱的高度对 EOT 影响的机理,我们对纳米柱高度不同的牛眼结构在共振波长下的 XOY 与 XOZ 电场分布进行了仿真,结果如图 8 所示。图 8(a)、8(b)可以看到:当纳米柱的高度较高时,结构的共振位置位于入射端的纳米柱两侧。由于纳米柱高度不同,共振位置发生改变,导致了透射峰出现频移和峰值变化。图 8(c)可以看到,当纳米柱的高度较低时,结构的共振位置位于入射孔的边沿,这与无填充时的牛眼结构一致。由于纳米柱自身体积减小和 LSP 作用减弱,透射峰的波长和峰值接近  $r = 0\text{ nm}$  时的牛眼结构的数值。图 8(d)为纳米柱顶端与入射面之间空腔的电场分布。由于多电场的耦合,孔径内形成高阶横模,导致了透射强度随纳米柱的高度呈现非线性变化。

为了全面地研究纳米柱高度对透射峰值的影响,我们对半径  $r = 45\text{ nm}$ ,高度区间在 0~30 nm 的纳米

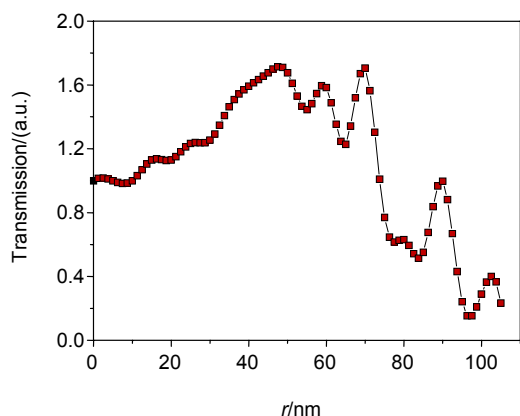


图 6 纳米柱不同半径时,牛眼结构的透射电场峰值  
Fig. 6 Transmitted electric field peaks of bullseye structures with different-radii nano-columns

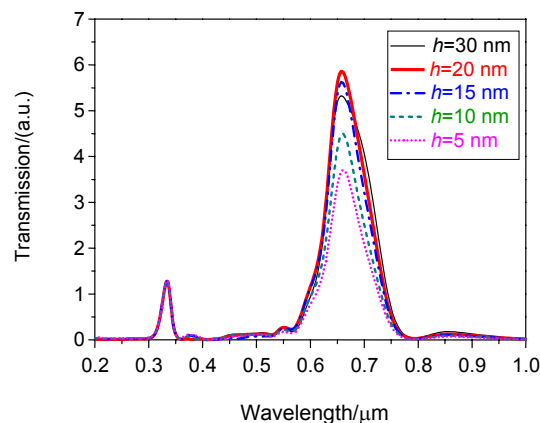


图 7 填充不同高度纳米柱时牛眼结构的透射率  
Fig. 7 Transmissions of bullseye structures with different-height nano-columns

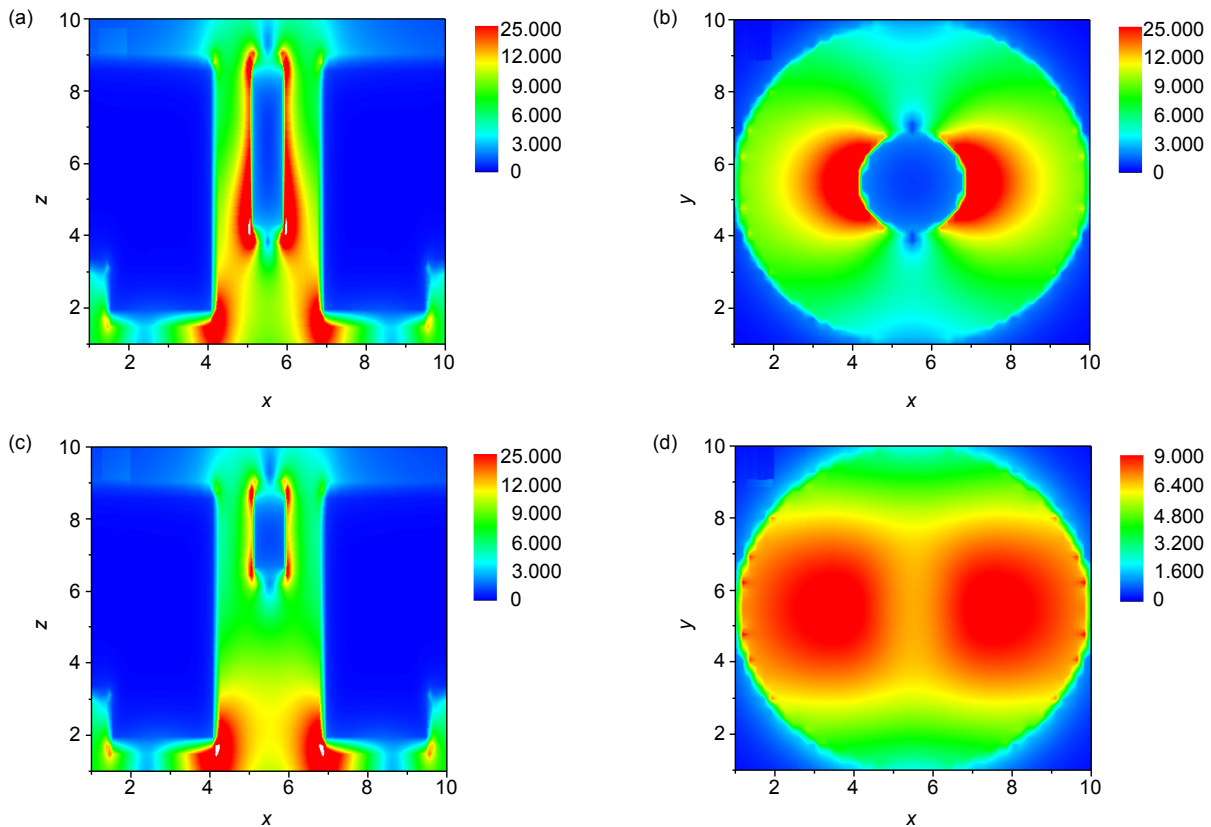


图 8 填充不同高度的纳米柱时，牛眼结构在共振波长下的电场分布。(a) XOZ 静态电场( $\lambda=657$  nm,  $h=20$  nm); (b) XOY 静态电场( $\lambda=657$  nm,  $h=20$  nm); (c) XOZ 静态电场( $\lambda=659$  nm,  $h=10$  nm); (d) XOY 静态电场( $\lambda=659$  nm,  $h=10$  nm)

Fig. 8 Electric field distributions of the bullseye structures with different-heights nano-columns at the resonance wavelengths. (a) XOZ electric field ( $\lambda=657$  nm,  $h=20$  nm); (b) XOY electric field ( $\lambda=657$  nm,  $h=20$  nm); (c) XOZ electric field ( $\lambda=659$  nm,  $h=10$  nm); (d) XOY electric field ( $\lambda=659$  nm,  $h=10$  nm)

柱牛眼结构的主透射峰值进行了计算，结果利用插值拟合得到图 9。总体来看，纳米柱的高度在一个较大范围内，透射强度相比不带纳米柱的牛眼结构的 EOT 有增强效应；适度降低纳米柱的高度，相比  $h=30$  nm 时可以进一步提高透射率；其中在  $h=22$  nm 时，透射强度相对  $h=30$  nm 时增强了 11%，相对无填充时的牛眼结构增强 86%；在较低高度时，透射率相对降低，其中在  $h=2$  nm 时，透射强度相对  $h=30$  nm 时下降 56%，相对未填充时牛眼结构下降 6%；即对于纳米柱高度的调控可以进一步控制结构的透射特性。

### 3.3 环境折射率对透射特性的影响

以往研究表明，结构的透射率与环境折射率密切相关<sup>[28-29]</sup>。而当纳米柱半径  $r=45$  nm 时，牛眼结构的透射率接近最强。因此，我们研究了环境折射率对纳米柱半径  $r=45$  nm 的牛眼结构透射特性的影响。具体

仿真计算了该结构在水、乙醇、乙二醇、丙三醇中的透射率。如图 10(a)所示，相对在空气中的主透射峰  $\lambda=653$  nm，其他介质中的主透射峰发生了明显频移，其中在水中  $\lambda_1=874$  nm，在乙醇中  $\lambda_2=893$  nm，在乙二醇中  $\lambda_3=934$  nm，在丙三醇中  $\lambda_4=964$  nm。图 10(b) 是主透射峰波长与折射率的函数图，可以看到峰值波长随折射率近似线性变化，其斜率为 653.4，表明此结构对环境折射率的灵敏度为 653.4 nm/RIU。相比于 Karabchevsky 提出的 EOT 金属光栅结构<sup>[28]</sup>(灵敏度 439 nm/RIU~445 nm/RIU)和 Min Hyung Lee 提出的一维纳米缝阵列结构<sup>[29]</sup>(灵敏度 306 nm/RIU~563 nm/RIU)，改进后的牛眼结构对环境折射率更加灵敏。总体看来，该结构应用于折射率传感器具有微型化、高灵敏度、线性响应等优势；目前不足之处在于刻蚀成本较高。因此同轴纳米柱牛眼结构将会在制作工艺成熟后，拥有较好的前景。

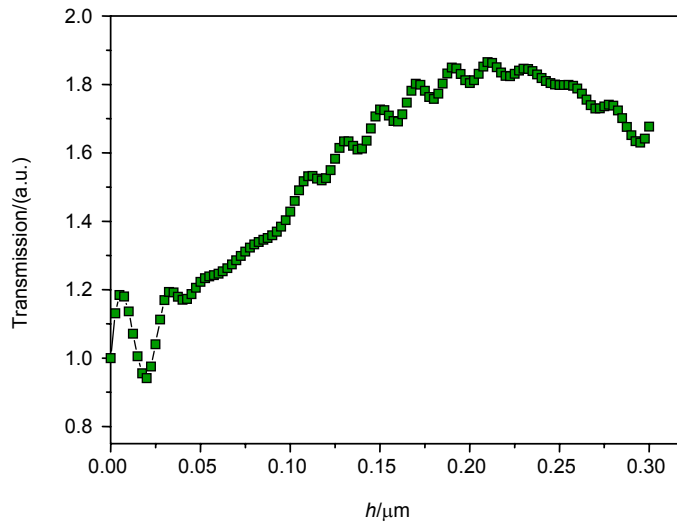


图9 透射电场强度在不同高度纳米柱时的透射曲线

Fig. 9 Transmitted electric field peaks of bullseye structures with different-heights nano-columns

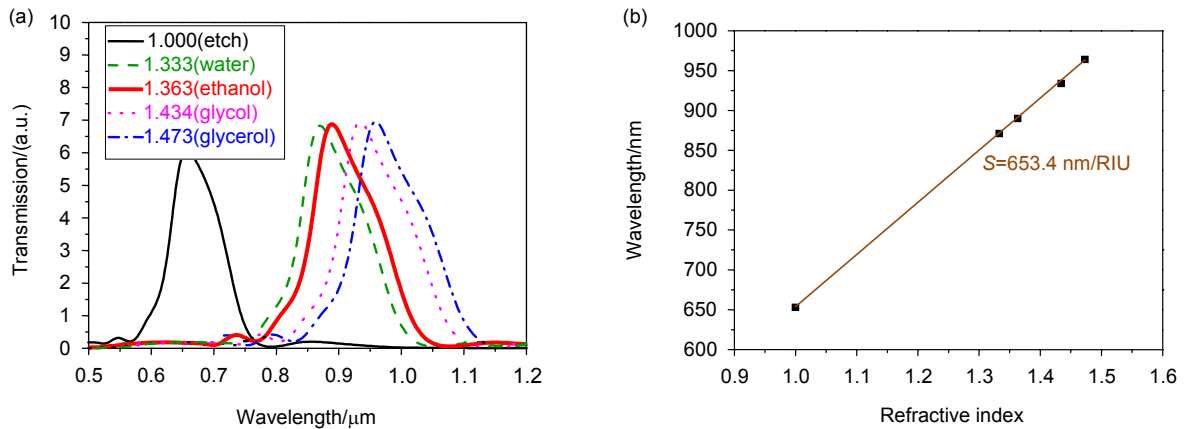


图10 (a) 环境折射率不同时的结构透射率; (b) 主透射峰波长与折射率的函数图

Fig. 10 (a) Transmissions of the structure surrounded by different refractive index materials; (b) The graph of the main transmission peak's wavelength vs refractive index

## 4 结论

采用时域有限差分法对带有纳米柱的牛眼结构的透射特性进行了仿真,研究了纳米柱的半径和高度对透射的影响。结果表明,改变柱的半径和高度能够显著改变主透射峰的峰值与共振波长。当纳米柱半径  $r = 46 \text{ nm}$ , 高度  $h = 22 \text{ nm}$  时获得最大的透射强度,相对无填充时的牛眼结构,主透射峰值增大了约 90%。另外,该结构的主透射峰波长随环境折射率近似线性变化,折射率灵敏度能够达到  $653.4 \text{ nm/RIU}$ 。理论分析表明,纳米柱影响牛眼结构透射特性的物理机理在

于:在入射光的激励下,纳米柱极化出的 LSP 与结构中存在的 SPP 和 LSP 发生耦合,导致了共振位置和强度的变化,从而产生了频移与峰值改变。通过改变纳米柱的几何尺寸可以实现对牛眼结构透射光强的调控。另外,由于该结构对环境折射率有着较高灵敏度,在折射率传感器领域有着潜在应用。

## 参考文献

- [1] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, *et al.* Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, **391**(6668): 667-669.
- [2] Ghaemi H F, Thio T, Grupp D E, *et al.* Surface plasmons en-

- hanced optical transmission through subwavelength holes[J]. *Physical Review B*, 1998, **58**(11): 6779–6782.
- [3] Martín-Moreno L, García-Vidal F J, Lezec H J, *et al.* Theory of extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays[J]. *Physical Review Letters*, 2001, **86**(6): 1114–1147.
- [4] Popov E, Nevière M, Enoch S, *et al.* Theory of light transmission through subwavelength periodic hole arrays[J]. *Physical Review B*, 2000, **62**(23): 16100–16108.
- [5] Barnes W L, Murray W A, Dintinger J, *et al.* Surface plasmon polaritons and their role in the enhanced transmission of light through periodic arrays of subwavelength holes in a metal film[J]. *Physical Review Letters*, 2004, **92**(10): 107401.
- [6] Koerkamp K J K, Enoch S, Segerink F B, *et al.* Strong influence of hole shape on extraordinary transmission through periodic arrays of subwavelength holes[J]. *Physical Review Letters*, 2004, **92**(18): 183901.
- [7] Ruan Z C, Qiu M. Enhanced transmission through periodic arrays of subwavelength holes: the role of localized waveguide resonances[J]. *Physical Review Letters*, 2006, **96**(23): 233901.
- [8] Najiminaini M, Vasefi F, Kaminska B, *et al.* A three-dimensional plasmonic nanostructure with extraordinary optical transmission[J]. *Plasmonics*, 2013, **8**(2): 217–224.
- [9] Lezec H J, Thio T. Diffracted evanescent wave model for enhanced and suppressed optical transmission through subwavelength hole arrays[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(16): 3629–3651.
- [10] Gay G, Alloschery O, de Lesegno B V, *et al.* The optical response of nanostructured surfaces and the composite diffracted evanescent wave model[J]. *Nature Physics*, 2006, **2**(4): 262–267.
- [11] Degiron A, Lezec H J, Barnes W L, *et al.* Effects of hole depth on enhanced light transmission through subwavelength hole arrays[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **81**(23): 4327–4329.
- [12] Wang J, Zhou W, Li E P. Enhancing the light transmission of plasmonic metamaterials through polygonal aperture arrays[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(22): 20349–20354.
- [13] Matteo J A, Hesselink L. Fractal extensions of near-field aperture shapes for enhanced transmission and resolution[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(2): 636–647.
- [14] Qin Y, Cao W, Zhang Z Y. Enhanced optical transmission through metallic slits embedded with rectangular cavities?[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(12): 127302.  
秦艳, 曹威, 张中月. 内嵌矩形腔楔形金属狭缝的增强透射[J]. *物理学报*, 2013, **62**(12): 127302.
- [15] Xiao G L, Zheng L, Wang H Q, *et al.* Broadband enhanced transmission through wedge-shape metallic slits array embedded with mirror symmetric rectangular cavities[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2016, **37**(4): 505–509, 514.  
肖功利, 郑龙, 王宏庆, 等. 内嵌镜像对称矩形腔楔形金属狭缝阵列的宽带增强透射[J]. *半导体光电*, 2016, **37**(4): 505–509, 514.
- [16] Hibbins A P, Sambles J R, Lawrence C R. Gratingless enhanced microwave transmission through a subwavelength aperture in a thick metal plate[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **81**(24): 4661–4663.
- [17] Kim S, Jang M S, Brar V W, *et al.* Electronically tunable extraordinary optical transmission in graphene plasmonic ribbons coupled to subwavelength metallic slit arrays[J]. *Nature Communications*, 2016, **7**: 12323.
- [18] Wei F F, Wang H Y, Zhou Y S. Effects of interplay between metal subwavelength slits on extraordinary optical transmission[J]. *Chinese Physics B*, 2013, **22**(2): 024201.
- [19] Dmitriev V, Paixão F, Kawakatsu M. Enhancement of Faraday and Kerr rotations in three-layer heterostructure with extraordinary optical transmission effect[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(7): 1052–1054.
- [20] Yue H W, Deng J L, Zhu Z Y, *et al.* Extraordinary optic transmission of metallic circle-rectangular compound hole array with nano-slit coupling[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(8): 7–12.  
岳宏卫, 邓进丽, 朱智勇, 等. 纳米狭缝耦合金属圆-矩形复合孔阵列结构增强光透射[J]. *光电工程*, 2016, **43**(8): 7–12.
- [21] Thio T, Pellerin K M, Linke R A, *et al.* Enhanced light transmission through a single subwavelength aperture[J]. *Optics Letters*, 2001, **26**(24): 1972–1974.
- [22] Lezec H J, Degiron A, Devaux E, *et al.* Beaming light from a subwavelength aperture[J]. *Science*, 2002, **297**(5582): 820–822.
- [23] Jimba Y, Takano K, Hangyo M, *et al.* Extraordinary optical transmission through incommensurate metal hole arrays in the terahertz region[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, **30**(9): 2476–2482.
- [24] Pan X, Li M Q, Wang S D, *et al.* Transmission characteristics of multi-frequency terahertz based on split ring resonators[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2017, **34**(3): 333–338.  
潘旭, 李民权, 汪善栋, 等. 基于开口谐振环的多频太赫兹透射特性研究[J]. *量子电子学报*, 2017, **34**(3): 333–338.
- [25] Beaskoetxea U, Beruete M, Zehar M, *et al.* Flat THz leaky wave antennas: analysis and experimental results[C]//*Proceedings of the 2014 8th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics*, Lyngby, Denmark, 2014: 55–57.
- [26] Heggie T J, Naylor D A, Gom B G, *et al.* Enhanced transmission and beam confinement using bullseye plasmonic lenses at THz frequencies[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, **8985**: 89851G.
- [27] Palik E D. *Handbook of Optical Constants of Solids*[K]. London: Academic, 1985: 189.
- [28] Karabchevsky A, Krasnykov O, Abdulhalim I, *et al.* Metal grating on a substrate nanostructure for sensor applications[J]. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 2009, **7**(4): 170–175.
- [29] Lee M H, Gao H W, Odom T W. Refractive index sensing using quasi one-dimensional nanoslit arrays[J]. *Nano Letters*, 2009, **9**(7): 2584–2588.

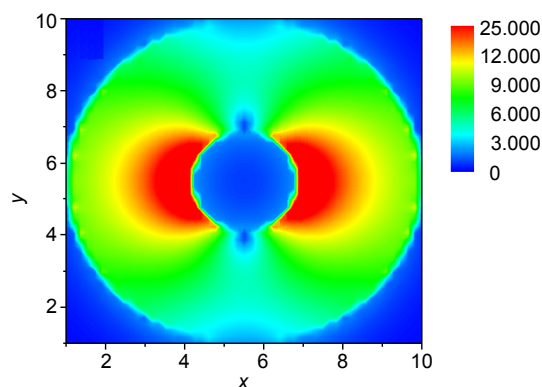


# Control of EOT of subwavelength metal bullseye structures by coaxial nano-columns

Yang Zehua<sup>1</sup>, Song Yang<sup>2</sup>, Chen Shuang<sup>1</sup>, Gao Yachen<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>College of Electronic Engineering, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China;

<sup>2</sup>Department of Information Engineering, Chaoyang Teachers' College, Chaoyang, Liaoning 122000, China



XYOY electric field( $\lambda=657$  nm,  $h=20$  nm)

**Overview:** In 1998, the Ebbesen team reported the phenomenon of extraordinary optical transmission in arrays of subwavelength hole on metal substrate. Since then, people have conducted extensive research on the mechanism of EOT and proposed several theoretical models. Ebbesen, Ghaemi et al. proposed surface plasmon excitation and Wood extraordinary effects. In 2004, Koerkamp et al. studied the influence of the aspect ratio of the rectangular aperture on the transmission peak and the central wavelength. They believed that the coupling between local waveguide resonance and plasmon resonance led to EOT. Similar models also have compound diffraction evanescent wave mode proposed by Lezec and Thio et al. At present, people mainly use square holes, round holes, triangular holes, wedge-shaped slits, and groove arrays to study EOT. The bullseye structure is a kind of round-hole structure. It is a single-hole structure surrounded by periodic surface corrugation proposed by Thio in 2002. Due to its circular symmetry, it can make Huygens waves better matches the plasmon mode under random polarized light, so it has a higher transmission coefficient than the square-hole structure and the groove array structure.

We designed a bullseye structure with coaxial nano-pillars and used the finite-difference time-domain method to simulate the transmission characteristics of proposed new structure. The specific simulation tool we used is FDTD Solution. We studied the influence of the radius and height of the nano-column on the transmission. The results show that changing the radius and height of the column can significantly change the peak and resonance wavelength of the main transmission peak. When the nano-column has a radius of 46 nm and a height of 20 nm, the bullseye structure obtains the maximum transmission intensity, whose the main transmission peak increases by about 90% compared to the bullseye structure without filling. In addition, the main transmission peak wavelength of the structure changes approximately linearly with the ambient refractive index, and the refractive index sensitivity can reach 653.4 nm/RIU. Theoretical analyses show that the physical mechanism of the effect of nano-columns on the transmission characteristics of bullseye structures is that under the excitation of incident light, the LSP polarized by the nano-columns couples with the SPP and LSP existing in the structure, resulting in a change in resonance position and intensity, further leading to frequency shifts and peak changes. By changing the geometry of the nano-pillars, the transmitted light intensity of the bullseye structure can be controlled. In addition, because the structure has a high sensitivity to environmental refractive index, it has potential applications in the field of refractive index sensors.

**Citation:** Yang Z H, Song Y, Chen S, et al. Control of EOT of subwavelength metal bullseye structures by coaxial nano-columns[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(11): 180207

Supported by Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (F2018027)

\* E-mail: gaoyachen@hlju.edu.cn