

文章编号: 1001-3806(2017)01-0034-06

宽视场高增益亚波长结构集光天线的优化设计

刘玉佳, 辛杰萍, 万玲玉*, 蔡卓淮

(广西大学 物理科学与工程技术学院, 南宁 530004)

摘要: 为了优化设计自由空间的高增益广角集光天线, 采用有限元数值计算方法分析不同结构参量对“牛眼”结构、喇叭型结构及碗型结构的透射增强特性的影响, 得到了凹槽个数与3种结构的表面等离子体异常透射增强系数之间的关系, 获得了碗型亚波长结构光学天线的透射增强优化结构参量。结果表明, 在单个凹槽结构能够有效激发表面等离子基元时, 喇叭型结构光学天线的透射增强系数得到有效提高; 通过结构参量优化, 当入射角在 $\pm 5^\circ$ 内时, 喇叭型结构的透射增益倍数为20倍~140倍, 在 $\pm 5^\circ \sim \pm 26^\circ$ 之间获得较为平坦的增益, 平均透射增强系数为10, 和现有的结构参量相比, 性能提高1倍; 碗型结构在入射角为 $\pm 60^\circ$ 的范围内有着较好的透射增强特性, 平滑区的平均透射增强系数为10。碗型结构比喇叭结构具有更加出色的广角传输特性。

关键词: 光学器件; 异常透射; 有限元; 碗型结构

中图分类号: TN256

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.01.008

Optimization design of optical antenna with wide field-of-view high-gain subwavelength structure

LIU Yujia, XIN Jieping, WAN Lingyu, CAI Zhuohuai

(School of Physical Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to optimize the design of wide field-of-view high-gain optical antenna in free space, the finite element method was utilized to analyze the effect of different structure parameters on transmission enhancement characterization of bull's eye structure, horn-shaped structure and bowl-shaped structure respectively. The relationship between the numbers of slit and the coefficient of surface-plasmon-enhanced extraordinary transmission was obtained, and the optimal structure parameters of bowl-shaped optical antenna with subwavelength structure was gotten. The results show that for horn-shaped optical antenna, when the single slit can excite the strongest surface plasmon polaritons (SPP), the coefficient of transmission enhancement has larger value. By optimizing the structural parameters, the value of horn-shaped structure enhancement coefficient varies from 20 times to 140 times when the incident angle θ is within $\pm 5^\circ$. The smooth enhanced gain is gotten at the incident angle in the range from $\pm 5^\circ$ to $\pm 26^\circ$. The average value of the enhancement coefficient is 10. The performance is doubled compared with the performance of present structural parameters. Bowl-shaped structure has a good enhanced transmission character at the incident angle in the range of $\pm 60^\circ$ and the average value of the enhancement coefficient is 10 in the smooth enhanced transmission area. The wide field-of-view transmission character of the bowl-shaped is better than of the horn-shaped.

Key words: optical devices; extraordinary transmission; finite element method; bowl shape structure

引言

与传统的通信方式相比较, 空间光通信具有高数据传输率、保密性强、无需申请频率和架设灵活方便等诸多优点, 但其对捕获、瞄准和跟踪 (acquisition, pointing and tracking, APT) 系统的高要求限制了它的推广

应用^[1]。具备广角响应的光接收机能够直接接收来自各个方向的光信号^[2], 简化 APT 系统的设计, 加快 APT 的过程, 使得多终端高速通信成为可能, 因而增加光接收机的视场成为研究的焦点。在自由空间光通信中, 一般采用增加扫描系统、非扫描方式的多元检测阵列、角度分集技术等方式来扩大接收机的角度响应范围^[3-4]。扫描的方式会受到系统扫描速率的影响, 难以实现快速的响应。多元检测阵列的视场角会受到前置的光学系统和光电检测器件的限制。角度分集技术可以实现大角度的视场接收, 甚至可以达到 180° , 但角度分集接收机实现起来是比较复杂, 限制了其实际的应用。光与亚波长金属结构相互作用可产生异常透射

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61367004); 广西自然科学基金资助项目 (2013GXNSFFA019001)

作者简介: 刘玉佳 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事微纳结构光电子器件的研究。

* 通讯联系人。E-mail: wanlingyu75@126.com

收稿日期: 2016-01-11; 收到修改稿日期: 2016-03-16

增强现象^[5-6], 获得高增益接收, 这一特性不仅解决了传统光电检测器件的响应速度与尺寸大小之间的矛盾, 也为空间光通信的广角接收机及其它光电器件^[7]提供了新的设计方向。最先利用表面等离子体原理设计的高性能光探测器是著名的“牛眼”结构^[2], 但“牛眼”结构不具备良好的广角响应性能。为获得具有广角增益特性的表面等离子体结构, 参考文献[2]中对“牛眼”结构进行了改良, 提出了一种等离子体激元喇叭型结构的广角接收机模型, 能够在较大的视场范围内实现空间光的增强接收^[5-6], 但其性能有待进一步优化提高。本文中基于光栅结构表面等离子体共振增强的异常透射分析, 获得了优化几何参量下凹槽个数对透射增强特性的影响, 得到通信波段 1550nm 下的喇叭型结构的透射增强特性及其优化结构参量, 和现有的结果相比, 所得广角增益接收性能提高 1 倍。并且提出了一种新型的碗型结构, 和喇叭型结构相比, 其广角响应的性能增加 1 倍。

1 “牛眼”结构的异常透射增强广角响应特征

首先研究“牛眼”结构的广角响应特性, 图 1 是“牛眼”结构的剖面示意图, 其具有 7 个结构参量, 凹槽的总个数 $2n_1$, 凹槽的宽度 w 和深度 h , 透射小孔的宽度 d 和厚度 t , 凹槽的周期 P_1 和凹槽离透射小孔的距离 a , 每个结构参量都对异常透射增强系数有着重要的影响。在数值分析中, 采取总场/散射场的建模有限元方法^[8], 吸收边界条件为完美匹配层 (perfectly matched layer, PML)^[9], PML 为有耗介质层, 整个结构处于空气中, 入射光是 TM 偏振的单位平面波。鉴于 1550nm 波段的激光通信系统在自由光通信中的应用优势, 选择工作波长为 1550nm 的光波。凹槽结构材料为金 (Au), 金在入射光波长为 1550nm 时的介电常数为: $\varepsilon_{\text{Au}} = -93.35 + j11.14$ ^[10]。

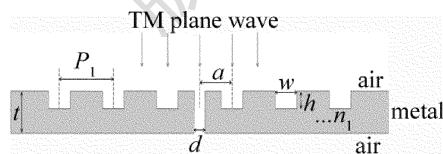


Fig. 1 Diagram of bull's eyes structure

现有的实验和理论研究表明^[11-16], 垂直光入射下, “牛眼”结构的异常透射增强来自耦合型表面等离子体极化波 (surface plasmon polaritons, SPP), 其对入射光波的角度敏感, 对波长不敏感。研究表明, “牛眼”结构凹槽阵列的最优周期为一个 SPP 波长。即 $P_1 = \lambda_{\text{SPP}}$, $\lambda_{\text{SPP}} = \lambda_0 / n_{\text{SPP}}$, $n_{\text{SPP}} = \sqrt{\varepsilon_{\text{air}} \varepsilon_{\text{Au}} / (\varepsilon_{\text{air}} + \varepsilon_{\text{Au}})}$ 。其中 λ_{SPP} 为 SPP 波长, λ_0 为入射光波长, n_{SPP} 为介质对 SPP 波的有效折射率, ε_{air} 为空气介电常数。当凹槽宽

度 w 处于 $0.5\lambda_{\text{SPP}} \sim 0.6\lambda_{\text{SPP}}$ 之间、凹槽深度与宽度的比值 $h/w = 0.4$ 左右时, 能有效地激发 SPP 波^[16]。根据此结论, 经过优化得到“牛眼”结构的优化参量为: $P_1 = \lambda_{\text{SPP}} = 1540\text{nm}$, $w = 0.56\lambda_{\text{SPP}} = 862\text{nm}$, $h = 0.4w = 345\text{nm}$, $t = 1000\text{nm}$, $d = 50\text{nm}$, $a = 850\text{nm}$ 。

由于结构的对称性, 只给出光从左侧入射的情况 (下面如不做特别说明, 入射光都从结构左侧入射)。异常透射增强系数定义为透射小孔透射的能量 T 与入射光照射在透射小孔上的能量 T_0 的比值。在上述优化参量下, 由图 2a 可以看出, 当 $h = 345\text{nm}$ 时, 单个凹槽的激发效率最大, 引起的异常透射增强系数也最大, 但其对应的凹槽饱和个数较少, 凹槽个数 $n_1 = 5$ 时, 透射增强基本就达到饱和了。可以观察到, 浅凹槽对应的凹槽饱和个数多, 垂直透射增强系数也大。即凹槽的深度越小, 其对应的透射增强饱和个数就越多, 垂直透射增强系数也越大。由图 2b 可以看出, 虽然浅凹槽、多凹槽个数的“牛眼”结构在垂直入射下透射增强系数会提高, 但其角度响应特性都很差, 即“牛眼”结构不具备广角响应的性能, 不能满足广角增益接收的要求。

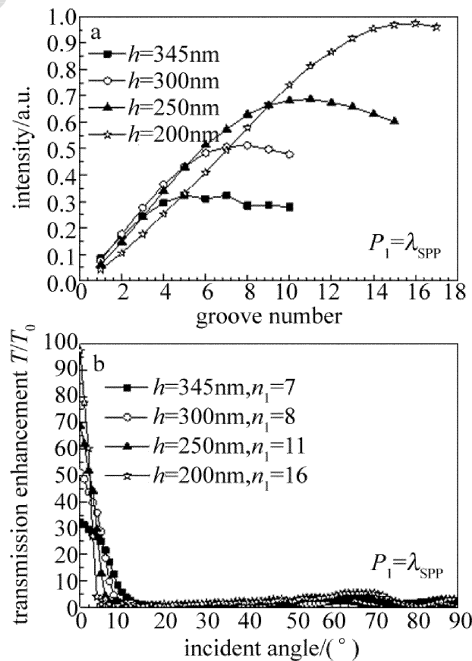


Fig. 2 Structure ($P_1 = 1540\text{nm}$, $w = 862\text{nm}$, $t = 1000\text{nm}$, $d = 50\text{nm}$, $a = 850\text{nm}$)

a—relationship between transmission amplitude and groove number under the vertical incidence of bull's eyes b—relationship between transmission enhancement coefficient and the incident angle of bull's eyes

2 喇叭型结构的异常透射增强广角响应特征

参考文献[2]、参考文献[6]中在“牛眼”结构的基础上提出了一种表面等离子体激元喇叭结构, 能在

较宽的视场范围内实现有效的广角增益透射。表面等离子体喇叭型结构广角集光天线如图 3 所示,结构参量有:凹槽的总个数 $2n_2$, 凹槽的宽度 w 和深度 h , 透射小孔的宽度 d 和深度 t , 凹槽的周期 P_2 和凹槽离透射小孔的距离 a , 倾斜角 φ 。其异常透射增强特性取决于干涉效应和 SPP 单向传播增强效应。

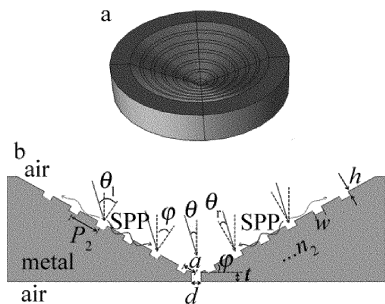


Fig. 3 a—3-D diagram of horn structure b—profile diagram of horn structure

对于该结构,参考文献[2]中给出了其透射增强的理论解释,首先约定:对倾斜部位来讲,光从右侧入射时,角度取负值;光从左侧入射时,角度取正值。如图 3b 所示,由几何关系可得: $\theta_l = \theta + \varphi$, $\theta_r = \theta - \varphi$, 其中 θ_l 和 θ_r 分别为入射光与喇叭型结构左右斜边法线的夹角, θ 为入射光与垂直方向的夹角。当光的入射角 $-\varphi < \theta < \varphi$ 时, $\theta_l > 0$, $\theta_r < 0$ 。由约定和 SPP 单向传播增强效应可知,两侧沿着透射小孔传播的 SPP 被增强,远离透射小孔的 SPP 被减弱。由能量守恒定律,为了使激发的 SPP 幅度最大,要求指向透射小孔传播的 SPP 与该侧入射的空间光干涉相消,这样进入凹槽的光能最少,激发 SPP 幅度最大。同时要求不同凹槽激发出的向着透射小孔传播的 SPP 之间干涉加强。由干涉理论得到入射光与 SPP 波之间的相位关系应满足如下两式:

$$\psi + \frac{2\pi P_2}{\lambda_{SPP}} - \frac{2\pi P_2 \sin \theta}{\lambda_0} = (2m_1 + 1)\pi \quad (1)$$

$$\frac{2\pi P_2}{\lambda_{SPP}} = 2m_2\pi \quad (2)$$

式中, m_1, m_2 是整数, ψ 为采样的相移, λ_0 为入射光波长,则有效的折射率为: $n_{SPP} = \sqrt{\epsilon_{air}\epsilon_{Au}/(\epsilon_{air} + \epsilon_{Au})}$ 。在很大的角度范围内, $\psi \approx \pi^{[17-18]}$ 。解出满足(1)式、(2)式的 P_2 和 θ 为:

$$\begin{cases} P_2 = 2\lambda_{SPP} \\ \theta = \arcsin\left(\frac{n_{SPP}}{2}\right) \end{cases} \quad (3)$$

这时,由凹槽阵列激发的 SPP 向透射小孔传播的能量最大。因此,可以计算出喇叭型结构的凹槽周期结构参量 $P_2 = 2\lambda_{SPP} = 3080\text{nm}$ 和倾斜角 $\varphi = 30^\circ$ 。其它结构参量的优化方法与“牛眼”结构参量的优化方法

类似。首先确定透射小孔的结构参量,透射小孔的结构参量要满足类法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 腔共振条件,经数值模拟计算后得到透射小孔深度 $t = 1000\text{nm}$, 透射小孔宽度 $d = 50\text{nm}$ 。与“牛眼”结构透射小孔的优化参量一样,因为其数值主要由选取的入射波长决定。在对“牛眼”结构的研究中,已经得到单个凹槽最有效激发表面等离子体激元时的结构参量 $w = 862\text{nm}$ 和 $h = 345\text{nm}$ 。研究表明,凹槽的深度和个数对异常透射增强系数有着重要的影响。图 4a 是凹槽的深度和个数对透射增强系数的影响,由图 4a 可见,凹槽的深度和个数对透射增强系数的影响在“牛眼”结构和喇叭型结构中是不同的,在喇叭结构中并没有出现如“牛眼”结构般的凹槽深度越小、对应的凹槽饱和个数越多的现象。对喇叭型结构来说,凹槽的饱和个数与凹槽的深度关系不大,饱和个数几乎一样。但垂直入射下,深凹槽更能够提高透射增强系数。这是因为对于喇叭型结构来讲,光垂直入射时,凹槽实际感受到的光是斜入射的,优化深度的凹槽更有利于 SPP 波的激发。由图 4b 可以看出,当凹槽深度 $h = 345\text{nm}$ 时,在 $\pm 30^\circ$ 范围内,喇叭型结构具有良好的广角响应性能。

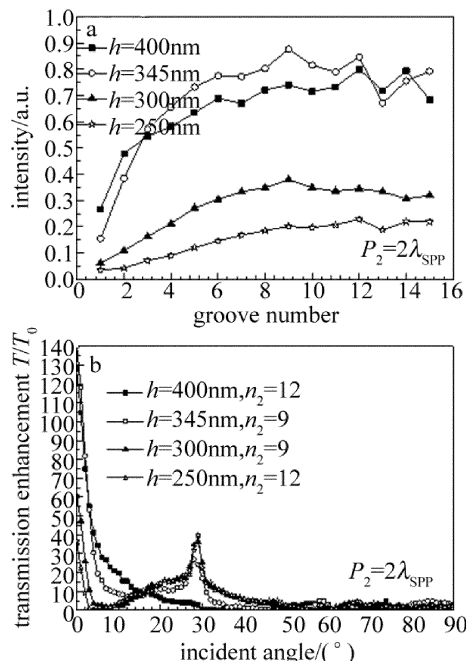


Fig. 4 a—relationship between transmission amplitude and groove number under the vertical incidence of horn structure b—relationship between transmission enhancement coefficient and the incident angle of horn structure

由图 5 可知,经过结构参量的优化,垂直入射下,喇叭结构的透射增强系数比参考文献[2]中的 45 高 3 倍,而在 $\pm 5^\circ \sim \pm 26^\circ$ 范围内的平坦响应区,平均透射增强系数为 10 左右,比参考文献[2]中的 4 高 2.5 倍。至此,得到 1550nm 波长光入射下,采用贵金属金的喇

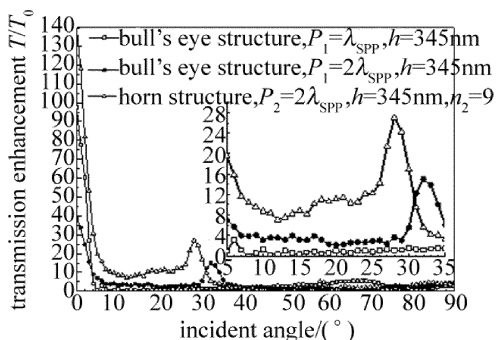


Fig. 5 Relationship between transmission enhancement coefficient and the incident angle of bull's eyes structure and horn structure

喇叭型结构的优化结构参量为:凹槽深度 $h = 345\text{nm}$, 凹槽宽度 $w = 862\text{nm}$, 凹槽的周期 $P_2 = 2\lambda_{\text{SPP}} = 3080\text{nm}$, 倾斜角 $\varphi = 30^\circ$, 透射小孔深度 $t = 1000\text{nm}$, 透射小孔宽度 $d = 50\text{nm}$, 凹槽离透射小孔的距离 $a = 850\text{nm}$ 。

3 碗型结构的异常透射增强广角响应特征

为了进一步改善喇叭结构的广角响应性能,提出了一种新的结构,称之为等离子体激元碗型结构,如图6所示。由图6可以看出,碗型结构可看成是由“牛眼”结构和喇叭型结构的变形和组合而成。其设计的原理与喇叭型结构相似。在 1550nm 波长下,针对垂直入射,倾斜部分结构的优化参量为: $h = 345\text{nm}$, $w = 862\text{nm}$, $P_2 = 2\lambda_{\text{SPP}} = 3080\text{nm}$, $\varphi = 30^\circ$ 。但其中产生的SPP波和其它模式的波的相互作用更为复杂,且包含更多的结构参量。为了更有效地激发SPP波,水平部分凹槽的结构参量采用上一节中优化的参量,即 $w = 862\text{nm}$, $h = 345\text{nm}$, 与倾斜部分凹槽的宽度和深度结构参量一样,减少了结构参量的个数和复杂性。离透射小孔最近的凹槽离透射小孔的距离 a 无论在“牛眼”结构还是在喇叭型结构中都对增强透射系数有着重要的影响。同样发现在碗型结构中凹槽离小孔的距离 a 对碗型结构广角响应特性有重要影响。此外,碗型结构倾斜部分和水平部分结合处的距离参量 b 对碗型结构的广角响应特性也有着重要的影响。模拟研究发现,当凹槽个数选择合适, a, b 两个参量经过优化后,碗型结构具有极好的广角响应特性。对“牛眼”结构

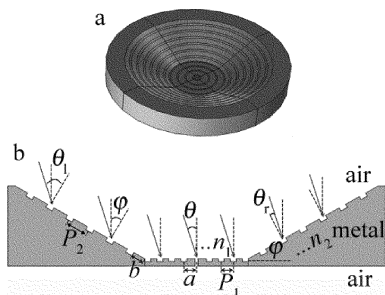


Fig. 6 a—3-D diagram of bowl structure b—profile diagram of bowl structure

和喇叭型结构的广角响应特征的研究表明:针对垂直入射下,对“牛眼”来说,当凹槽的深度 $h = 345\text{nm}$ 、凹槽个数为 $n_1 = 4$ 时,异常透射增强系数接近饱和;对喇叭型结构而言,当凹槽的深度 $h = 345\text{nm}$ 、凹槽个数为 $n_2 = 6$ 时,异常透射增强系数接近饱和。由此,碗型结构要想获得较好的广角响应性能,其水平部分的凹槽个数 n_1 的取值应该在4左右,倾斜部分的凹槽个数 n_2 应该在6左右。在如下的碗型结构参量下:凹槽的宽度 $w = 862\text{nm}$, 深度 $h = 345\text{nm}$, 透射小孔的宽度 $d = 50\text{nm}$, 深度 $t = 1000\text{nm}$, 凹槽离透射小孔的距离 $a = 1800\text{nm}$, 倾斜部分与水平部分处凹槽距离 $b = 1000\text{nm}$, 倾斜部分的倾斜角 $\varphi = 30^\circ$ 。图7中给出了凹

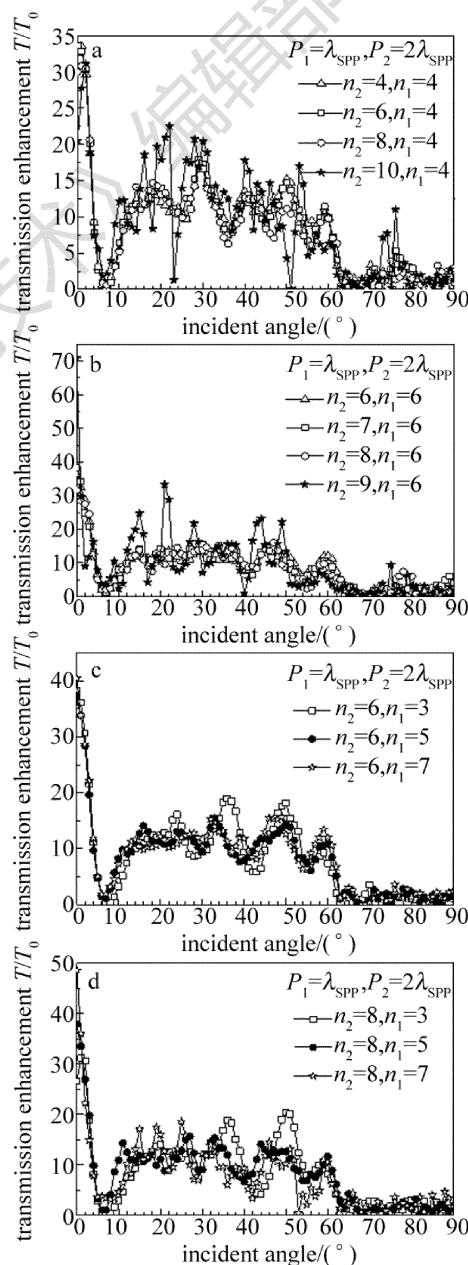


Fig. 7 Relationship between transmission enhancement coefficient and the incident angle of bowl structure ($w = 862\text{nm}$, $h = 345\text{nm}$, $t = 1000\text{nm}$, $d = 50\text{nm}$, $a = 1800\text{nm}$, $b = 1000\text{nm}$, $\varphi = 30^\circ$)

槽个数对碗型结构的广角响应特征的影响关系。

由图 7 可以看出,碗型结构倾斜部分与水平部分的凹槽个数对其透射增强广角响应特性有着重要的影响。在选择合适的 n_1 与 n_2 的情况下,碗型结构在 $\pm 60^\circ$ 范围内具有较大的透射增强系数,特别是在 $\pm 10^\circ \sim \pm 60^\circ$ 之间透射增强系数相对较为平滑。由图 7a 可以得到,当碗型结构水平部分的凹槽个数 $n_1 = 4$ 时,随着倾斜部分的凹槽个数 n_2 从 4 增加到 8 时,碗型结构的广角响应透射增强系数的变化趋势相似,在 $\pm 10^\circ \sim \pm 60^\circ$ 之间透射增强系数相对较为平滑;但当 $n_2 > 8$ 时,广角响应透射增强系数的变化波动很大。图 7b 显示出了相同的变化规律,当 $n_1 = 6, n_2 > 8$ 时,广角响应透射增强系数的变化波动也很大。图 7c 和图 7d 表明,当 n_1 的取值较小时($n_1 = 3$),广角响应透射增强系数的变化波动也很大。这表明:针对垂直入射优化结构参量,若把碗型结构看成“牛眼”结构和喇叭型结构的组合,则当碗型结构水平部分的凹槽个数取“牛眼”结构对应的凹槽饱和个数、且倾斜部分的凹槽个数取喇叭型结构对应的凹槽饱和个数时,碗型结构具有较好的广角响应性能。注意到倾斜部分与水平部分结合处,凹槽中心沿结构表面的距离为: $b + 862\text{nm} = 1862\text{nm}$, $a = 1800\text{nm}$ 。两者都接近于 λ_{SPP} ,这说明了 SPP 干涉在碗型结构中起了重要的作用,由于其中相位变化,光程关系极其复杂,两者值也偏离了 λ_{SPP} 。干涉的理论并不能完全地解析碗型结构在 $\pm 60^\circ$ 的大角度范围内具有良好响应的现象。其中的物理机制复杂,可以认为:除了入射的光波与激发的 SPP 波相互作用外^[19],碗型结构的倾斜部分对水平部分激发的 SPP 起了限制作用,此外复合衍射消逝波(composite diffracted evanescent waves, CDEW)^[20]也在其中参与作用,最终导致碗型结构在较大角度范围内都有着较高的透射增强系数。由图 8 可以清晰地看到,优化后的碗型结构在 $\pm 10^\circ \sim \pm 60^\circ$ 范围内提供了较为平滑的增益,其广角响应范围是喇叭型结构的 2 倍。

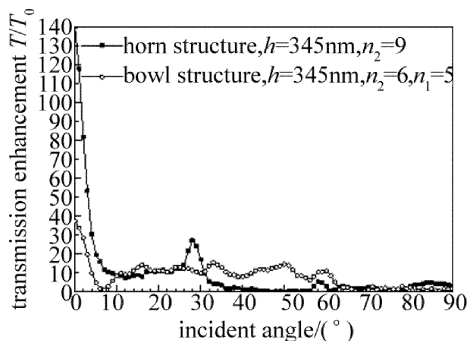


Fig. 8 Relationship between transmission enhancement coefficient and the incident angle of horn structure and bowl structure

4 结 论

采用有限元数值计算方法对“牛眼”结构和喇叭型结构的广角响应特性进行数值模拟计算,得到了 1550nm 波段下“牛眼”结构和喇叭型结构的最优化结构参量。计算结果表明,凹槽的深度和凹槽的个数对两种结构的异常透射增强系数有着重要的影响。对“牛眼”结构来说,在单个凹槽能够最有效激发表面等离子激元时,其对应的凹槽饱和个数较少,随着凹槽深度的减小,对应的凹槽饱和个数越大,垂直入射下透射增强系数也越大;对喇叭型结构来说,凹槽深度与凹槽饱和个数无关,在单个凹槽能够最有效激发表面等离子激元时,垂直入射下透射增强饱和系数最大。模拟计算结果表明,“牛眼”不具备实用的广角透射增强性能,经过结构参量优化的喇叭型结构具有广角响应特征。优化的喇叭型结构在光垂直入射下的透射增强系数比原有结构的 45 高 3 倍,并且在 $\pm 5^\circ \sim \pm 26^\circ$ 范围内的平坦响应区,平均透射增强系数为 10 左右,比原有结构中的 4 高 2.5 倍。经过优化设计后的碗型结构具有更好的广角响应性能,垂直入射下的透射增强系数为 40 左右,与参考文献[2]中的数值相当,但其广角响应范围增加到 $\pm 60^\circ$,是喇叭型结构的 2 倍。

参 考 文 献

- [1] BLOOM S, KOREVAAR E, SCHUSTER J, *et al.* Understanding the performance of free-space optics[J]. *Journal of Optical Networking*, 2003, 2(6): 178-200.
- [2] CAI L, LI G Y, XU A Sh. Wide field-of-view free-space optical receiver based on surface plasmon polaritons[J]. *China Communications*, 2009, 6(3): 53-59 (in Chinese).
- [3] RAMIREZ-INIGUEZ R, GREEN R J. Optical antenna design for indoor optical wireless communication systems[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2005, 18(3): 229-245.
- [4] JEONG W, KAVEHRAD M, JIVKOVA S. Broadband infrared access with a multi-spot diffusing configuration: performance[J]. *International Journal of Wireless Information Networks*, 2001, 8(1): 27-36.
- [5] 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.
- [6] LI G Y, CAI L, XIAO F, *et al.* Plasmonic corrugated horn structure for optical transmission enhancement[J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(12): 124205.
- [7] ZHANG X F, YUAN M H. Analysis of terahertz wave through a slit with parallel grooves on both sides[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(4): 533-536 (in Chinese).
- [8] JANSSEN O T, URBACH H P, 'THOOFT G W. On the phase of plasmons excited by slits in a metal film[J]. *Optics Express*, 2006, 14(24): 11823-11832.
- [9] BERENGER J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. *Journal of Computational Physics*, 1994, 114(2): 185-200.
- [10] RAKIC A D, DJURISIC A B, ELAZAR J M, *et al.* Optical proper-

- ties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices[J]. Applied Optics, 1998, 37(22): 5271-5283.
- [11] JANSSEN O T, URBACH H P, ' THOOF T G W. Giant optical transmission of a subwave-length slit optimized using the magnetic field phase[J]. Physical Review Letters, 2007, 99(4): 043902.
- [12] DEGRON A, EBBESEN T W. Analysis of the transmission process through single apertures surrounded by periodic corrugations[J]. Optics Express, 2004, 12(16): 3694-3700.
- [13] MARTIN-MORENO L, GARCIA-VIDAL F J, LEZEC H J, *et al.* Theory of highly directional emission from a single subwavelength aperture surrounded by surface corrugations[J]. Physical Review Letters, 2003, 90(90): 167401.
- [14] GARCIA-VIDAL F J, LEZEC H J, EBBESEN T W, *et al.* Multiple paths to enhance optical transmission through a subwavelength slit[J]. Physical Review Letters, 2003, 90(21): 213901.
- [15] YU L B, LIN D Zh, CHEN Y Ch, *et al.* Physical origin of directional beaming emitted from a subwavelength slit[J]. Physical Review, 2005, B71(4): 041405.
- [16] ISHI T, FUJIKATA J, OHASHI K. Large optical transmission through a single subwavelength hole associated with a sharp-apex grating[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2005, 44(4): L170-L172.
- [17] LI G Y, XU A Sh. Phase shift of plasmons excited by slits in a metal film illuminated by oblique incident TM plane wave[J]. Proceedings of the SPIE, 2008, 7135: 71350T.
- [18] NESCI A, DÄNDLIKER R, HERZIG H P. Quantitative amplitude and phase measurement by use of a heterodyne scanning near-field optical microscope[J]. Optics Letters, 2001, 26(4): 208-210.
- [19] ZHENG Y, DU J L. Simulation of interference field of multi-beam surface plasma polaritons[J]. Laser Technology, 2013, 37(1): 28-31 (in Chinese).
- [20] 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.