

doi: 10.3788/gzxb20124108.0888

亚波长金属块阵列中太赫兹波的传输特性研究

孔辉¹, 李高芳¹, 马国宏¹, 胡淑红², 戴宁²

(1 上海大学 理学院 物理系, 上海 200444)

(2 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

摘要:利用太赫兹时域光谱技术,研究了亚波长金属块阵列的太赫兹透射光谱特性及金属阵列结构的周期、金属块尺寸等因素对太赫兹透射特性的影响.结合时域有限差分方法,对实验结果进行了数值模拟,并分析了影响太赫兹透射的因素.结果表明:亚波长金属块阵列结构中,THz波的透射极小的位置由金属块的尺寸和周期决定,其透射谷的半高宽随其周期的增大而减小;透射峰值的位置由阵列的周期结构决定,其频率随周期的增加而减小;亚波长金属块结构的透射极小来源于金属块表面局域化电场等离子体的本征频率反射,该局域化电场与金属块结构密切相关,通过改变金属块结构,可以改变其表面电场分布与局域化.研究结果为研制太赫兹波段带阻滤波器提供了有益的参考.

关键词:太赫兹;亚波长微结构;表面等离子体共振

中图分类号:O436.2

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2012)08-0888-5

0 引言

太赫兹科学与技术是近 20 年来由于自由电子激光器和超快激光技术的迅速发展而新兴的一门学科.太赫兹波技术进一步拓展了研究微观世界的方法和手段,在成像、医学诊断、环境科学、信息通信、生物化学及基础物理等研究领域有着广阔的应用前景.而目前太赫兹波段还不像其他波段发展那样成熟,相关的器件也在发展之中,这严重制约了太赫兹技术应用的进一步发展.随着太赫兹技术的发展,设计和制作太赫兹波段的传输和控制器件也变得越来越迫切,而以太赫兹亚波长微结构作为基础的器件研究是一个重要的研究方向.自从 1998 年 Ebbesen 等人发现了二维亚波长小孔阵列可以产生增强透射效应后,就吸引了人们对增强透射的研究.不仅仅涉及有关物理机制的研究,并且在近场光学、光电集成、纳米印刷、成像显示和有机发光二极管等方面展开了广泛而深入的探索.亚波长光学一直都是研究的一个热点,文献[1-7]运用大量的实验和理论分析讨论了增强透射效应.

亚波长金属块阵列和金属孔阵列属于共轭结构.和亚波长小孔阵列相反,当具有一定频率的电磁波入射到亚波长金属块阵列时,由于激发了偶极子

局域化表面等离子体(Dipole Localized Surface Plasmons, DLSPs)^[8-9]引起了对入射电磁波的共振反射.在入射电磁波的电场的作用下,金属块可以被极化,诱导出偶极子,从而产生偶极子局域化表面等离子体. DLSPs 导致电场的局域化和场的增强效应,可以用来制作光学天线^[10-21].与光波段相比,在太赫兹波段是一个特殊的电磁波波段,表面等离子体在该频段显示出了一些非常特殊的性质^[3-7].

目前太赫兹波段亚波长金属块阵列的国内外研究较少.本文利用了太赫兹时域光谱技术研究了亚波长金属块阵列的透射性质,以及周期和金属块尺寸对透射的影响.通过太赫兹波与亚波长金属块阵列的相互作用的研究,为制作太赫兹波段的带阻滤波器件提供了有益的参考.

1 实验

1.1 亚波长金属块阵列的制备

研究样品是利用磁控溅射的方法在洁净的熔融石英基片上沉积的铝膜.熔融石英衬底厚度为 1 mm,铝膜厚度为(200±10) nm.太赫兹波段的电磁波在金属铝膜的趋附深度在约为 110 nm 左右,200 nm 的薄膜可以完全阻止太赫兹波透射.经过实验测量,200 nm 铝膜太赫兹的透射为零.对于制作

基金项目:国家自然科学基金(No. 11174195)、上海科委应用基础研究计划(No. 09530501100)和中科院红外物理国家重点实验室资助

第一作者:孔辉(1988—),男,硕士研究生,主要研究方向为太赫兹波段光谱分析和器件. Email: konghui0607@shu.edu.cn

责任作者/导师(通讯作者):马国宏(1969—),男,教授,主要研究方向为超快光子学、光与物质相互作用的超快过程.

Email: ghma@staff.shu.edu.cn

收稿日期:2012-01-04; **修回日期:**2012-02-10

好的铝膜,采用光刻的方法进行处理,通过衬底的预处理、涂胶、前烘、曝光、显影、后烘、刻蚀、除胶等一系列工艺制备出设计的亚波长微结构.最后制作的金属块阵列结构样品如图 1(a).

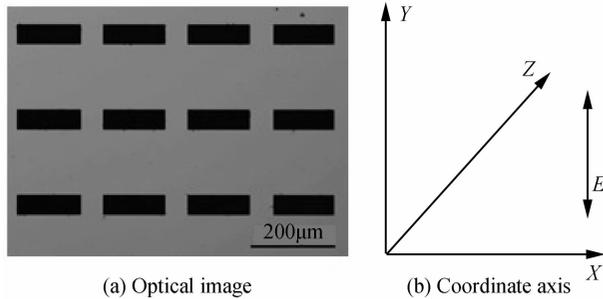


图 1 $150\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$ 金属块阵列(周期 $200\ \mu\text{m}$)显微镜成像及坐标选取示意图

Fig. 1 Optical image of the metallic stripe arrays with a rectangular structure of $150\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$ and period of $200\ \mu\text{m}$ on fused silica substrate; the polarization of normal incident THz wave is perpendicular to the long edge of the stripes (along x -axis)

制备的样品分为 2 个系列:第一类样品,金属块的形状($150\times 50\ \mu\text{m}^2$)保持不变,改变金属块周期(两方向周期相同),样品周期分别为 $180\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m}$ 和 $220\ \mu\text{m}$;第二类样品周期为 $200\ \mu\text{m}$ 保持不变,金属块的尺寸分别为 $50\times 50\ \mu\text{m}^2$ 、 $100\times 50\ \mu\text{m}^2$ 和 $150\times 50\ \mu\text{m}^2$.光刻工艺过程中产生的误差为 $\pm 2\ \mu\text{m}$ 左右.

1.2 亚波长金属块阵列太赫兹时域光谱测量

透射谱测试是采用 EKSPLA 公司生产的透射式太赫兹时域光谱(Terahertz Time-domain Spectroscopy, THz-TDS)系统,系统所使用的飞秒光源是 Spectra Physics 公司生产的掺钛蓝宝石振荡器(Mai Tai HP),其产生的激光是中心波长为 $800\ \text{nm}$,重复频率为 $80\ \text{MHz}$,脉宽为 $100\ \text{fs}$ 的飞秒脉冲.飞秒脉冲通过分束器后分成能量为 $35\ \text{mW}$ 的泵浦光和 $30\ \text{mW}$ 探测光.其中泵浦光用来激发 THz 波发射器,经过一光学延迟线后的探测光用来触发太赫兹波探测器,得到太赫兹波的时域谱.发射器和探测器都是由低温生长的 GaAs 制成的光电导天线.实验中,为太赫兹发射器提供了一个约 $45\ \text{V}$ 的直流偏压,产生的太赫兹波经过硅透镜后被一对聚乙烯透镜聚焦和准直,通过样品后聚焦到探测器上.改变泵浦光和探测光的相对时间延迟,可以分别获得石英基片和样品的时域谱.通过傅里叶变换,可以得到样品在太赫兹波段的透射谱.

$$T(\omega) = \frac{E_{\text{Transmitted}}(\omega)}{E_{\text{Reference}}(\omega)} \quad (1)$$

式中 $E_{\text{Transmitted}}(\omega)$ 代表透过金属亚波长结构的太赫

兹电场, $E_{\text{Reference}}(\omega)$ 代表透过未镀膜基底的太赫兹电场.在对样品进行检测时,入射光垂直于样品表面,太赫兹波的偏振方向垂直于金属块较长的一边即($E\perp x$),称为 P 偏振.对于 S 偏振的情况而言,透过率整体不高.为了方便说明,所选取的坐标轴如图 1(b).

2 实验结果及讨论

2.1 金属块阵列周期对太赫兹波透射特性的影响

图 2 给出了正入射情况下,尺寸为 $150\times 50\ \mu\text{m}^2$,周期分别为 $160\ \mu\text{m}$ 、 $180\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m}$ 、 $220\ \mu\text{m}$ 和 $240\ \mu\text{m}$ 的金属块阵列太赫兹振幅的透射谱.可以清楚地看到,在 $0.2\sim 1.2\ \text{THz}$ 频谱范围内,金属块阵列的 THz 透射谱由一个占主导的透射谷和一个透射峰值组成.对于周期为 $220\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m}$ 和 $180\ \mu\text{m}$ 三种结构所对应的 THz 透射峰的位置分别位于 0.7 、 0.76 和 $0.85\ \text{THz}$.这个透射极大值的频率可以借用瑞利异常的公式来描述,即

$$\lambda_{\text{R}} = \frac{L}{m} (n \pm \sin \theta) \quad (2)$$

式中, L 为金属块的周期, n 为衬底的折射率(在 THz 波段,石英的 $n=1.95^{[21]}$),取 $\theta=0$ 和 $m=1$,即正入射情况下最低阶的瑞利波长.根据式(2),这种透射的极大值位置和样品的周期有关.实验中系统分辨率为 $0.0293\ \text{THz}$,三个样品透射谱的最大值位置与式(2)的计算结果完全一致.三个样品的透射极小位置都在 $0.6\ \text{THz}$ 左右,随着金属块周期的增加,可以看到透射极小的位置也出现了大约 $0.04\ \text{THz}$ (从 $0.64\sim 0.6\ \text{THz}$)的频移.透射极小来源于入射电磁波激发了亚波长金属块结构的电偶极子,从而产生了强烈的偶极子共振耦合^[9],结果导致入射电磁波被共振反射,从而形成一个透射谷.当周期增大时,由于亚波长金属块阵列密度的减小以及相邻金属块的 DLSP 直接耦合作用的减小,引起了透射谷频率的微小移动.其中,相邻金属块之间的 DLSPs 占主要作用.当周期是入射电磁波半波长量级时,金属块之间的距离变化造成了偶极子场的相位失配,从而形成了随着周期的增大而产生频率的红移^[10-12].透射谱半高宽也随着周期的增大而呈现出减小的趋势,周期为 $220\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m}$ 和 $180\ \mu\text{m}$ 三种结构,其透射谷的半高宽分别为 0.15 、 0.12 和 $0.07\ \text{THz}$.此外,利用时域有限差分法的数值模拟对实验结果进行了对比.模拟中采用的是三维模型,在 x 和 y 两个方向上采用的是周期性的边界条件, z 方向上采用完全匹配层(Perfectly Matched Layer, PML)边界条件.相对于可见光波段,金属 Al

在太赫兹波段的介电常量非常大 ($-3.4 \times 10^4 + 2.2 \times 10^6 i$), 可以看作是理想导体 (Perfect Electric Conductor, PEC) 来处理. 因此, 在计算中将金属 Al 用 PEC 代替, 实践也证明这种近似是可取的. FDTD 数值模拟的分辨率为 0.008 THz , 所得到的结果与实验符合得很好 (图 2), 无论是峰的形状还是峰的位置. 模拟结果与实验结果的出入主要有两点: 一是实验上透过率极小值要比模拟结果高一些, 原因可能是太赫兹光谱分辨率没有达到足够高, 也有可能是制作过程中某些周期性金属块刻蚀程度偏大所导致的; 二是谷值点频率有微小差别, 这是由于制作过程中某些区域周期不均匀所造成的.

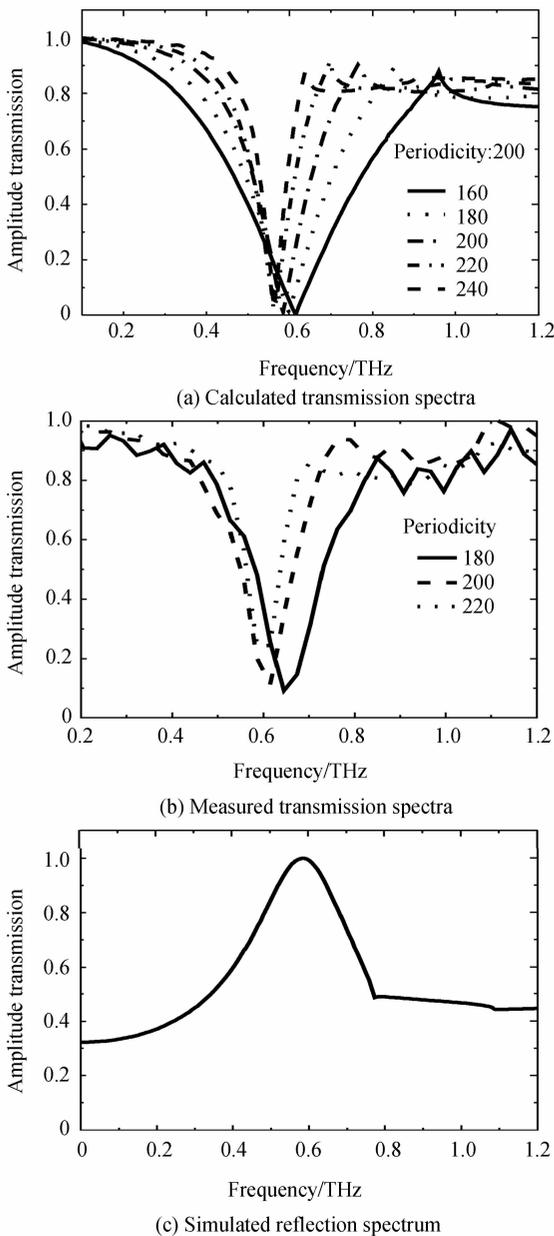


图 2 尺寸为 $150 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 、不同周期的金属块阵列的 FDTD 模拟

Fig. 2 Calculated results of metal stripe structures $150 \times 150 \mu\text{m}^2$ on fused silica substrate with different period using FDTD

为了说明透射谷来源于亚波长金属块结构对入射电磁波的共振反射, 而不是共振吸收, 模拟了一个结构 ($150 \times 50 \mu\text{m}$, 周期 $200 \mu\text{m}$) 的 THz 反射谱, 结果如图 2(c) 所示. 可以清楚看到, 与透射谷相对应, 其反射谱给出一个反射峰, 而且其反射峰的频率与宽度与透射谷相一致. 这证明, 透射极谷源于亚波长金属块对入射 THz 波的共振反射所致.

2.2 金属块阵列形状对太赫兹波透射特性的影响

为了进一步研究影响透射谱的物理因素, 首先利用 FDTD 方法模拟了五组尺寸的金属块阵列, 其 x 和 y 方向的周期保持 $d = 200 \mu\text{m}$ 不变, 金属块尺寸分别为: $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ 、 $100 \times 50 \mu\text{m}^2$ 、 $120 \times 50 \mu\text{m}^2$ 、 $150 \times 50 \mu\text{m}^2$ 和 $180 \times 50 \mu\text{m}^2$. 实验制备了其中三种尺寸结构, $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ 、 $100 \times 50 \mu\text{m}^2$ 和 $150 \times 50 \mu\text{m}^2$. TDs 测试中, 入射波的偏振方向仍然保持与金属块的长边垂直, 在正入射情况下, 测得太赫兹波的零阶透射谱如图 3. 样品 $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ 出现了基本全透. 样品 $100 \times 50 \mu\text{m}^2$ 的透射谷位置在 0.61 THz , 而样品 $150 \times 50 \mu\text{m}^2$ 的透射谷位置在 0.73 THz . 随着样品 x 轴方向尺寸的增加可以看到共振谷位置也出现了大约 0.12 THz 的偏移. 此外, 透射的半高宽也随着金属块尺寸的增大有增大的趋

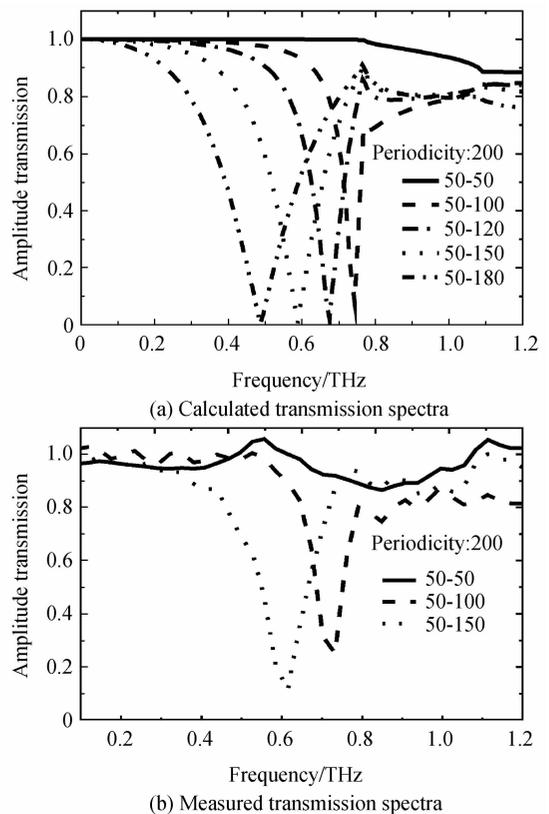


图 3 周期为 $200 \mu\text{m}$ 、不同尺寸金属块阵列的 FDTD 模拟

Fig. 3 Calculated results of metal stripe structure on fused silica substrate in period of $200 \mu\text{m}$ with different shapes using FDTD

势.这主要是因为金属块中与其形状依赖的电荷分布造成的.结果表明,亚波长微结构的形状对 THz 波的透射特性具有重要的影响,通过改变金属块的形状可以得到具有不同中心频率和带宽的带阻滤波器.

为了研究共振波长处金属块表面的电场分布,利用 FDTD 数值模拟了其中一个样品在透射极小(共振频率为 0.61 THz)和透射极大值的频率处电场分布.从图 4(a)可以看到电场强度在金属块边缘的分布是各向异性的.从图 4(a)可以清楚地看到在水平方向(x 轴方向),场强的分布具有典型的波导模式;在垂直方向(y 轴方向),场强集中于金属的边缘,越往中间场强越弱,呈指数衰减分布,这是典型的 DLSPs 性质.场强被局域在金属块的四周,从而使得该频率处透射出现极小.对于 0.77 THz 处(图 4(b)),可以看到,对于此频率激发下,金属块表面电场很弱.从其透射谱上可以看到,对于入射频率为 0.77 THz 的电磁波,几乎 100% 的通过了金属块阵列结构.这表明没有电场被金属块捕获而产生局域化电场,故此,金属表面电场分布几乎为零.

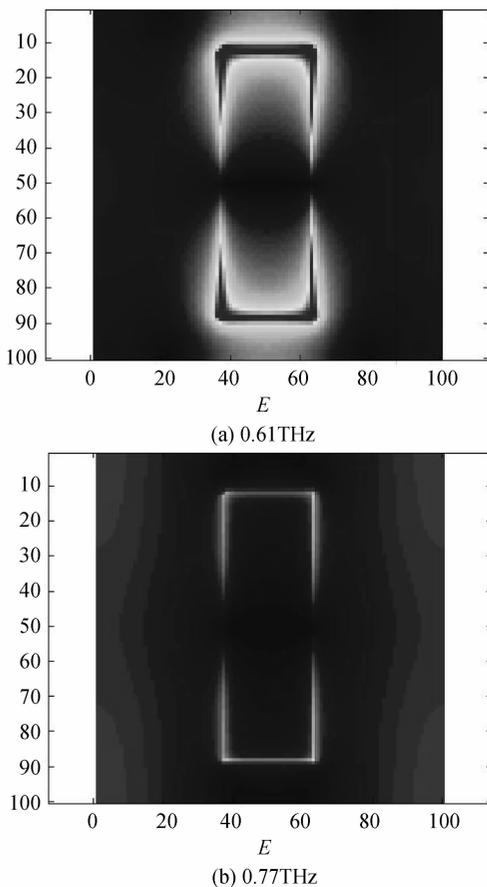


图 4 亚波长金属块阵列在透射谷和透射峰的电场分布图
 Fig. 4 Calculated electric field distribution for the structure of $150 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ with periodicity of $200 \mu\text{m}$ under excitation frequencies at 0.61 THz and 0.77 THz

亚波长金属块阵列结构对入射电磁波的透射特

性主要有两个主要特征:其一是与金属块阵列的周期相关的透射峰;另一个是与金属块形状密切相关的透射谷.透射峰的形成实际上是金属块阵列所构成的二维金属光栅对入射电磁波的反射光谱的相干叠加所导致的.对于一定周期的金属块阵列结构,其反射的电磁波在某些特定频率处出现相干相消,也即某些频率处的抗反射现象,其透射谱即表现出透射极大.在该频率出,电磁波几乎无损耗的透过金属块阵列结构,所以该频率处的电场局域化程度很弱.这一点,可以从 FDTD 模拟的电场分布上很清楚地看出来(图 4(b)).而透射谷的形成源于入射电磁波与金属块的局域化表面等离子体偶极子的耦合结果.在可见光波段,金属纳米微粒的表面等离子体与光电场的强烈耦合导致在金属纳米微粒表面产生极强的局域化电场,这在近场光学和各种非线性光子学的方面得到非常广泛的应用.而在 THz 波段,大多数金属的复介电常量非常大,甚至可以用理想金属来处理.所以,对于具有亚波长尺寸的孤立金属块结构,其对 THz 和远红外,甚至微波等电磁波的局域化行为与可见光波段有所不同.在金属块与 THz 相互作用过程中,金属块可以看成是一个局域化的表面等离子体的偶极子,入射的 THz 电磁波激发了局域化的表面等离子体,而激发的表面等离子体的偶极子辐射出特定频率的电磁波辐射,这一点可以从 FDTD 模拟的反射谱上看出.所以在透射谱上表现出一个具有特定宽度的透射谷.由于入射 THz 波与金属块的局域化表面等离子体共振作用,在金属块表面出现局域化电场分布.这可以从图 4(a)上清楚看出.电场分布表现出明显的各项异性,而且与金属块的尺寸、形状以及入射光的偏振均密切相关.此外,从图 2 还可以看到,透射谷的位置除了取决于金属块尺寸外,还受金属块阵列影响.这表明,金属块之间的相互作用也会影响其局域化的表面等离子体特性.对这些特性的深入理解,有助于发展 THz 近场光学,同时对研制各种 THz 波的光子学器件大有帮助.

3 结论

利用磁控溅射技术和光刻技术,在熔融石英基底上制作了亚波长金属块阵列.利用太赫兹时域光谱技术测试了样品的透射谱,并通过时域有限差分法对实验进行了数值模拟,结果表明:亚波长金属块阵列结构中,THz 波的透射极小的位置由金属块的尺寸和周期决定,其透射谷的半高宽随其周期的增大而减小;透射峰值的位置由阵列的周期结构决定,其频率随周期的增加而减小;亚波长金属块结构的

透射极小来源于金属块表面局域化电场等离子体的本征频率反射,该局域化电场与金属块结构密切相关,通过改变金属块结构,可以改变其表面电场分布与局域化.上述结论为制作太赫兹波段带阻滤波器提供了有益的参考.

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] GORDON R, HUGHES M, LEATHEN B, *et al.* Basis and lattice polarization mechanisms for light transmission through nanohole arrays in a metal film[J]. *Nano Letters*, 2005, **5**(7): 1243-1246.
- [3] MASSON J B, GALLOT G. Coupling between surface plasmons in subwavelength hole arrays[J]. *Physical Review B*, 2006, **73**(12): 121401(1-4).
- [4] LI D, SHU S, LI F, *et al.* Anomalous transmission of terahertz wave through one-dimensional lamellar metallic grating[J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(10-11): 2415-2419.
- [5] LI D, SHU S, LI F, *et al.* Transmitted properties of terahertz wave through metallic hole arrays[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, **9**(s1): 10204-310209.
- [6] LI F, LI D, SHU S, *et al.* Polarized terahertz wave transmission through wire gratings[J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2010, **29**(6): 452-456.
- [7] QU D, GRISCHKOWSKY D, ZHANG W. Terahertz transmission properties of thin, subwavelength metallic hole arrays[J]. *Optics Letters*, 2004, **29**: 896-898.
- [8] KREIBIG U, GENZEL L. Optical absorption of small metallic particles[J]. *Surface Science*, 1985, **156**, Part2(0): 678-700.
- [9] HAYNES C L, MCFARLAND A D, ZHAO L, *et al.* Nanoparticle optics: the importance of radiative dipole coupling in two-dimensional nanoparticle arrays? [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2003, **107**(30): 7337-7342.
- [10] LU X, HAN J G, ZHANG W L. Resonant terahertz reflection of periodic arrays of subwavelength metallic rectangles[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(12): 121103(1-3).
- [11] LAMPRECHT B, SCHIDER G, LECHNER R T, *et al.* Metal nanoparticle gratings: influence of dipolar particle interaction on the plasmon resonance[J]. *Physical Review Letters*, 2000, **84**(20): 4721-4724.
- [12] MEIER M, WOKAUN A, LIAO P F. Enhanced fields on rough surfaces: dipolar interactions among particles of sizes exceeding the Rayleigh limit[J]. *JOSA B*, 1985, **2**(6): 931-949.
- [13] CARRON K T, FLUHR W, MEIER M, *et al.* Resonances of two-dimensional particle gratings in surface-enhanced Raman scattering[J]. *JOSA B*, 1986, **3**(3): 430-440.
- [14] CUBUKCU E, KORT E A, CROZIER K B, *et al.* Plasmonic laser antenna[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(9): 093120(1-3).
- [15] SUNDARAMURTHY A, SCHUCK P J, CONLEY N R, *et al.* Toward nanometer-scale optical photolithography: utilizing the near-field of bowtie optical nanoantennas[J]. *Nano Letters*, 2006, **6**(3): 355-360.
- [16] KOTTMANN J P, MARTIN O J F. Spectral response of plasmon resonant nanoparticles with a non-regular shape[J]. *Optics Express*, 2000, **6**(11): 213-219.
- [17] SU K H, WEI Q H, ZHANG X, *et al.* Interparticle coupling effects on plasmon resonances of nanogold particles[J]. *Nano Letters*, 2003, **3**(8): 1087-1090.
- [18] WEI Q H, SU K H, DURANT S, *et al.* Plasmon resonance of finite one-dimensional Au nanoparticle chains[J]. *Nano Letters*, 2004, **4**(6): 1067-1071.
- [19] SCHIDER G, KRENN J R, HOHENAU A, *et al.* Plasmon dispersion relation of Au and Ag nanowires[J]. *Physical Review B*, 2003, **68**(15): 155427(1-4).
- [20] LIANG Hua-wei, RUAN Shuang-chen, ZHANG Min, *et al.* Study on coupled-mode theory of terahertz wire waveguides[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **39**(2): 202-204.
- [21] XU Ying, CHEN Hai-bin, HONG Zhi. Modeling of the radiation impedance characteristics for photoconductive antenna[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **39**(2): 233-237.
- [22] GRISCHKOWSKY D, KEIDING S, EXTER M V, *et al.* Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors[J]. *JOSA B*, 1990, **7**(20): 2006-2015.

Terahertz Wave Transmission in Subwavelength Metal Stripe

KONG Hui¹, LI Gao-fang¹, MA Guo-hong¹, HU Shu-hong², DAI Ning²

(1 Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

(2 National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Terahertz wave transmission through the subwavelength metallic stripe arrays is investigated by terahertz time domain spectroscopy. A number of factors, including the shape of the metal structures and the periodicity of the arrays, are found to influence terahertz transmission properties. The numerical simulations based on FDTD method show a good agreement with experimental results. The physical origin of impacting transmission is analyzed. The obtained results provide a useful reference for the fabrication of THz band-stop filters.

Key words: Terahertz; Subwavelength structures; Surface plasmon resonance