

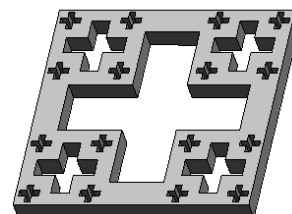


DOI: 10.12086/oe.2020.190422

宽频十字缝隙分形纳米天线 及其异常透射特性

刘觉夫, 陈 娇, 李康康, 刘媛媛, 朱 路*

华东交通大学信息工程学院, 江西 南昌 330013



摘要: 针对传统纳米天线结构存在频段窄、透射率低的问题, 设计了十字缝隙分形纳米天线结构。采用时域有限差分法计算了十字缝隙分形纳米天线结构的异常透射特性, 分析了均匀十字缝隙结构与其之间的透射特性差异, 并讨论了物理参数对十字缝隙分形纳米天线异常透射特性的影响及分形尺寸与非分形尺寸下的纳米天线透射谱变化关系。结果表明, 较于均匀十字缝隙结构, 十字缝隙分形结构实现了光的异常透射及全 2π 透射光束相位调控, 尺寸更小型化, 半波宽(FWHM)更宽, 透射率更高, 最高可达 99.51%; 通过调整物理参数, 透射谱呈现出红移或蓝移的特性, 实现了透射谱的可控性; 同时, 当 $h=50$ nm 时, FWHM 约为 356 nm, 透射率仍高达 95.66%, 普遍高于传统结构; 并且在大入射角度(70°)下, 峰值透射率仍旧大于 74%。总之, 较于其他纳米天线结构, 十字缝隙分形纳米天线具有宽频、可控可调、结构更微型化等特点, 且实现了光的异常透射。

关键词: 纳米天线设计; 十字缝隙分形纳米天线; 表面等离子激元共振; 时域有限差分法; 光学异常透射

中图分类号: O431.1

文献标志码: A

引用格式: 刘觉夫, 陈娇, 李康康, 等. 宽频十字缝隙分形纳米天线及其异常透射特性[J]. 光电工程, 2020, 47(6): 190422

Broadband cross-slots fractal nano-antenna and its extraordinary optical transmission characteristics

Liu Juefu, Chen Jiao, Li Kangkang, Liu Yuanyuan, Zhu Lu*

School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China

Abstract: To overcome the disadvantages of narrow frequency band and low transmittance for traditional nano-antenna, a nano-antenna structure based on cross-slots fractal was designed. The extraordinary optical transmission characteristics of the cross-slots fractal nano-antenna and the differences between the cross-slots fractal nano-antenna and the uniform cross-slots nano-antenna were analyzed by the finite difference time domain method. Meanwhile, the influence of physical parameters on the extraordinary optical transmission characteristics of the cross-slots fractal nano-antenna and the relationship of transmission spectrum of the nano-antenna between the fractal size and the non-fractal size were discussed. The results show that the fractal cross-slots structure is more miniaturized, and realizes extraordinary optical transmission and full 2π phase control of transmission beam, and the transmittance is higher than the uniform cross-slots structure, the full width at half maximum (FWHM) is wider, and the highest transmittance is up to 99.51%. By adjusting the physical parameters, the transmission spectrum exhibits

收稿日期: 2019-07-20; 收到修改稿日期: 2019-12-25

基金项目: 江西省杰出青年人才资助计划(20171BCB23062); 江西省自然科学基金资助项目(20171BAB204022); 江西省教育厅科学技术研究重点项目(GJJ170360)

作者简介: 刘觉夫(1963-), 男, 硕士, 教授, 主要从事纳米天线异常透射及其能量收集的研究。E-mail: juefuliu@163.com

通信作者: 朱路(1976-), 男, 博士, 教授, 主要从事纳米天线能量收集、无线传感器网络的研究。E-mail: luyuanwanwan@163.com

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

red-shift or blue-shift characteristics, achieving controllability of the transmission spectrum. When $h=50$ nm, the full width at half maximum is about 356 nm, and the transmittance is still as high as 95.66%, which is generally higher than traditional structures, and the peak transmittance is still greater than 74% at large incident angles (70 degrees). In short, the cross-slots fractal nano-antenna has the characteristics of wide frequency, controllable and adjustable, and more miniaturized structure compared with other nano-antenna structures, and realizes extraordinary optical transmission.

Keywords: nano-antenna design; cross-slots fractal nano-antenna; surface plasmon resonance; finite-difference time-domain method; extraordinary optical transmission

Citation: Liu J F, Chen J, Li K K, et al. Broadband cross-slots fractal nano-antenna and its extraordinary optical transmission characteristics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(6): 190422

1 引言

纳米天线结构可以突破光学衍射极限,实现光的有效传输。对于特定波长辐射的纳米天线,透射特性是有效光传输的一个重要特性。Ebbesen 等人^[1]在分析金属薄膜亚波长孔阵列的透射特性时,发现了光学异常透射(extraordinary optical transmission, EOT)现象。当光入射到亚波长孔阵列时,在特定波长处,光透射率高出孔洞面积与薄膜总面积比值,相较于经典小孔透射理论^[2],透射率要高出 1~2 个数量级。基于 EOT 现象的纳米天线设计及制备在频率选择表面、生物传感器、滤波器等领域^[3-6]得到了广泛的应用。

文献[7]把光学异常透射归因于光波与金属孔或缝隙结构表面处的自由电子振荡的相互耦合作用。文献[8]和文献[9]又指出,孔径或缝隙边缘处的局域表面等离子体(localized surface plasmons, LSPs)对异常透射也有一定不可忽视的作用,它可提高结构上下表面等离激元极化(surface plasmon polaritons, SPPs)的耦合效率,进而能增强光的透射。目前,基于缝隙或孔径结构的异常透射特性在光学纳米器件上的应用引起了研究者的广泛关注^[10-13]。Zhang 等人^[10]提出了一种复合三角孔洞纳米天线阵列,该结构最高透射率可达 80%,可实现的透射峰的半波宽(full width at half maximum, FWHM)为 230 nm;之后又提出复合矩形纳米孔阵列结构^[11],该结构透射率最高可达 94%,但 FWHM 最宽约为 100 nm;Zhang 等人^[12]提出了一种锥形多层狭缝纳米天线结构,该结构与单层狭缝结构相比,透射率提高了 20%,最高透射率 88%,且其 FWHM 最宽为 100 nm 左右;Zhao 等人^[13]提出了一种非对称纳米金属双缝结构,最高透射率接近于 80%,且 FWHM 最宽约在 300 nm 左右。上述结构虽都能实现光的异常透射,但普遍透射率不高、FWHM 比较窄,

且不易调控。

1975 年,分形^[14](fractal)概念由 Mandelbrot 提出,其被定义为整体与部分以某种形式相似的形。由于分形具有自相似性、分形维数的特点,能够减小天线尺寸以及使天线在宽频段下工作,在天线结构设计中的应用一直是广大研究者的研究热点。现有理论表明,分形等离子体天线有利于实现可控宽带谱响应,且能增强天线的局部电磁场^[15]。1998 年,Puente 等^[16]将 Sierpinski 三角分形结构应用于天线设计,并对多波段天线的性能展开了系统的研究。随着纳米天线的出现,Semih 等人^[17]将 Sierpinski 分形纳米结构应用于近红外电磁场增强的验证。Jagtar 等^[18]改进了 Sierpinski 地毯分形天线,并应用于多频带矢量网络分析仪上制造和测试。总之,分形是通过迭代产生相似几何结构,每一次迭代后的结构都与上一次迭代后的结构相似,其自身所具有的自相似及分形维特性决定了分形纳米天线具有减小天线尺寸和拓宽天线频段的优点,但目前基于分形理论进行的纳米天线透射特性研究还较少。

本文主要针对传统纳米天线频段窄、透射率低的问题,结合分形的特性,提出了一种具有宽频特性的高透射率十字缝隙分形纳米天线结构,并采用时域有限差分法(finite difference time domain, FDTD)详细分析了十字缝隙分形纳米天线结构的异常透射特性、光束相位分布及表面电场分布,比较了均匀十字缝隙结构与其之间的透射特性,研究了结构参数、不同材料及不同入射角对该纳米天线异常透射特性的影响及分形尺寸与非分形尺寸之间的透射特性差异。

2 十字缝隙分形纳米天线设计原理及结构

分形纳米天线是指在几何结构上具有分形特征的纳米级天线,其结构的设计是电磁理论与分形几何学

的巧妙融合。分形自身具有两个重要特性：自相似性和分数维。这两个特性可以使分形纳米天线具有宽频和微型化的特点，决定了分形纳米天线与传统天线的不同。

通常天线的性能都依赖于天线的电尺寸，对于固定的天线尺寸，其主要天线参数将随着工作频率的改变而改变。分形理论中的自相似性使得分形纳米天线具有宽频的特性。当波速维持不变的情况下，频率与波长具有正相关的关系。因此，分形纳米天线具有宽波段特性。分数维是分形几何的另一个性质。分形维数特性具有空间填充性能，可以使纳米天线的表面电流路径增大，使纳米天线的电长度增大，进而实现纳米天线的微型化的目标。利用分形理论设计的分形纳米天线在很大程度上能实现小型化，同时还具有宽频带的特性。

分形几何中用于计算分数维的方法有很多。数学家 Hausdorff 在 1919 年提出了连续空间的概念，并给出了一种非常严密的能够精确测量复杂集维数的办法，称之为 Hausdorff 维数，记作 D_f 。同时对测度性质做了严格的证明。还有一种经典方法是相似维度(D_s)算法，其定义比较直观易懂，且通常认为 $D_f=D_s$ 。因此，采用浅显易懂的 D_s 来描述分形几何的分数维。一般有如下表达式：

$$K = L^{D_s} \quad (1)$$

其中： L 为某一类分形单元结构沿着其每个独立方向皆扩大的倍数， K 用来表示新产生的分形结构个数占原分形结构个数的比例系数。因此， D_s 可以表示如下：

$$D_s = \frac{\ln K}{\ln L} = \log_L K \quad (2)$$

在分形理论的基础上，十字缝隙分形纳米天线的结构模型如图 1(a)所示。该结构以贵金属 Ag 作为天线主要材料，在其表面做分形刻蚀，以简单的十字缝隙为基本单元，先在中心位置刻蚀 1 个十字缝隙，得到

0-fractal 结构，如图 1(b)所示；在维持中心十字尺寸不变的情况下进行一次迭代，产生 4 个小十字分形缝隙，如图 1(c)所示；依次进行二次迭代，得到 16 个微十字分形缝隙，如图 1(d)所示。上述十字分形迭代采用一般迭代法，迭代公式如下式：

$$D(L_i, W_j) = \frac{1}{3} D(L_{i-1}, W_{j-1}), \quad i, j = 2, 3 \quad (3)$$

其中： L 和 W 分别表示十字缝隙的长与宽， D 用来统一描述缝隙长、宽的矢量。另外，满足 $i=j$ 。

根据分形理论的分数维特性，结合式(2)确定了十字缝隙分形纳米天线结构的尺寸。天线结构的长与宽相等，均为 $P=350 \text{ nm}$ ，Ag 材料层厚度(缝隙厚度相同)为 $h=100 \text{ nm}$ 。Ag 介电常量使用 Johnson and Christy 实验测定数据来描述^[19]。在 0-fractal 结构中，其十字缝隙分形结构的长和宽分别为 $L_1=270 \text{ nm}$ 和 $W_1=81 \text{ nm}$ ；对于 1-fractal 结构，其 4 个小十字缝隙的长和宽分别为 $L_2=90 \text{ nm}$ 和 $W_2=27 \text{ nm}$ ；2-fractal 结构中，其 16 个微十字缝隙的长和宽分别为 $L_3=30 \text{ nm}$ 和 $W_3=9 \text{ nm}$ 。利用式 (2)，求得该结构的分数维度 $D_s=\ln 4/\ln 3 \approx 1.262$ 。

3 结果分析与讨论

本文采用 Lumerical FDTD Solutions 仿真软件来计算天线的透射特性。仿真区域大小为 $350 \text{ nm} \times 350 \text{ nm} \times 8000 \text{ nm}$ 。在 X, Y 方向上设置为周期边界条件，在 Z 方向上设置成 PML 边界条件。其中，周期边界条件可以模拟天线结构沿 X, Y 方向上周期排列，PML 边界条件可以吸收 Z 方向上超出区域的辐射。仿真环境背景材料设置为空气(折射率为 1)。网格加密步长设置为 2 nm ，并选取 500 个频率采样点来进行透射率的计算，设置足够长的计算时间从而保证计算的准确性。选择平面波作为入射光源，入射光沿 Z 轴垂直射入结构且电场沿 X 方向偏振，其波长范围为 $400 \text{ nm} \sim 2500$

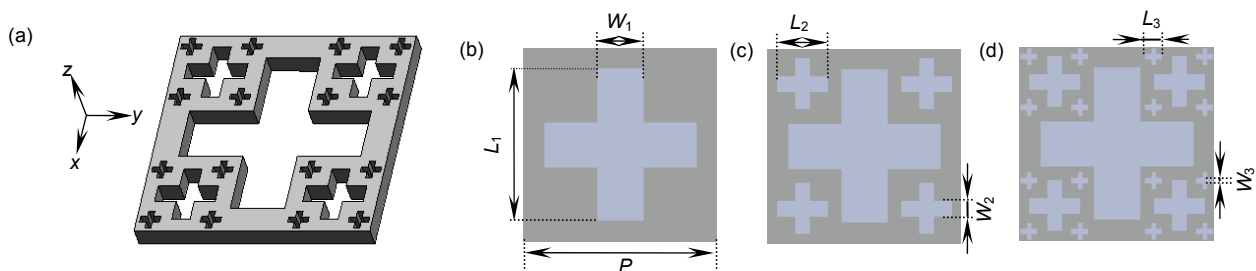


图 1 十字缝隙分形纳米天线结构模型。(a) 十字缝隙分形纳米天线结构；(b) 0 分形；(c) 1 分形；(d) 2 分形

Fig. 1 Cross-slots fractal nano-antenna structure model.

(a) Cross-slot fractal nano-antenna structure; (b) 0-fractal; (c) 1-fractal; (d) 2-fractal

nm。本小节将主要分析十字缝隙分形纳米天线的异常透射特性、表面电场分布、透射光束的场相位分布和均匀十字缝隙结构与十字缝隙分形结构之间的透射特性差异，并具体讨论了物理参数对十字缝隙分形纳米天线的异常透射特性的影响以及分形尺寸与非分形尺寸之间的透射谱差异。

3.1 十字缝隙分形纳米天线异常透射特性

十字缝隙分形纳米天线在 400 nm~1600 nm 波段上的透射率随波长变化的曲线如图 2 所示(黑色实线)。图 2 结果表明，随着分形迭代次数的增加，十字缝隙分形纳米天线峰值处的透射率呈现增长的趋势。本文设计的十字缝隙分形纳米天线透射率高达 99.51%，对应的 FWHM 最宽约为 200 nm。同时，如表 1 所示，在峰值对应的波长处，光透射率(“Highest peak”列)高于十字缝隙面积与总面积的比值(“The area ratio”列)，表明分形结构实现了光的异常透射。其机理是十字缝隙可以看成若干个波导腔，当光波垂直入射到分形纳米天线结构时，会在这些波导腔表面产生等离激元共振，使得相邻缝隙形成的波导腔共振 LSPs 之间相互耦合作用增强，进而缝隙之间的局域场明显增强，形成了光的异常透射，导致透射率也有明显的增强。与文献[10-13]相比，透射率有大幅提高。此外，纳米天线在短波段产生的谐振也愈发明显，能够进一步提

高光的透射率。

接着，本文讨论了十字缝隙分形纳米天线(2-fractal)结构透射光束的场相位分布情况，如图 3(a)、3(b)所示。其中，横轴为波长，纵轴分别为十字缝隙分形纳米天线结构中 Ag 材料沿 x 、 y 方向上的尺寸。图 3 扫描结果表明，随着波长的增加，相位大体上呈周期性变化，周期约为 150 nm，能实现从 $-\pi$ 到 π 的全 2π 透射光束的相位调控。另外，相位的变化受纳米天线 Ag 的结构尺寸整体影响不大，在 dy 尺寸变化下相位表现一致。而在 dx 尺寸下，如图 3(a)中黑色箭头所示，相位在 800 nm~1200 nm 波段中内出现了越来越明显的向右、向左相位平移现象，形成了如图 3(a)中椭圆所圈的相位叠加效应。这是由于当平面光沿 Z 轴入射时，电场沿着 X 方向偏振，随着 dx 发生变化，改变了十字缝隙结构腔体表面的电流分布，影响了电场分布，因此形成了向左、向右的矩形状相位平移，产生了相位叠加效应。上述结果为十字缝隙分形纳米天线的相关应用提供了一定的实验依据。

0-fractal、1-fractal 和 2-fractal 结构的分形缝隙纳米天线在长波段中透射率最高处的表面电场强度分布如图 4(a)~4(c)所示。

首先，十字缝隙交叉处的四个角的场强明显高于其它部分的场强。另外，随着分形迭代次数的增加，十字缝隙分形纳米天线表面的电场增强指数略有提高。这是由于局部表面等离共振(localized surface plasmon resonances, LSPRs)和 SPPs 发生局部近场耦合的缘故，即入射到纳米天线结构表面的光波与结构内的自由电子发生碰撞，产生 LSPRs，同时改变了纳米天线结构表面的电流分布，使得表面等离激元发生极化，进而二者之间相互作用所致。图 4(d)~4(i)描述了 1-fractal 和 2-fractal 结构的纳米天线在短波中的三个谐振点处的电场分布。对于 1-fractal 结构，当波长分别为 537.542 nm、484.89 nm、449.995 nm 时，相对最高场强的分布依次为小十字的中心的四个尖端位置、靠近中心十字一侧的小十字外侧尖端、靠近中心十字

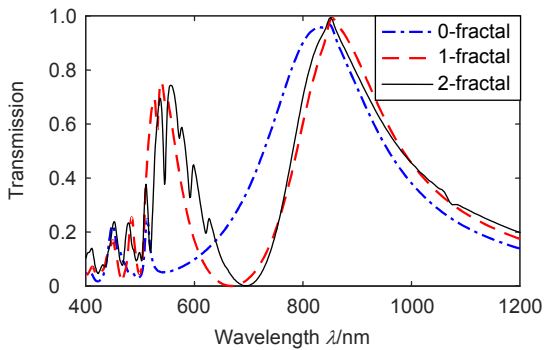


图 2 十字缝隙分形纳米天线透射谱
Fig. 2 Transmission spectrum of cross-slots fractal nano-antenna structure

表 1 分形纳米天线实验数据

Table 1 The experimental data of fractal nano-antenna

Fractal nano-structure	Peak wavelength/nm	Highest peak	Slots area/nm ²	Total area/nm ²	The area ratio
0-fractal	848.495	0.9701	37179		0.3035
1-fractal	854.598	0.9937	53703	122500	0.4384
2-fractal	851.536	0.9951	61047		0.4983

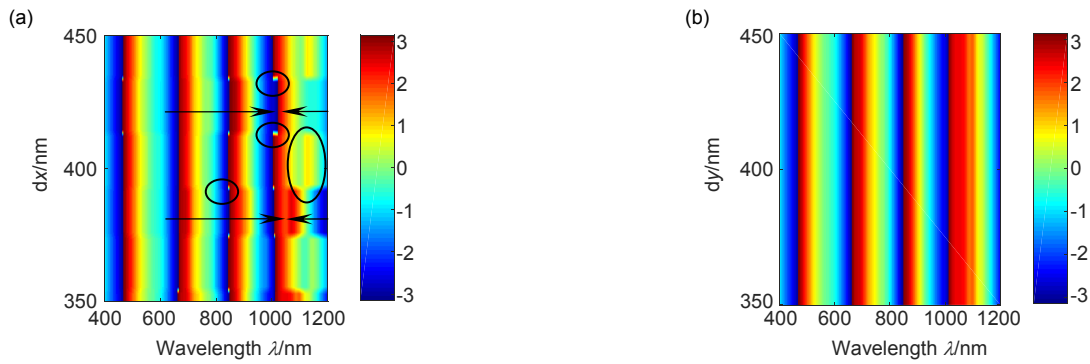


图3 透射光束的场相位分布。(a) dx 尺寸下; (b) dy 尺寸下
Fig. 3 The field phase distribution of the transmitted beam. (a) Under dx size; (b) Under dy size

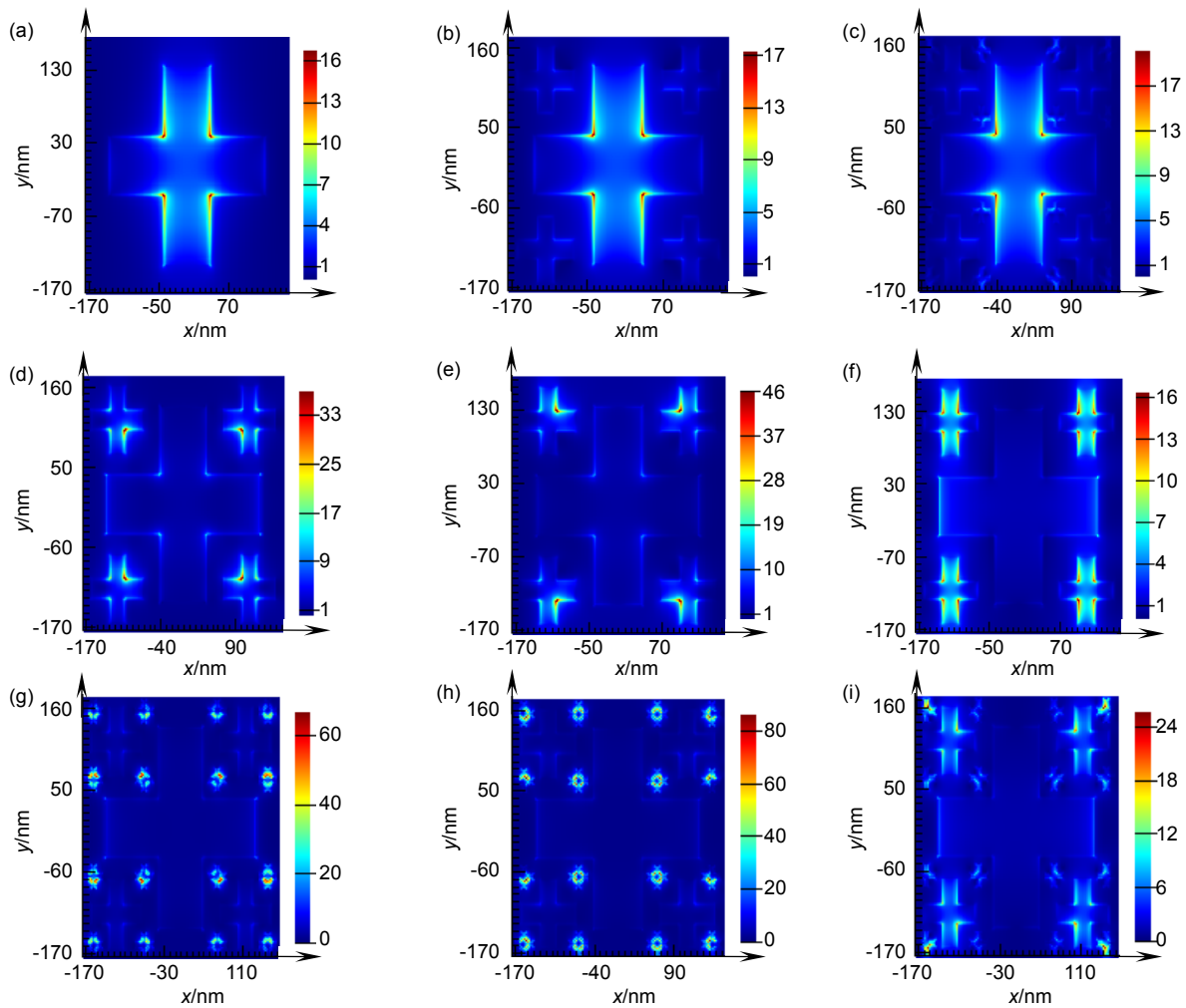


图4 十字缝隙分形纳米天线表面的电场分布 $|E|$ 。(a) 0分形: 848.495 nm; (b) 1分形: 854.598 nm; (c) 2分形: 851.536 nm; (d) 1分形: 449.995 nm; (e) 1分形: 484.89 nm; (f) 1分形: 537.542 nm; (g) 2分形: 451.706 nm; (h) 2分形: 478.061 nm; (i) 2分形: 555.123 nm

Fig. 4 The electric field distribution $|E|$ on the surface of the cross-slots fractal nano-antenna. (a) 0-fractal: 848.495 nm; (b) 1-fractal: 854.598 nm; (c) 2-fractal: 851.536 nm; (d) 1-fractal: 449.995 nm; (e) 1-fractal: 484.89 nm; (f) 1-fractal: 537.542 nm; (g) 2-fractal: 451.706 nm; (h) 2-fractal: 478.061 nm; (i) 2-fractal: 555.123 nm

一侧的小十字内侧尖端。其中,当波长为 484.89 nm 时,其表面电场分布强度的最高指数超过了 20。而对于 2-fractal 结构,在短波段的三个谐振点处的高场强随着波长的减少而有所增加,且其电场增强指数也随着波长的减少先增加后减少,在 478.061 nm 处的电场强度的指数高达 80。

为了进一步求证十字缝隙分形纳米天线结构优于传统纳米天线结构,选取结构相似且等阶的均匀十字缝隙纳米天线结构与其进行透射特性比较。图 5 是均匀十字缝隙尺寸结构(红色实线)与十字缝隙分形结构下纳米天线的透射谱比较。均匀十字缝隙纳米天线结构如图 5(a)、5(c)和 5(d)所示,该结构的十字缝隙长和宽分别为 60 nm 和 20 nm。

图 5 结果表明,两种结构的透射率峰值随着十字缝隙个数的增加而增加。对于均匀十字缝隙结构,透射率随着十字缝隙的增加而明显增加。如图 5(b)所示,单个十字缝隙的均匀结构的透射率仅接近于 5%,随着缝隙个数的增加,在与十字缝隙分形结构对应的均匀十字缝隙结构中,透射率峰值接近 80%,并且出现了两个明显的谐振峰。如图 5(a)、5(c)和 5(d)中的透射谱所示,十字分形缝隙结构的透射率远高于均匀十字缝隙结构的透射率,这是因为在 Ag 材料长和宽尺寸固定的条件下,分形十字缝隙个数越多,意味着形成的

波导腔体个数越多,并且相同十字缝隙个数的分形纳米天线的缝隙面积大于均匀结构纳米天线的缝隙面积。因此,在分形纳米天线的十字缝隙边缘束缚的能量越多,会使得缝隙之间的近场耦合作用增强更明显,进而光的透过性就越强。由此也可得,同一缝隙结构中,由分形理论设计的分形缝隙结构相较于均匀缝隙结构更微型化,透射率更高。同时,明显可以看到十字缝隙分形结构的 FWHM 也更宽。上述结论表明,十字分形缝隙结构在透射特性方面优于均匀十字缝隙结构。

3.2 不同结构参数下的异常透射特性

该部分主要考虑的结构参数有 Ag 材料边长 P 和厚度 h 。保持其他参数不变,分别改变边长 P 和厚度 h ,分析其透射谱的变化。图 6(a)和 6(b)展示了不同边长 P 和厚度 h 的纳米天线结构透射谱的变化情况,图 6(c)和 6(d)描述了对应的半波宽(FWHM)变化情况。FWHM 计算公式为

$$FWHM = \lambda_1 - \lambda_2, \quad (4)$$

$$\omega(\lambda_i) \approx \frac{Max_transmission}{2}, \quad (5)$$

其中: ω 表示某一参数, λ_i 表示半主峰值对应的波长,一般 i 有两个值,记为 λ_1, λ_2 。

图 6(a)表示在 400 nm~1400 nm 波段内,当边长

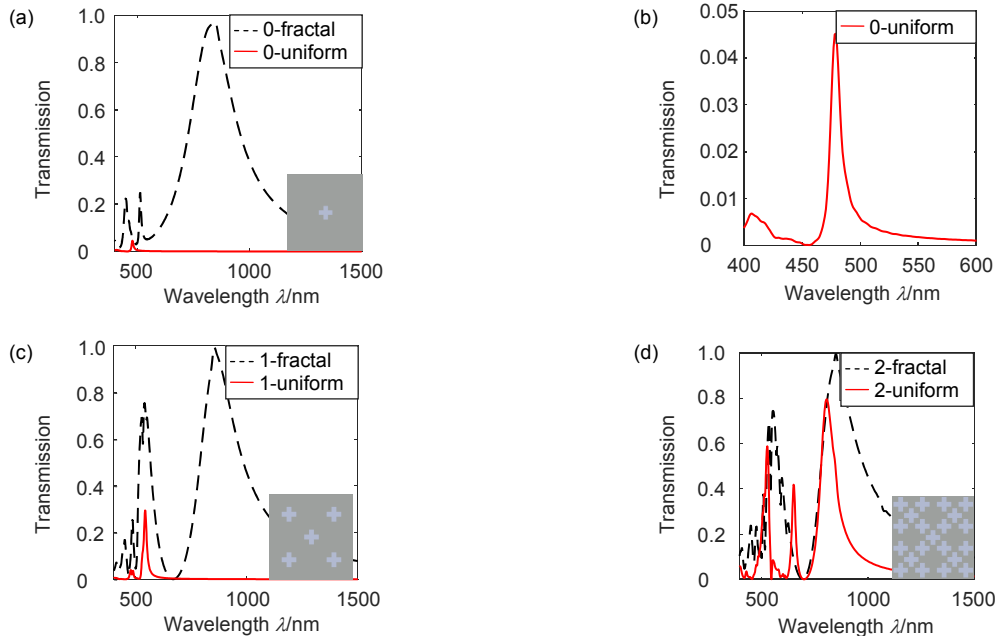


图 5 均匀十字缝隙天线结构与十字缝隙分形结构的透射谱比较。

(a) 0 分形 & 0 均匀; (b) 0 均匀; (c) 1 分形 & 1 均匀; (d) 2 分形 & 2 均匀

Fig. 5 Comparison of transmission spectra between uniform cross slots antenna structure and cross-slots fractal.

(a) 0-fractal & 0-uniform; (b) 0-uniform; (c) 1-fractal & 1-uniform; (d) 2-fractal & 2-uniform

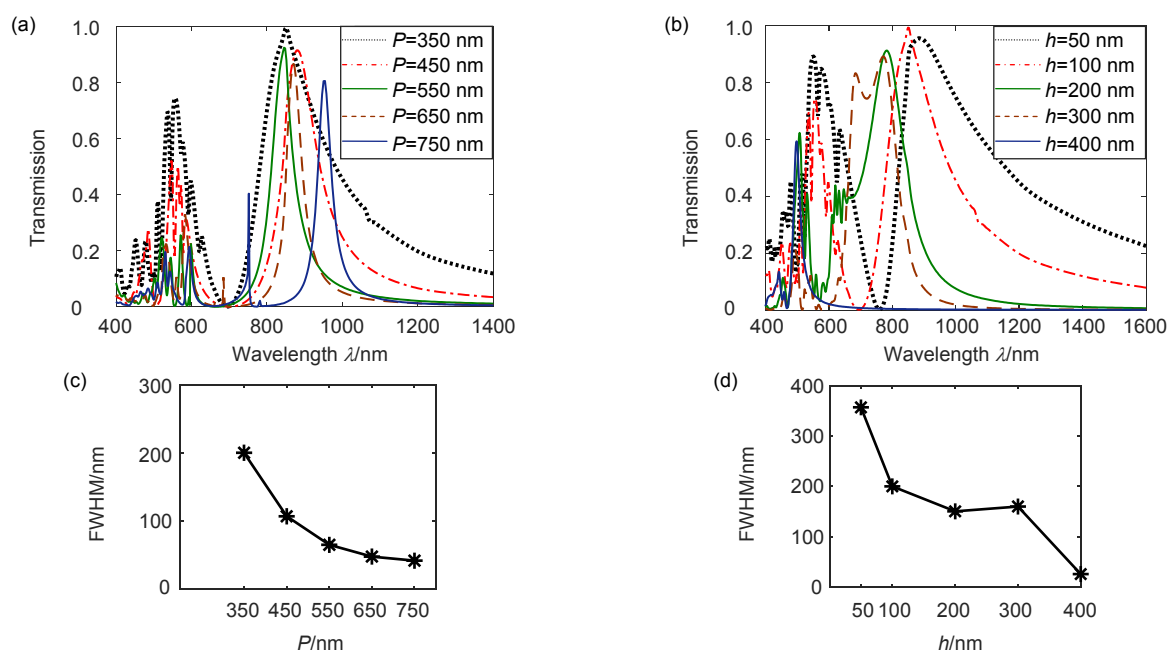


图6 不同结构参数下的纳米天线结构透射谱及其半波宽。(a) 不同边长 P 下的透射谱; (b) 不同厚度 h 下的透射谱; (c) 不同边长 P 下的半波宽; (d) 不同厚度 h 下的半波宽

Fig. 6 Transmission spectrum and FWHM of nano-antenna structure under different structural parameters.

(a) Transmission spectrum with different lengths P ; (b) Transmission spectrum with different thickness h ;

(c) FWHM with different lengths P ; (d) FWHM with different thickness h

从 350 nm 增加到 750 nm(步长为 100 nm)时, 十字缝隙分形纳米天线的透射率曲线, 图 6(c)是对应 FWHM 随边长 P 变化的离散折线图。随着边长 P 的增加, 在长波峰值处产生共振, 透射率整体呈下降趋势, 对应的 FWHM 变窄。当 $P=750$ nm 时, 出现了三个明显的窄带谐振峰。当 $P=350$ nm 时, 透射率相比较于其它边长更高, FWHM 更宽。图 6(b)表示当厚度从 50 nm 增加到 400 nm 时, 十字缝隙分形纳米天线的透射率曲线, 图 6(d)是对应的 FWHM 随厚度 h 变化的离散折线图。当厚度逐渐增加时, FWHM 逐渐变窄, 且伴有明显的蓝移特点。在 $h=50$ nm 时达到最宽(约 356.8 nm, 透射率仍高达 95.66%), 在 $h=400$ nm 时达到最窄(约 26.3 nm)。由于衬底厚度的变化影响了纳米天线结构的介电常数, 改变了表面等离子体共振波长, 从而导致了透射峰峰值的移动。在实际应用中, 可根据具体情况对边长 P 和厚度 h 进行适当调整。

3.3 不同材料和入射角下的异常透射特性

本部分主要分析不同材料和入射角对十字缝隙分形纳米天线结构透射特性的影响。保持其他参数不变, 分别改变材料和入射角, 分析其透射谱的变化。图 7 表示在 400 nm~1500 nm 波段内, 不同材料和入射角度的纳米天线结构透射谱的变化情况。常见金属材料

对应的纳米天线透射谱曲线如图 7(a)所示。其中, Ag 材料对应的纳米天线透射率最高, Cu、Au 次之, Al 最低。这是因为 Ag 材料具有与其尺寸和形状相关的光学颜色, 其与特定入射光波长的强耦合可使得纳米级天线局部电磁场强度明显增强, 进而使得透射率明显提高。Ag 纳米线还具有优异的电性能。Ag 材料的独特光学性质使得其在纳米天线设计上得到了广泛的应用。因此, 本文也选用了 Ag 材料作为基本材料。图 7(b)是不同入射角度下透射谱的变化情况。峰值透射率虽然随着角度的增加而减小, 但在大入射角度 (70°)下, 主峰最高透射率仍旧大于 74%, 半波宽也伴随着角度的减小而稍微变窄。

3.4 分形与非分形尺寸下的异常透射特性

本部分比较了十字缝隙的分形与非分形尺寸之间的透射特性差异。保持其他参数不变, 分别改变十字缝隙长度 L 和宽度 W , 分析其透射谱的变化。图 8 表示不同缝隙长度 $L(L_1, L_2, L_3)$ 和宽度 $W(W_1, W_2, W_3)$ 的纳米天线结构透射谱的变化情况。

图 8(a)和图 8(b)透射谱结果表明, 中心十字的长度 L_1 和宽度 W_1 参数对纳米天线的透射特性影响明显, 整体来看, FWHM 随着长度 L_1 的增加而增加, 且透射谱伴有明显的红移现象; 在分形尺寸 $L_1=270$ nm,

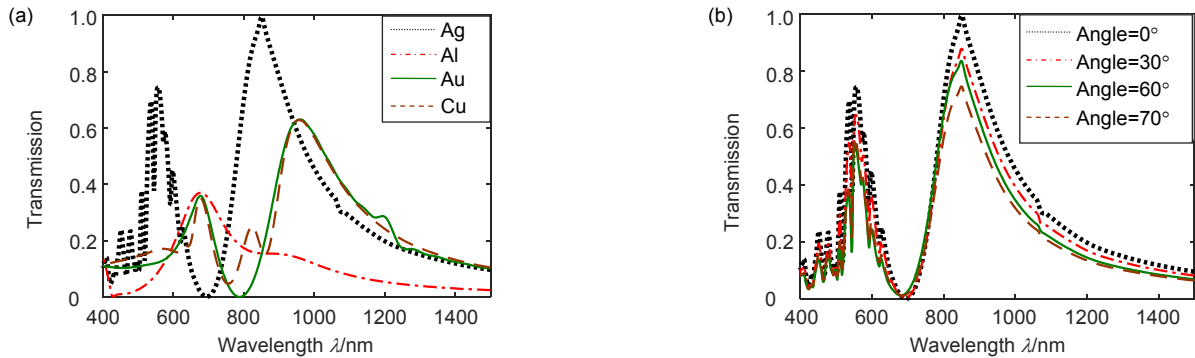


图7 不同材料及入射角下的透射谱。(a) 不同材料; (b) 不同入射角

Fig. 7 Transmission spectra of different materials and incident angles. (a) With different materials; (b) With different angles

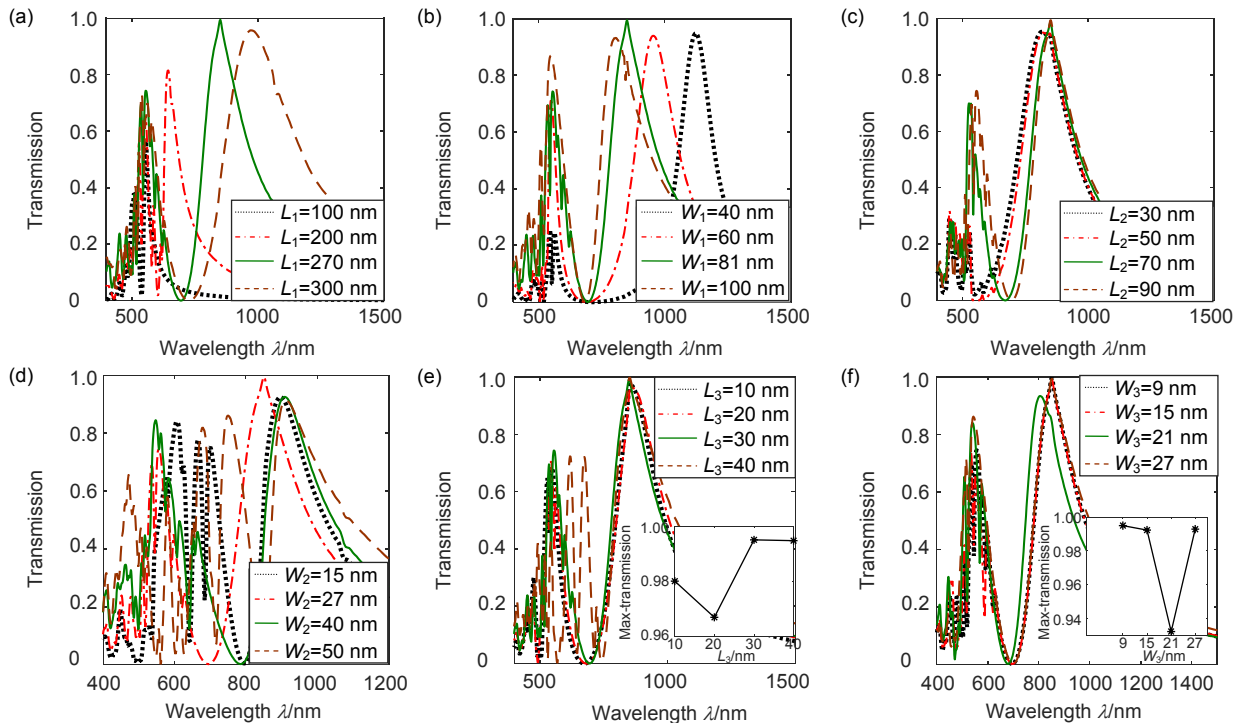


图8 十字缝隙参数下的透射谱。(a) 不同 L_1 尺寸; (b) 不同 W_1 尺寸; (c) 不同 L_2 尺寸;

(d) 不同 W_2 尺寸; (e) 不同 L_3 尺寸; (f) 不同 W_3 尺寸

Fig. 8 Transmission spectrum under the cross slots parameter. (a) With different L_1 ; (b) With different W_1 ; (c) With different L_2 ; (d) With different W_2 ; (e) With different L_3 ; (f) With different W_3

$W_1=81$ nm 下, 对应的透射曲线峰值最高。随着宽度 W_1 的增加, 透射谱呈现蓝移的规律。如图 8(c)和 8(d) 所示, 随着一次迭代产生的小十字缝隙的长度 L_2 的增加, 透射谱呈现细微的红移规律; 对于宽度 W_2 , 规律不明显, 但在分形尺寸 $L_2=90$ nm, $W_2=27$ nm 下, 透射谱峰值最高, 波谱波动较小。二次迭代产生的微十字缝隙长度 L_3 和宽度 W_3 对透射特性的影响较小, 如图 8(e)和图 8(f)所示。随着 L_3 的增加, 产生了多个谐振点。结合不同尺寸的峰值变化的内置曲线, 在分形

尺寸 $L_3=30$ nm, $W_3=9$ nm 下, 峰值透射率最高, 透射谱更稳定。

如图 8(d)、8(e)所示, 非分形尺寸的透射谱波动较大。这是因为随着迭代次数的增加, 纳米天线结构变得复杂, 天线表面等离子体振动对于个别参数的影响规律不明显, 故而在不同的波导腔内存在 LSPRs 与十字缝隙之间的相互耦合作用, 当缝隙长度 L 和宽度 W 沿着一定方向发生变化时, 透射谱可能有局部波动大和不规则变化的情况出现。综上所述, 虽然非分形

尺寸下的纳米天线结的 FWHM 比较宽,但其透射率低于分形尺寸下的纳米天线,且存在较大的波动,不易调控,而分形尺寸纳米结构下透射率更高,透射谱相对稳定,容易调控。因此,分形尺寸下的十字缝隙分形纳米天线结构优于非分形下的纳米天线结构。

4 结 论

本文提出了一种基于分形理论的十字缝隙分形纳米天线结构,并采用 FDTD 计算方法,详细分析了十字缝隙分形纳米天线的异常透射特性、透射光束相位分布、纳米天线表面电场分布及十字缝隙分形结构与均匀十字缝隙结构之间的透射特性差异,接着讨论了物理参数对分形纳米天线异常透射特性的影响及分形尺寸与非分形尺寸的纳米天线的透射特性。结果表明,十字缝隙分形纳米天线结构优于均匀十字缝隙纳米天线,也优于非分形尺寸下的纳米天线,半波宽(FWHM)更宽,且实现了光的异常透射,其透射率最高可达 99.51%,同时 FWHM 约为 200 nm;通过调整物理参数,当 Ag 材料厚度 h 为 50 nm 时,FWHM 可达 356 nm,此时的峰值透射率仍高达 95.66%,普遍大于传统结构;在大入射角度下(70°),峰值透射率仍大于 74%。另外,相较于均匀结构,其十字缝隙分形纳米天线的分数维性质使得纳米天线尺寸大幅减小。同时,十字缝隙分形纳米天线在可见光波段产生了紧凑的多谐振,谐振峰值高于 70%,能够进一步提高总的光传输。最后,透射谱随着参数的调整会沿着长波或短波方向移动,产生红移或蓝移规律,实现了透射谱的可控可调特性,且能实现全 2π 透射相位调控。这些结果为解决大部分传统天线和纳米天线透射率低的问题提供了新的研究思路,同时为新型纳米级天线光学器件、生物传感、集成光学等方面应用提供了一定的借鉴意义。

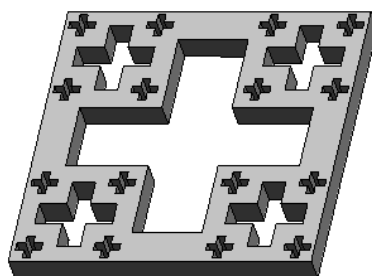
参考文献

- [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] Bethe H A. Theory of diffraction by small holes[J]. *Physical Review*, 1944, **66**(7–8): 163–182.
- [3] He S L. The simulation and design of frequency selective surface with fractal pattern[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2015.
何嵩磊. 基于分形图案的频率选择表面的仿真设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [4] Guo T. Review on plasmonic optical fiber grating biosensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(3): 0328006.
- [5] Wang J L, Zhang B Z, Duan J P, *et al.* Flexible dual-stopband terahertz metamaterial filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(10): 1016001.
王俊林, 张斌珍, 段俊萍, 等. 柔性双阻带太赫兹超材料滤波器[J]. *光学学报*, 2017, **37**(10): 1016001.
- [6] Qi Y P, Zhang X W, Zhou P Y, *et al.* Refractive index sensor and filter of metal-insulator-metal waveguide based on ring resonator embedded by cross structure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, **67**(19): 197301.
祁云平, 张雪伟, 周培阳, 等. 基于十字连通形环形谐振腔金属-介质-金属波导的折射率传感器和滤波器[J]. *物理学报*, 2018, **67**(19): 197301.
- [7] Ghaemi H F, Thio T, Grupp D E, *et al.* Surface plasmons enhance optical transmission through subwavelength holes[J]. *Physical Review B*, 1998, **58**(11): 6779–6782.
- [8] Van Der Molen K L, Koerkamp K J K, Enoch S, *et al.* Role of shape and localized resonances in extraordinary transmission through periodic arrays of subwavelength holes: Experiment and theory[J]. *Physical Review B*, 2005, **72**(4): 045421.
- [9] Degiron A, Ebbesen T W. The role of localized surface plasmon modes in the enhanced transmission of periodic subwavelength apertures[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2005, **7**(2): S90–S96.
- [10] Zhang X N, Liu G Q, Liu Z Q, *et al.* Near-field plasmon effects in extraordinary optical transmission through periodic triangular hole arrays[J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(10): 107108.
- [11] Zhang X N, Liu G Q, Liu Z Q, *et al.* Effects of compound rectangular subwavelength hole arrays on enhancing optical transmission[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, **7**(1): 4500408.
- [12] Zhang W, Wang Y K, Luo L N, *et al.* Extraordinary optical transmission of broadband through tapered multilayer slits[J]. *Plasmonics*, 2015, **10**(3): 547–551.
- [13] Zhao B, Yang J J, Huang Z F. Anomalous transmission properties of two integrated metallic nanoslits under plasmonic cross talking coupling[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(3): 0324005.
赵波, 杨建军, 黄振芬. 基于表面等离子体交叉耦合作用的纳米金属双缝异常透射现象[J]. *光子学报*, 2018, **47**(3): 0324005.
- [14] Xiao H. The research of multi-band and broadband antenna based on fractal structure[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
肖花. 基于分形结构的多频与宽带天线研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [15] De Nicola F, Purayil N S P, Spirito D, *et al.* Multiband plasmonic sierpinski carpet fractal antennas[J]. *ACS Photonics*, 2018, **5**(6): 2418–2425.
- [16] Puente-Baliarda C, Romeu J, Pous A, *et al.* On the behavior of the sierpinski multiband fractal antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1998, **46**(4): 517–524.
- [17] Cakmakyapan S, Cinel N A, Cakmak A O, *et al.* Validation of electromagnetic field enhancement in near-infrared through sierpinski fractal nanoantennas[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(16): 19504–19512.
- [18] Sivia J S, Kaur G, Sarao A K. A modified sierpinski carpet fractal antenna for multiband applications[J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, **95**(4): 4269–4279.
- [19] Johnson P B, Christy R W. Optical constants of the noble metals[J]. *Physical Review B*, 1972, **6**(12): 4370–4379.

Broadband cross-slots fractal nano-antenna and its extraordinary optical transmission characteristics

Liu Juefu, Chen Jiao, Li Kangkang, Liu Yuanyuan, Zhu Lu*

School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China



Cross-slots fractal nano-antenna structure model

Overview: The nano-antenna structure can break through the optical diffraction limit and achieve efficient transmission of light. For nano-antennas with specific wavelengths of radiation, transmission characteristics are an important characteristic of effective light transmission. Ebbesen et al. found optical extraordinary transmission phenomena when analyzing the transmission characteristics of metal film sub-wavelength aperture arrays. When light is incident on a sub-wavelength aperture array, the light transmission is higher than the ratio of the aperture area to the total area of the film at a particular wavelength, and the transmission is 1 to 2 orders of magnitude higher than the classical aperture transmission theory. Study has shown that the generation of extraordinary optical transmission is generally attributed to the mutual coupling of light waves with free electron oscillations at the surface of metal holes or slots structures, and localized surface plasmons at the edges of apertures or slots also have a non-negligible effect on extraordinary transmission. The coupling efficiency of the plasmon polarization of the upper and lower surfaces of the structure can be improved, thereby enhancing the transmission of light. In order to achieve wide-band extraordinary transmission and the purposes of controllable and adjustable, we introduce fractal theory, and utilize the properties of self-similarity and fractal dimension to propose an extraordinary transmitted cross-slots fractal nano-antenna. Furthermore, the finite-time-difference method is used to calculate the extraordinary transmission characteristics and surface electric field distribution of the cross-slots fractal nano-antenna structure, and the transmission characteristics mechanism is systematically analyzed and compared in detail. The results show that the cross-slots fractal structure is smaller in size, wider in the full width at half maximum (FWHM), and higher in transmittance, up to 99.51%. At 851.536 nm, the light transmittance is much higher than that of the uniform cross-slots structure. The ratio of the hole area to the Ag material area realizes the extraordinary optical transmission. By adjusting the physical parameters, the transmission spectrum exhibits a red-shift or blue-shift characteristic, and achieves the controllability of the transmission spectrum. Meanwhile, when $h=50$ nm, the FWHM is about 356 nm, the transmittance is still as high as 95.66%, which is generally higher than the traditional structures; At a large incident angle (70 degrees), the peak transmittance is still greater than 74%. In short, the cross-slots fractal nano-antenna has the characteristics of wide frequency, controllable and adjustable, and more miniaturized structure compared with other nano-antenna structures, and realizes the extraordinary transmission of light and full 2π phase transmission control. In addition, the nano-antenna produces a significant resonance in the short-band, which further enhances the transmission of light.

Citation: Liu J F, Chen J, Li K K, *et al.* Broadband cross-slots fractal nano-antenna and its extraordinary optical transmission characteristics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(6): 190422

Supported by Jiangxi Outstanding Youth Talent Funding Scheme (20171BCB23062), Jiangxi Natural Science Foundation (20171BAB204022), and Jiangxi Provincial Department of Education Science and Technology Research Key Project (GJJ170360)

* E-mail: luyuanwanwan@163.com