

doi: 10.3788/gzxb20124110.1156

不同周期数牛眼结构对基于伪表面等离子激发的太赫兹透射的影响

高春梅, 陈麟, 谢乐, 彭滢, 陈克坚, 蔡斌, 朱亦鸣

(上海理工大学 光电信息研究院; 上海市现代光学系统重点实验室; 教育部光学仪器与系统工程研究中心, 上海 200093)

摘 要:为研究不同周期数的牛眼结构对太赫兹透射的影响, 本文利用微机械加工方法, 在铝板上分别制作 5 个圆环凹槽和 15 个圆环凹槽两种牛眼结构, 并利用时域太赫兹波谱系统, 对比了这两种不同周期数的牛眼结构的太赫兹时域信号和频域信号. 实验结果显示, 0.1~2.7 THz 宽频太赫兹参考信号可以被两种不同周期数的牛眼结构滤成窄带信号, 中心峰值均在约 0.53 THz 处, 在该值处, 5 个圆环凹槽的透射率约为 55.7%, 15 个圆环凹槽的透射率约为 68.3%, 1 THz 以上高频信号都被基本滤除, 小周期数样品与大周期数样品太赫兹透射谱信号带宽与幅值的差别主要是由于周期性展开不足及边缘泄漏所引起. 本文利用伪表面等离子理论解释了滤波效果, 并通过有限元方法模拟仿真了宽频太赫兹信号通过不同周期数的牛眼结构后的样品信号, 模拟结果与实验结果符合得较好, 证实了不同周期数的牛眼结构对太赫兹电磁波的增透效应是不同的.

关键词:超快光学; 牛眼结构; 时域太赫兹波谱系统; 伪表面等离子; 有限元

中图分类号: O433.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)10-1156-5

0 引言

太赫兹(Terahertz, THz)波是介于微波和红外波之间的电磁波, 由于它即具有微波的穿透性又具有红外波的解像度, 因此在信息科学、生物学、医学、天文学、环境科学等学科领域有着重要的应用价值^[1]. 随着太赫兹波产生、传播、接收、测量等技术的不断发展, 使得太赫兹波得到广泛研究. 自从 1998 年 Ebbesen 等人在 Nature 上发表了在金属薄膜上制作亚波长纳米孔阵列可以实现特定波长的光波选择性透射之后^[2], 该现象引起了广泛关注和重视^[3-4], 各国学者、研究人员在此基础上开展了各类工作^[5-9], Pendry 等人理论上证实了伪等离子模式的存在, 并且实验上发现伪等离子体的强度随其在表面上传播的距离而指数衰减^[6]. 2002 年, Thio 等人报道了牛眼结构也具有类似的超强透射现象, 并且通过改变牛眼不同结构参量, 得到不同的透射信号^[7]. 之后, Degiron 实验对比分析了单面牛眼结构和双面牛眼结构的透射信号^[8]. 在太赫兹波段, 牛眼结构的透射增强效应也得到很大关注^[10-11].

以往关于牛眼结构的研究主要集中在可见光波

段和近红外波段, 太赫兹波段的研究较少^[12-13], 并且以往研究的关于太赫兹波段的牛眼结构只是分析其透射谱的时域特性和产生机理, 对其频域增强特性的研究不多, 而针对不同圆环凹槽数量的牛眼结构的透射增强效应的研究还未见报道. 本文是在铝板上制作不同周期数的样品, 利用时域太赫兹波谱系统对其进行表征发现, 0.1~2.7 THz 的带宽参考信号, 经过不同周期数的样品后能够滤出窄带信号. 利用伪表面等离子理论解释了滤波效果, 并通过有限元方法进行了模拟仿真. 本文明示了周期数对太赫兹增透效应的影响, 为进一步拓展牛眼结构在太赫兹波普技术中的应用, 提供了坚实的理论和实验基础.

1 实验部分

实验所用样品是通过刨床进行铝片的表面精加工, 用高准确度钻孔机在铝板中心位置钻孔, 用铣刀以中心孔为圆心加工同心圆形槽的微机械加工方法制得, 样品材料是铝, 因为在太赫兹波段铝近似为理想导体 (Perfect Electric Conductor, PEC), 它本身是不能被激发形成表面等离子波的, 但是表面做一

基金项目:国家自然科学基金(No. 61007059, No. 11174207, No. 61138001)、上海市自然科学基金(No. 11ZR1425000)、国家重大仪器科学专项基金(No. 2011YQ150021)和上海市重点学科项目第三期项目(No. S30502)资助

第一作者:高春梅(1985-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹器件. Email: rouyueheyang@yahoo.cn

通讯作者:朱亦鸣(1979-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为太赫兹波谱系统、超快光学、微结构光伏材料. Email: ymzhu@usst.edu.cn

收稿日期:2012-03-13; **修回日期:**2012-07-13

些特殊的微结构,则可以形成伪表面等离子波,形成的伪表面等离子波可以产生透射增强效应^[14].图1(a)是牛眼结构参量示意图,铝板厚度 t 为0.25 mm,牛眼结构的中心孔直径 g 为0.3 mm,凹槽的周期 p 为0.6 mm,凹槽的宽度 l 为0.3 mm,凹槽的深度 h 为0.06 mm;图1(b)~(e)均为扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)拍摄,(b)小样品牛眼结构,6 mm×6 mm的铝板上制作5个圆环凹槽;(c)大样品牛眼结构,40 mm×40 mm的铝板上制作15个圆环凹槽,并在结构边缘留空;(d)为小样品倾斜45°放置,灯光垂直照射的局部照片;(e)为大样品倾斜45°放置,灯光垂直照射的局部照片.

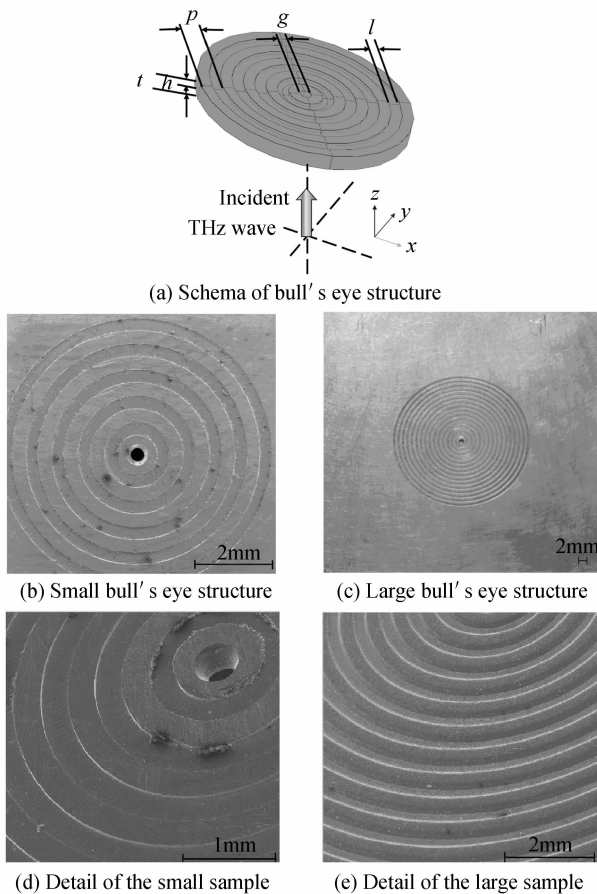


图1 牛眼结构示意图及牛眼结构样品图

Fig.1 Schema and SEM images of the bull's eyes

本文中,太赫兹时域波谱系统用于探测太赫兹波通过牛眼结构的透射特性.锁模钛宝石激光器被用于泵浦和探测太赫兹波,中心波长为800 nm,带半宽高约11 nm,脉冲持续时间约80 fs,重复频率76 MHz,输出功率1.1 W.激光被分束镜分为泵浦光和探测光.泵浦光经由斩波器调制后聚焦在碲化镓电导天线上.光生载流子被电场加速后发射出太赫兹波^[15-16].太赫兹波通过两个离轴抛物面镜被聚焦在样品上.通过样品后,太赫兹波信息又被另外两

个离轴抛物面镜聚焦在碲化锌电光晶体上,并与探测光重合.自由空间电光采样技术被用来记录瞬时太赫兹波形.实验中所采用的电光晶体为0.7 mm厚,110切面的碲化锌晶体.太赫兹截止频率(约3 THz)由电光晶体的厚度和飞秒激光脉冲持续时间决定.为了避免水蒸气对太赫兹信号的吸收,氮气被充入覆盖太赫兹时域系统的盒子内,盒子内的湿度小于8%,实验时温度控制在23.5 °C到24.5 °C.

2 实验结果

在实验中,首先测量不加样品的情况下太赫兹在空气中的参考信号的时域和频域特性.太赫兹时域参考信号和大小尺寸样品信号及其相对应的频域信号如图2所示.

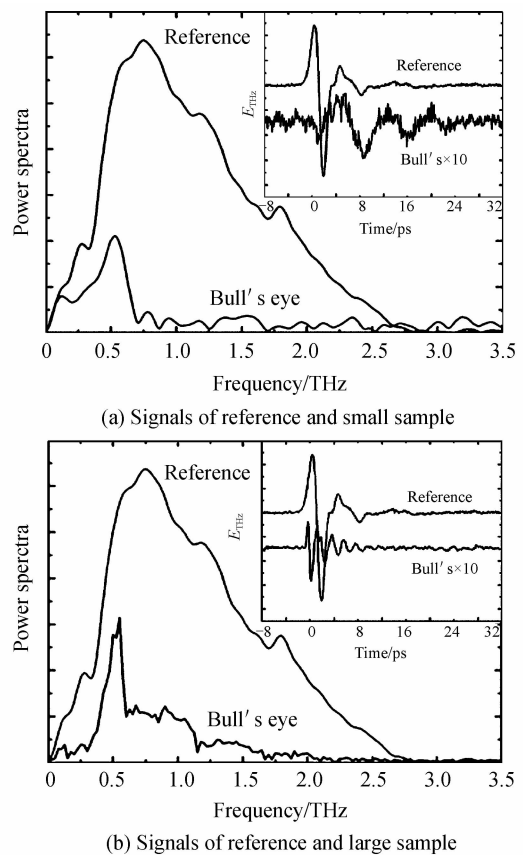


图2 频域参考信号与样品信号谱图(插图为频域对应的时域谱图)

Fig.2 Signals of reference and samples in frequency domain(insert figure is time domain)

图2(a)插图是时域参考信号(Reference),小样品时域信号(Bull's×10).图(b)插图是时域参考信号(Reference),大样品时域信号(Bull's×10),可以看出无论是小样品还是大样品,样品信号与参考信号相比都有明显的延时,说明探测信号打在样品上时,不能直接穿过样品,而是以形成伪表面等离子波的形式传播,因此造成延时.图2(a)是频域参考信号(Reference),小样品频域信号(Bull's eye).图(b)

是频域参考信号 (Reference), 大样品频域信号 (Bull's eye), 可以看出参考信号从 0.1 THz 到 2.7 THz, 无论是小样品还是大样品, 主峰都在 0.53 THz 左右, 且 1 THz 以上高频信号基本都被滤除. 大样品比小样品主峰更高, 更窄. 大样品在透射增强频率约 (0.53 THz) 处的参考信号和透过样品后信号的归一化幅值分别为 (0.648 4 和 0.442 7), 其透过率为 68.3%. 同样, 小样品在透射增强频率约 (0.53 THz) 处的参考信号和透过样品后信号的归一化幅值分别为 (0.524 7 和 0.292 4) 其透过率为 55.7%.

3 理论分析

表面等离子激元^[17]可以被入射电磁场和金属表面自由电子谐振激发. 然而, 事实上由于表面等离子激元波矢 k_{sp} 在光色散曲线的下方而不能产生, 这意味着这种模式是倏逝的^[18], 因此不能被入射光直接激发. 需要动量 G 使入射光波矢 k_{inc} 低于倏逝区域而满足动量匹配, 这样表面等离子激元可以在金属表面传递. 一个简单的提供动量 G , 使入射光耦合产生表面等离子激元的方法是制作周期性结构, 这样激励出的表面等离子波称为伪表面等离子波^[19], 也就是说表面等离子激元是入射电磁波通过棱镜或光栅耦合的形式, 与空气-金属界面上的自由电子相互作用, 谐振激发产生的. 而在太赫兹频段, 由于金属近似成为理想导体, 无法产生类似的谐振, 也就是说无法激发表面等离子激元. 但如果将金属表面做成周期性微结构去模拟上述谐振, 就可以产生类似于表面等离子波的伪表面等离子波 (Spoof Surface Plasmon, SSP). 在二维空间, G 被分为沿着 x 方向 G_x 和 y 方向 G_y , 且 G 都为 $2\pi/a_0$ 的整数倍, 其中 a_0 为结构的周期. 当入射角为 θ 时, 可以得到

$$k_{sp} = k_{inc} + i \times G_x + j \times G_y = k_0 \sin \theta + (i + j) \frac{2\pi}{a_0} \quad (i, j = 1, 2, 3 \dots) \quad (1)$$

由于牛眼结构是中心对称结构, $i = j$, 式 (1) 可以简化为

$$k_{sp} = k_0 \sin \theta + \frac{4\pi}{a_0} i \quad (i = 1, 2, 3 \dots) \quad (2)$$

周期性金属结构提供了额外的动量使太赫兹波可以被耦合, 转变成伪表面等离子激元. 当太赫兹波入射到金属表面时, 透射过程可以被分成三步: 太赫兹波在入射表面耦合成伪表面等离子激元; 伪表面等离子激元在金属表面传递, 并从中心孔传递到背面; 伪表面等离子激元在背面重新耦合成电磁波的形式继续辐射. 由上所述, 金属表面的结构决定了只

有特定频率的电磁波才可以通过金属板.

伪表面等离子激元在金属表面的传递速度 v_{SSPs} 可以表示为

$$v_{SSPs} = \sqrt{\frac{\epsilon_d + \epsilon_m}{\epsilon_d \epsilon_m}} c \approx c \quad (3)$$

用 Drude 模型定义在太赫兹波段真空和金属介电常量分别为 $\epsilon_d = 1$, $\epsilon_m = -5.1069 \times 10^4 + i \times 1.2061 \times 10^6$. 可以看出, 由于金属介电常量远远大于真空介电常量, 伪表面等离子激元在金属表面传递的速度约等于光速. 考虑样品结构周期为 0.6 mm, 伪表面等离子激元从一凹槽传递到相邻凹槽的时间约为 2 ps, 所以透射信号的周期应该与这一时间一致. 这点与实验观察到的大样品时域信号中主脉冲后透射信号振荡周期相符.

为了定量分析图 2(a) 和 (b) 的滤波现象, 本文通过有限元方法求解时谐麦克斯韦方程. 设频率为 ω 的时谐电场 $E_t = E \exp(-i\omega t)$, 麦克斯韦方程可以被写成

$$\begin{cases} \left(\nabla \times \frac{1}{\mu} \right) \cdot (\nabla \times E) - \omega^2 \epsilon E = 0 \\ \nabla (\epsilon E) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

散射场可以通过总电场减去入射场 E_{inc} 计算得到, 则散射场 $E_{sc} = E - E_{inc} = E_{refl} + E_{trans}$, 其中 E_{refl} 和 E_{trans} 分别表示反射电场和透射电场. 通过雅克比矩阵 J 变换, 散射场在柱坐标 (r, y, ϕ) 中可以写成

$$\begin{cases} \left(\nabla \times \frac{1}{\mu^*} \right) \cdot (\nabla \times E_{sc}^*) - \omega^2 \epsilon^* E_{sc}^* = 0 \\ \nabla (\epsilon^* E_{sc}^*) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中上标 * 代表物理量在柱坐标下的表达式. 对散射场 $E_{sc}^* = J E_{sc}$ 进行傅里叶级数展开

$$E_{sc}^*(r, y, \phi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e_{sc,n}^*(r, y) \exp(in\phi) \quad (6)$$

通过方程 (6)、(5) 变成二维问题^[20]

$$\left(\nabla \times \frac{1}{\mu^*} \right) \cdot (\nabla \times e_{sc,n}^*) - \omega^2 \epsilon^* e_{sc,n}^* = 0 \quad (7)$$

通过求解式 (7) 就可以得到总的散射场的场强分布. 图 3 为理论计算结果及其与大小样品对比. 仿真中入射光的宽度 (以 1 THz 为例) 与小尺寸样品宽度基本一致, 为 6 mm. 从图 3 插图有限元方法理论仿真图可以看出从下方入射的光被耦合成伪表面等离子激元, 在微纳结构的边角处产生较强的局部伪等离子, 并在结构的另一半重新耦合成光的形式传递出去, 且太赫兹波的辐射角明显变小. 图 3 是理论结果与实验结果的对比, 三个结果的峰值位置都在 0.53 THz 左右. 可以看出大样品与理论仿真结果更接近, 而小样品带宽更宽, 幅值偏小. 这主要由于我们的太赫兹源是一个偶极子源, 高频信号在中心

区域,低频信号发散的分布在周围,小尺寸样品的大小与太赫兹波的束腰半径接近,部分低频的信号会从小尺寸样品结构的边缘直接通过,造成这部分低频信号与经过样品真正滤出的信号进行了叠加.本文计算过,0.4 THz 以下低频信号都可能会直接从结构边缘通过.

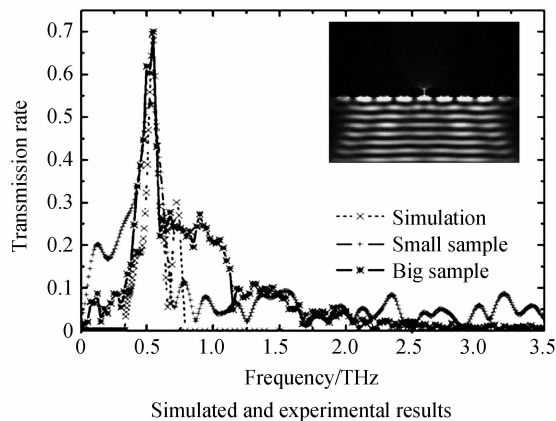


图3 有限元方法理论仿真结果及其与实验结果对比(插图有限元方法理论仿真图)

Fig. 3 Results of simulation with finite element method and comparison between simulated and experimental results(insert figure is simulated results of small sample by finite element method)

从图3的实验数据中还可以看出小样品低频信号(0.2~0.4 THz)明显高于大样品信号和仿真信号.在模拟时为了防止计算区域边界的反射,我们在样品结构周围加了理想匹配层(Perfectly Matching Layer, PML),这就使得样品结构被认为无限延伸,波不可能从结构边缘泄漏过去,与小尺寸样品实验有些区别.又因为小尺寸样品只有5个周期,延展不足,相对于大尺寸样品15个周期少很多,对太赫兹波耦合成伪表面等离子体激发造成影响.以上两个因素对大尺寸样品影响没有那么严重,所以大尺寸样品的实验结果与模拟结果更接近.

4 结论

本文在金属铝板上制作了两个不同大小的牛眼结构,分别为5个和15个圆环凹槽,并利用时域太赫兹系统观察了太赫兹信号透过样品后的结果.0.1~2.7 THz宽带的参考信号经过样品后都产生滤波效果,峰值都在0.53 THz左右,1 THz以上高频信号基本都被截止滤除.大样品与小样品的频域信号相比幅值更高、带宽更窄,主要由于小样品结构周期性展开不足以及边缘泄漏导致的.本文利用伪表面等离子体理论解释了滤波现象,并采用有限元方法理论上模拟仿真了太赫兹波入射样品后的透过率情况,仿真结果与实验结果匹配较好,证明了不同周期数的牛眼结构对太赫兹具有不同的增透效应.

参考文献

- [1] WANG Shao-hong, XU Jing-zhou, WANG Li, *et al.* Applications and prospects of terahertz technology [J]. *Physics*, 2001, **30**(10): 612-615.
王少宏,许景周,汪力,等. THz技术的应用及展望[J]. *物理*, 2001, **30**(10):612-615.
- [2] 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.
- [3] GRUPP D E, LEZEC H J, EBBESEN T W, *et al.* Crucial role of metal surface in enhanced transmission through subwavelength apertures[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, **77**(11): 1569-1571.
- [4] 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.
- [5] ZHAO Wei, ZHAO Xiao-peng. Relationship of surface plasmon polaritons and nanoparticles morphology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 556-560.
赵炜,赵晓鹏. 纳米粒子形貌与表面等离子体激元关系 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(4): 556-560.
- [6] PENDRY J B, MARTIN-MORENO L, GARCIA-VIDAL F J. Mimicking surface plasmons with structured surfaces[J]. *Science*, 2004, **305**(5685): 847-848.
- [7] THIO T, LEZEC H J, EBBESEN T W, *et al.* Giant optical transmission of sub-wavelength apertures: physics and applications[J]. *Nanotechnology*, 2002, **13**(3): 429-432.
- [8] DEGIRON A, EBBESEN T W. Analysis of the transmission process through single apertures surrounded by periodic corrugations[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(16): 3694-3700.
- [9] ZHANG Yang-yang, ZHU Fang-ming, SHEN Lin-fang, *et al.* Terahertz surface plasmon polaritons on metal surfaces corrugated by shallowly dielectric-filled grooves [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(4): 389-393.
张羊羊,朱方明,沈林放,等. 介质填充浅槽周期结构表面上的太赫兹表面等离子体激元[J]. *光子学报*, 2012, **41**(4): 389-393.
- [10] HENDRY E, GARCIA-VIDAL F J, MARTIN-MORENO L, *et al.* Optical control over surface-plasmon-polariton-assisted THz transmission through a slit aperture [J]. *Physical Review Letters*, 2008, **100**(12): 123901(1-4).
- [11] AGRAWAL A, NATATA A. Coupling terahertz radiation onto a metal wire using a subwavelength coaxial aperture [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(14): 9022-9028.
- [12] FLAMMER P D, SCHICK I C, HOLLINGSWORTH R E. Interference and resonant cavity effects explain enhanced transmission through subwavelength apertures in thin metal films[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(13): 7984-7993.
- [13] MAHBOUB O, PALACIOS S C, GENET C, *et al.* Optimization of bull's eye structures for transmission enhancement[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(11): 11292-11299.
- [14] AGRAWAL A, CAO Hua, NATATA A. Time-domain analysis of enhanced transmission through a single subwavelength aperture[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(9): 3535-3542.
- [15] ZHU Yi-ming, UNUMA T, SHIBATA K, *et al.* Power dissipation spectra and terahertz intervalley transfer gain in bulk GaAs under high electric fields[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(23): 232102(1-3).
- [16] NI Zheng-ji, CHEN Lin, WANG Shu-ling, *et al.* Electrons intervalley transfer gain in bulk GaAs[J]. *Chinese Journal*

- of Lasers*, 2010, **37**(3): 658-662.
- 倪争技, 陈麟, 王淑玲, 等. 砷化镓内电子谷间散射引起的增益[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 658-662.
- [17] BARNES W L, DEREUX A, EBBESEN T W. Surface plasmon subwavelength optics [J]. *Nature*, 2003, **424** (6950): 824-830.
- [18] RAETHER H. Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1988.
- [19] GENET C, EBBESEN T W. Light in tiny holes [J]. *Nature*, 2007, **445**(7123): 39-46.
- [20] SVEN B, BERND H K, LIN Z, *et al.* Finite-element simulations of light propagation through circular subwavelength apertures[C]. *SPIE*, 2009, **7366**: 736621(1-8).

Comparison on Terahertz Transmission Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons Between Bull's Eye Structures with Different Ring Grooves

GAO Chun-mei, CHEN Lin, XIE Le, PENG Yan, CHEN Ke-jian, CAI Bin, ZHU Yi-ming
(*Optoelectronic Information Research Institute; Shanghai Key Lab of Modern Optical System; Engineering Research Center of Optical Instrument and System (Ministry of Education), University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*)

Abstract: To study the effect of different circular groove numbers of bull's eye structures on the enhanced transmission in terahertz region, two bull's eye samples were fabricated with five circular grooves and fifteen circular grooves on aluminum slabs, respectively. Transmitted terahertz signals from two bull's eye samples were obtained by using terahertz time-domain spectroscopy. Experimental results show that for both samples, broad-band terahertz reference signal from 0.1 THz to 2.7 THz was filtered to be narrow-band signal, the center peak was at 0.53 THz, the transmission efficiency can reach 55.7% by five circular grooves and 68.3% by fifteen circular grooves through the center holes respectively. The differences on band widths and amplitudes of transmitted terahertz signals from small sample and big sample with different circular groove numbers come from insufficient periodical extension and leakage from edge of structure. Furthermore, spoof surface plasmon polaritons theory was employed to analyze filter phenomena of transmitted signals from different size bull's eye structures with the help of finite element method. The simulated results agree well with the experimental results, both proved that the circular groove numbers can affect the enhancement of the transmission in terahertz region.

Key words: Ultrafast optics; Bull's eye; Terahertz time-domain spectroscopy; Spoof surface plasmon polaritons; Finite element method