

doi: 10.3788/gzxb20134209.1061

椭圆金环结构的太赫兹透射增强

孟田华^{1,2}, 赵国忠¹

(1 首都师范大学 物理系, 北京 100048)

(2 山西大同大学 物理与电子科学学院, 山西 大同 037009)

摘要:利用太赫兹时域光谱系统, 测量了 3 种在硅衬底上淀积厚度为 100 nm 金膜的椭圆环阵列结构后, 并且分析了各样品在太赫兹波段的透射增强现象及产生机理. 结果表明: 在整个太赫兹波段, 此组结构样品的透射系数均在 0.68 以上, 产生明显的透射增强; 当太赫兹波的偏振方向与椭圆环长轴之间的夹角为 90° 时, 3 个样品在 1.67 THz 处的共振峰是由于短轴方向的电子形成偶极子振荡与入射太赫兹波进行耦合产生的; 夹角为 0° 时, 周期阵列样品无明显共振峰, 而分形阵列样品的共振峰则不如斑图阵列样品的明显; 样品结构的对称性越差, 透射谱的信息越丰富. 此外, 分析相位差谱也验证了共振增强透射的存在.

关键词:亚波长; 共振峰; 法布里-珀罗效应; 局域共振

中图分类号: O436.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)09-1061-4

Transmission Enhancement of Terahertz Radiation Through the Ellipse Gold Rings Structure

MENG Tian-hua^{1,2}, ZHAO Guo-zhong¹

(1 Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

(2 College of Physics and Electronics, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037009, China)

Abstract: The terahertz time domain spectroscopy technology is used to measure the terahertz spectral of three ellipse gold rings structure which deposited on the silicon substrate by the photolithography technique and the thickness of gold film are about 100 nm. Then the physical mechanism of transmission enhancement through the structures is analyzed. The results show that the transmission coefficients of these structure samples are above 0.7 which suggests the sharp transmission enhancement in THz wave band. When the angle between the THz wave polarization direction and the long axis of elliptic ring is 90° , the resonance peak at 1.67 THz is result from the coupling between the short axis direction of electronic formed dipole oscillation and the incident THz wave. While the angle is 0° , the periodic array sample has not obvious resonance peak, the resonance peak of the patten array sample is obviously than the fractal array sample, the worse symmetry of the samples' structure, the richer information of the transmission spectra. Moreover, the phase differences spectrums are also verify the existence of resonance enhanced transmission.

Key words: Sub-wavelength; Resonance peak; Fabry-Perot (F-P); Localization resonance

0 引言

人工结构的设计具有可设计的电容率和穿透

性, 称之为特异物质^[1-2]. 由于其超强透射现象在各领域的广泛应用^[3-5], 出现了许多周期^[6-9]和非周期^[10-12]的金属结构. 原则上, 特异物质在任意频段具

基金项目:国家自然科学基金(No. 51971094)、北京市自然科学基金(No. KZ201310028032)和北京市教育委员会科技计划重点项目(No. KZ201310028105)资助

第一作者:孟田华(1980—), 女, 讲师, 硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹波段光谱分析和光电子器件. Email: mengtianhua1118@126.com

导师(通讯作者):赵国忠(1964—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为太赫兹光谱和成像以及光电信息功能材料与器件. Email: guozhong-zhao@126.com

收稿日期:2013-01-21; **录用日期:**2013-03-12

备所需的任何电磁波性能,但设计高品质的特异物质仍然具有挑战性^[7-8]. 太赫兹波的波长是 $30\ \mu\text{m} \sim 3\ \text{mm}$, 具备精确控制和制备亚波长结构形状和尺寸的前提. 文献[13]提出和阐述了各种控制 THz 波的方法, 以及旋转孔列的 THz 极化效应, 光谱测度法也表明表面等离子体的激发可使光强增大^[14], 可以通过调整单元形状和周期, 将等离子体频率移到 THz 区域^[15-16]. 研究表明, 影响透射特性的主要因素有结构尺寸、排列方向、形状、晶格常量、膜厚度以及膜接触材料的性质等, 其内在物理机制解释主要有类法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 干涉效应和局域表面等离子体两种解释. 本文设计的亚波长椭圆金环阵列结构结合了周期结构和非周期结构的特点, 透射光谱是它们等离子体效应的叠加结果; 而研究太赫兹光通过此种结构的透射增强性质是表面等离子体光学基础性内容的有益补充, 对研制亚波长表面等离子体器件具有一定的参考价值.

1 实验装置及样品制备

利用属于国家教育部重点实验室的首都师范大

学太赫兹时域光谱系统 (Terahertz Time Domain Spectroscopy System, THz-TDS) 测量样品. 实验时相对湿度控制为低于 4.0% (通过充入氮气实现), 环境温度为 $(21 \pm 0.5)^\circ\text{C}$.

实验样品的制备: 首先用 L-edit 软件画出样品图, 接着利用电子束刻蚀制备掩模板, 最后利用光刻工艺获得硅衬底上镀有金膜的亚波长椭圆分形环阵列结构. 此光刻过程主要由涂胶、曝光、显影、金属化 (淀积) 和剥离 (刻蚀) 这五个步骤组成. 设计样品是用正性光刻胶经显影、刻蚀去胶后将图形转移到硅衬底上凸出来的椭圆金环阵列结构, 分别为 1 号样品 (No. 1) 和 2 号样品 (No. 2) 为了比较分析透射增强机理, 同时也设计了一个 3 号椭圆周期结构样品 (No. 3), 各样品信息如图 1. 其中, 作为衬底的硅片厚度为 0.68 mm; 中心椭圆尺度为 $(a \times b)\ \mu\text{m}$, a 为中心椭圆的长轴, b 为短轴; 椭圆环带宽 $R/\mu\text{m}$; T_x 为沿长轴方向的周期, T_y 为沿短轴方向的周期, 单位 mm, 构成椭圆环的金膜厚度近似为 100 nm.

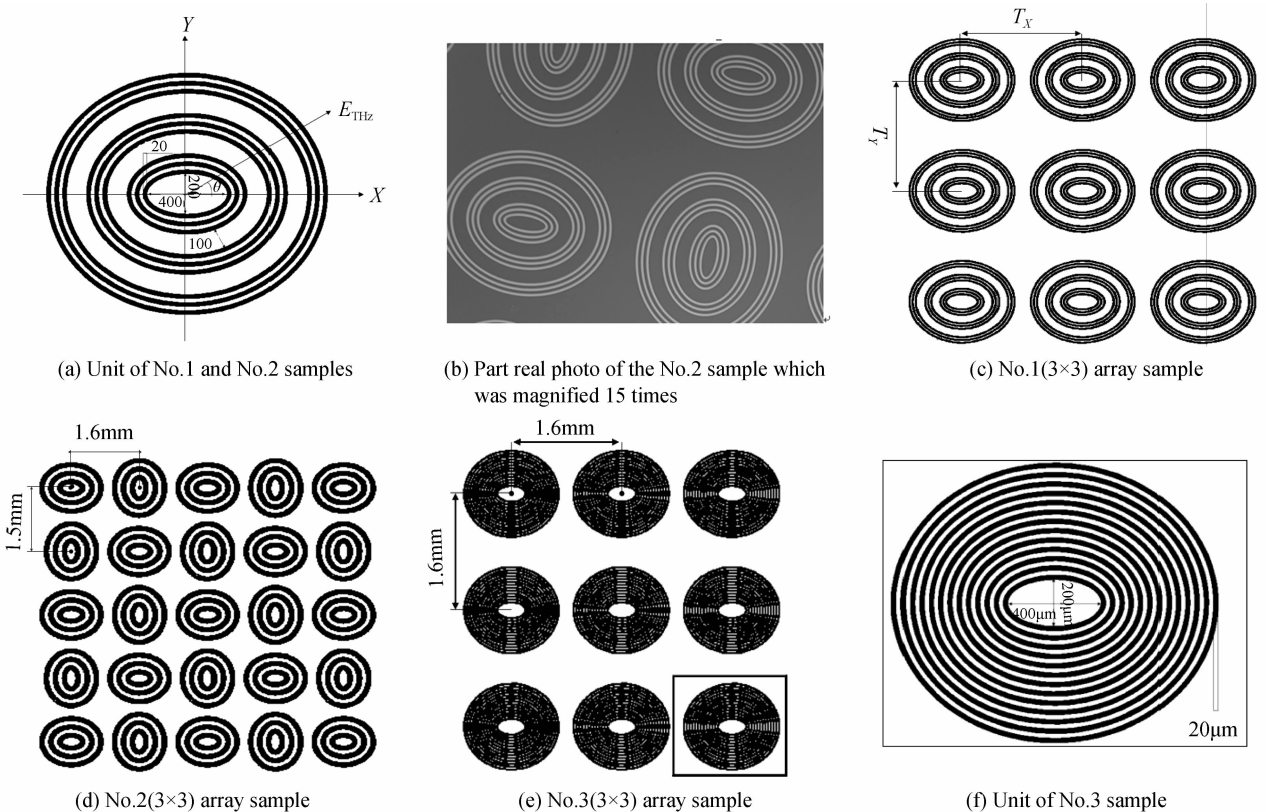


图 1 光刻得到的硅衬底上椭圆金环结构样品

Fig. 1 Schematic of ellipse gold rings structure which deposited on the silicon substrate by the photo lithography technique

此组样品结合了亚波长周期结构与分形结构的特点. 首先它们以椭圆分形环阵列呈现, 设椭圆分形环结构的分形级数为 S . 根据分形理论, 分形维数为: $D = \ln(2s - 1) / \ln s$, 而图 1(a) 中 $s = 3$, $D = \ln(2 \times 3 - 1) / \ln 3 = 1.465$. 当 S 趋于无穷大的时候, 此结构

就无限接近类似 3 号样品的周期结构了. 同时由于每一个亚波长圆环可以等效为 X 和 Y 方向的两个相互正交狭缝, 因此样品又可等效为相互正交的多个亚波长狭缝叠加的周期阵列结构. 分形结构的透射增强对应于局域共振的机理^[6-12], 而等效周期狭

缝结构的透射增强则体现出 F-P 效应^[17]. 将两个表面缺陷放置在彼此相距几个微米处, 就会产生明显表面等 离子体激光 (Surface Plasmon Polaritons, SPP) 共振光束^[18], 所以将单个样品排列构成阵列结构 (如图 1 中 (c)~(e)), 其中 (c) 和 (e) 为周期阵列, (d) 为斑图阵列.

2 实验结果与讨论

采用 Dorney T D^[19] 和 Duvillaret L^[20] 提出的

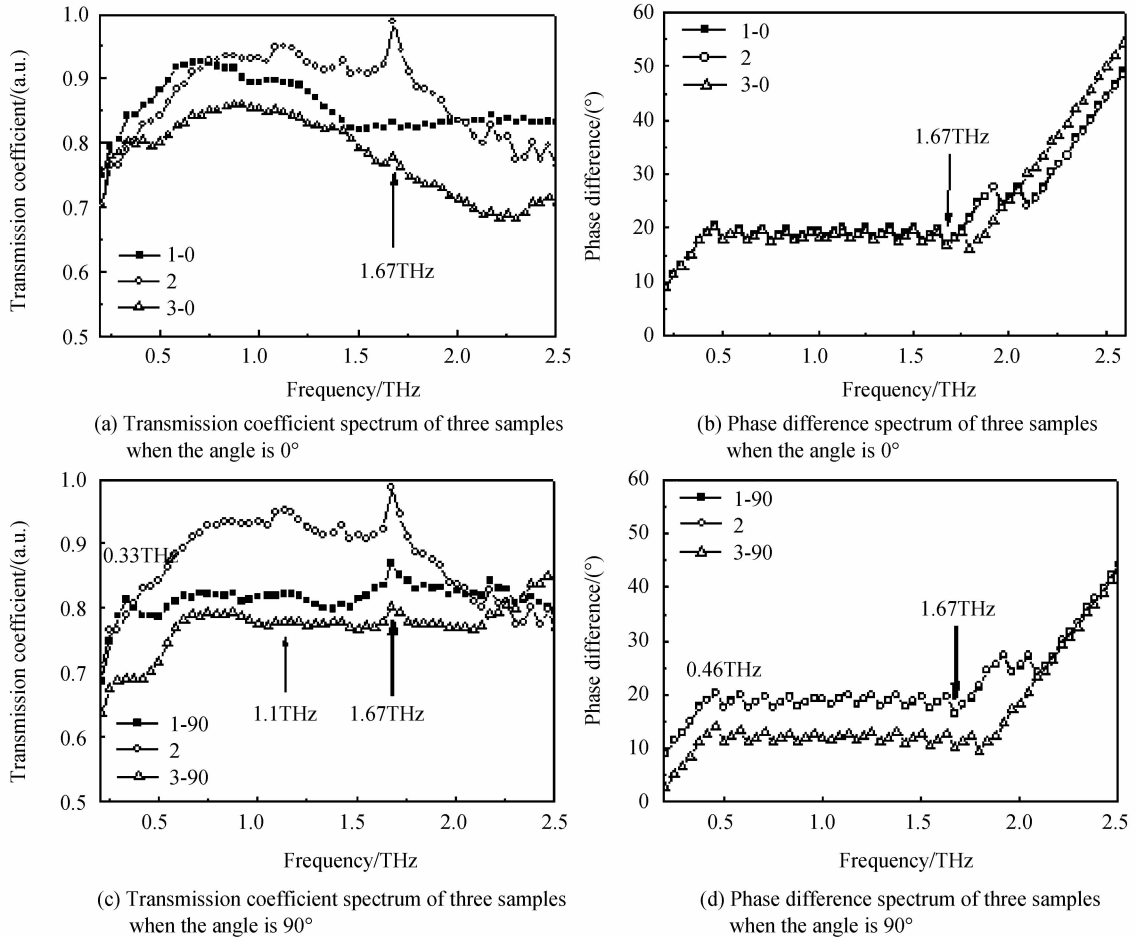


图 2 三个样品的 THz 透射谱与相位差谱

Fig. 2 Transmission coefficient and phase difference spectrum of three samples

根据电磁场理论, 在共振频率处, 电磁场会在金属结构上激发出瞬态电流, 此时的电流振幅最大. 当入射电磁波频率接近此共振频率时, 与入射波相对应的电流位相就会发生 π 跃变, 引起一个谐振. 此时透射率达到最大, 对应的频率即为共振频率. 由实验结果 (图 2(a) 和 (c)) 可知, 两种情况下透射系数均高于 0.68, 充分说明了此种亚波长结构是透射增强的. 夹角 $\theta=90^\circ$ 时 (图 2c), 1.67 THz 对应的共振峰在三个样品中都出现了, 这说明此共振峰是由于样品共同的结构即椭圆环引起的. 整个波段, 夹角 $\theta=0^\circ$ 时的透射系数均高于夹角为 90° 时的透射系数, 这是由于每个椭圆环可等效为 X 和 Y 两个方向上的金属狭缝且长度分别为对应长短轴的长度, 共振满

提取材料光学常量模型来处理由 THz-TDS 所获得的实验数据. 利用相应公式用 Matlab 软件编程处理数据, 并用 Origin 软件绘图输出各个椭圆金环样品的透射系数谱和相位差谱 (图 2). 为了较全面分析椭圆金环结构的透射特性, 定义 THz 波的偏振方向与椭圆环长轴之间的夹角为 θ (图 1(a)), 并通过改变 θ 的值, 分别获得 θ 为 0° 和 90° 两种偏振状态下样品的 THz 透射频谱图和相位差谱 (图 2).

足法 F-P 效应, 因而狭缝越长透射增强效果就越明显, 对应的透射系数也越高. 而且 $\theta=0^\circ$ 时, 1.67 THz 所对应共振峰 1 号和 3 号样品的很不明显, 而 $\theta=90^\circ$ 时三个样品较清楚, 这说明此峰主要是由等效到短轴方向的椭圆环引起的. 因为此时 THz 波的偏振方向与短轴一致, 才可能引起共振, 长轴方向与 THz 波的偏振互相垂直, 则不会引起共振. 即电场平行于短轴是高通的, 电场垂直于短轴则是低通的. 这一现象可解释为, 局域于表面等离子体的偶极子沿各方向的振荡是不同的, 而偶极子只与相同偏振方向的电磁波相耦合, 对于 $\theta=90^\circ$ 来说, 仅仅只有短轴方向上的电子形成偶极子振荡与入射 THz 波进行耦合. 这也验证了预先的狭缝模型假设, 它们可以

等效成狭缝的设想. 当然, 如此多的椭圆环应该对应一系列不同波长的透射共振峰才对, 但本文仅针对太赫兹波段进行研究, 而各椭圆环间的局域共振以及每个椭圆环所产生的次级共振或高阶模叠加均会淹没其中一些共振峰, 所以在太赫兹波段仅出现了这一个明显的共振峰. 此外, 0.33 THz 和 1.1 THz 处也出现了只有分形椭圆环结构对应的不太明显的共振峰, 而周期结构没有, 说明是结构间的耦合起主要作用, 是由分形结构的局域共振产生的透射峰.

根据 Kramers-Kronig 关系^[6], 透射强度的变化是由相位变化所决定, 所以由图 2(b) 和 (d) 的相位差谱可以验证共振增强透射的存在. 从相位差谱图中可以看到, 1.67 THz 处 3 号样品的相位差变化不明显, 相应的图 2(a) 和 (c) 中的共振透射峰很微弱; 1 号和 2 号样品相位差变化比较明显, 对应图 2(a) 和 (c) 中的共振透射峰强度就大, 特别是 $\theta=90^\circ$ 时, 就更明显一些. 而另两个不明显的透射峰则无法与位相差反转处 0.46 THz 严格对应. 通过总体对比图 2(a) 和 (c) 和图 2(b) 和 (d), 共振透射峰的振幅和相位变化的一致性说明了亚波长椭圆金环结构在透射频谱上共振增强的带通带阻现象.

由样品的透射谱得出, 样品的结构复杂度越高即对称性越不好, 透射信息就越多, 反之样品结构简单透射信息就少一些. 1 号样品的结构最复杂, 引起共振的几率就大一些, 相应地共振透射峰就多; 2 号和 3 号样品阵列对称性好些所以透射峰相对少一些, 信息就不如 1 号分形阵列结构的丰富. 所以在制备一些光学器件的时候, 可以根据透射光的需要而调整结构的形状.

3 结论

本文在太赫兹波段从实验角度验证了亚波长椭圆金环结构的透射增强性质, 并证实了这组样品透射增强的物理机理是分形结构引起的局域共振和椭圆环等效狭缝产生的 F-P 效应共同作用的结果. 由于表面等离子体激元的引入, 可大大缩小光子元件和集成光路的尺寸. 分形结构不仅可以消除由于 F-P 效应所引起的尺度大小的影响, 以及反射比自身尺度大的波的限制, 而且可以在一定波长处共振强烈的电磁波, 并限制这些波在自相似金属结构中. 这些研究结果可为太赫兹波段光学器件的发展和光学系统的集成化提供了一定的参考. 对表面等离子器件的设计, 例如滤波器、偏振片和微纳器件等提供有效的数据参考.

参考文献

[1] LU Li-zhong, WANG Ji-jun, FANG Yun-tuan. Oblique total transmission through an anisotropic zero-epsilon metamaterial

- slab[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, **47**(4): 4-9.
- [2] WANG X F, DUAN Y, CUI J P, *et al.* Crack free ZnO thick film on sapphire substrate without GaN template grown by MVPE[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2012, **15**(3): 277-281.
- [3] LISCIDINI M, SIPE J E. Enhancement of diffraction for biosensing applications via Bloch surface waves[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(25): 253125-253128.
- [4] MIYAMARU F, TAKEDA M W, SUZUKI T, *et al.* Highly sensitive surface plasmon terahertz imaging with planar plasmonic crystals[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(22): 14804-14809.
- [5] RUAN Z, QIU M. Enhanced transmission through periodic arrays of subwavelength hole: the role of localized waveguide resonances[J]. *Physical Review Letters*, 2006, **96**(23): 233901(1-3).
- [6] QU D, GRISCHKOWSKY D, ZHANG W. Terahertz transmission properties of thin, subwavelength metallic hole arrays[J]. *Optics Letter*, 2004, **29**(8): 896-898.
- [7] MASSON J B, GALLOT G. Coupling between surface plasmons in subwavelength hole arrays[J]. *Physical Review B*, 2006, **73**(12): 121401(1-4).
- [8] XING Qi-rong, LI Shu-xin, TIAN Zhen, *et al.* Enhanced zero-order transmission of terahertz radiation pulses through very deep metallic gratings with subwavelength slits[J]. *Applied Physics Letters*, **89**(4): 041107(1-3).
- [9] LIN D Z, CHANG C K, CHEN Y C, *et al.* Beaming light from a subwavelength metal slit surrounded by dielectric surface gratings[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(8): 3503-3511.
- [10] MIYAMARU F, HANGYO M. Strong enhancement of terahertz transmission for a three-layer heterostructure of metal hole arrays[J]. *Physical Review B*, 2005, **72**(3): 035429(1-5).
- [11] WEN Wei-jia, ZHOU Lei, HOU Bo, *et al.* Resonant transmission of microwave through subwavelength fractal slits in a metallic plate[J]. *Physical Review B*, 2005, **72**: 153406(1-4).
- [12] GAUBERT C, CHUSSEAU L, GIANI A, *et al.* THz fractal antennas for electrical and optical semiconductor emitters and receptors[J]. *Physica Status Solidi (C)*, 2004, **1**(6): 1439-1444.
- [13] MIYAMARU F, HANGYO M. Strong optical activity in chiral metamaterials of metal screw hole arrays[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(21): 211105-211108.
- [14] KUWATA-GONOKAMI M, SAITO N, INO Y, *et al.* Giant optical activity in quasi-two-dimensional planar nanostructures[J]. *Physical Review Letters*, 2005, **95**(22): 227401(1-3).
- [15] PENDRY J B, MARTIN-MORENO L, GARCIA-VIDAL F J. Mimicking surface plasmons with structured surfaces[J]. *Science*, 2004, **305**(6): 847-848.
- [16] XIAO Xiao, WU Jin-bo, WEN Wei-jia, *et al.* Resonant terahertz transmissions through metal hole array on silicon substrate[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(18): 18558-18564.
- [17] YANG Fu-zi, SAMBLES J R. Resonant transmission of microwaves through a narrow metallic slit[J]. *Physical Review Letters*, 2002, **89**(6): 063901(1-3).
- [18] BARNES W L. Surface plasmon-polariton length scales: a route to sub-wavelength optics[J]. *Journal of Optics A-Pure and Applied Optics*, 2006, **8**(4): 87-93.
- [19] DORNEY T D, BARANIUK K, MITTLEMAN D M. Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Journal of Optical Society of American A*, 2001, **18**(7): 1562.
- [20] GABORIT G, COUTAZ J L, DUVILLARET L. Vectorial electric field measurement using isotropic electro-optic crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**(24): 241118(1-3).