

全介质光栅在太赫兹波段的光调控特性

崔彬 杨玉平 马品 杨雪莹 马俪文

Optical modulation characteristics of all-dielectric grating at terahertz frequencies

Cui Bin Yang Yu-Ping Ma Pin Yang Xue-Ying Ma Li-Wen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 074209 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.074209

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.074209>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I7>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

TE 导模干涉刻写周期可调亚波长光栅理论研究

Theoretical investigation of adjustable period sub-wavelength grating inscribed by TE waveguide modes interference lithography

物理学报.2016, 65(9): 094206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094206>

畴腐蚀掺镁铌酸锂可调阵列光分束器的研究

Tunable array beam splitter with different domain-etching depth based on MgO-doped lithium niobate crystal

物理学报.2016, 65(1): 014215 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014215>

基于光纤叠栅的全光纤声光可调谐滤波器的特性分析

Analysis of all fiber acousto-optic tunable filter based on superimposed fiber Bragg gratings

物理学报.2015, 64(17): 174207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174207>

双层金属纳米光栅的 TE 偏振光异常透射特性

Extraordinary optical transmission through bilayer metallic nano-grating for s-polarization light

物理学报.2015, 64(16): 164206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164206>

Bragg 反射齿型平面凹面衍射光栅性能研究

Study on planar concave diffraction grating with Bragg reflector facets

物理学报.2015, 64(15): 154211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154211>

# 全介质光栅在太赫兹波段的光调控特性\*

崔彬 杨玉平<sup>†</sup> 马品 杨雪莹 马俪文

(中央民族大学理学院, 北京 100081)

(2015年9月13日收到; 2015年12月3日收到修改稿)

采用激光直写技术在100  $\mu\text{m}$ 厚的Si衬底上制备了全介质光栅结构, 利用近红外光抽运-太赫兹探测(near infrared pump-Terahertz probe)技术对该全介质光栅在THz波段的光谱响应及其光调控特性进行了测试, 最后结合电磁仿真结果, 对米谐振(Mie resonance)的形成机理和光调控机理进行了解释并对调控光作用下全介质光栅的电导率数值进行了估算. 研究表明: 在光栅与THz偏振垂直的情况下, 该全介质光栅在0—1.0 THz范围内有3个典型的米谐振峰且谐振模式各不相同; 随着调控光功率的增加, 3个谐振峰的谐振强度出现了不同程度的减弱, 其中第一个谐振峰的光调控幅度达到50%以上, 调控光作用下米谐振强度的减弱是由于光生载流子对入射THz波的吸收和散射导致了介质光栅内部感生电磁场减弱引起的. 上述工作对全介质超材料在THz波段的共振特性研究和相关光调控器件的研制具有重要参考价值.

**关键词:** 全介质光栅, 太赫兹, 光调控

**PACS:** 42.79.Dj, 73.90.+f, 42.79.Hp

**DOI:** 10.7498/aps.65.074209

## 1 引言

超材料是人工设计的具有亚波长结构的周期性排列复合材料, 其特点是可以调节周期性单元的几何结构和排列方式实现常规材料不具备的特异电磁性能, 目前已在传感<sup>[1-3]</sup>、衍射透镜<sup>[4]</sup>、电磁感应透明<sup>[5,6]</sup>、吸波材料等<sup>[7,8]</sup>方面展现出良好的应用前景. 然而常规超材料一般由介质层和金属薄膜图形构成, 金属薄膜和较厚的介质衬底会引入很大的吸收损耗, 从而使得超材料谐振峰的品质因子难以提高, 这严重影响了超材料的潜在应用<sup>[9,10]</sup>.

近年来, 基于高介电常数全介质超材料的米谐振为人们设计介电常数和磁导率可控的新型材料提供了更为广阔的空间<sup>[11]</sup>. 米谐振通常是指电磁波与高介电常数介质相互作用下产生等效的电偶极子和磁偶极子, 从而出现的电谐振和磁谐振现象<sup>[12,13]</sup>. 由于介电颗粒与电磁波通过极化电流相

互作用既能够产生电谐振又能产生磁谐振, 并且可以通过调整颗粒的尺寸和材料的介电性质调整谐振的频率和状态, 因此原则上可以取代金属超材料的LC谐振和偶极子谐振实现超常电磁响应. 更重要的是, 与常规金属超材料相比, 全介质超材料的米谐振可以避免金属层的色散吸收和能量损耗, 因此可以提高共振的品质因子<sup>[14-16]</sup>. 自2002年O'Brien和Pendry<sup>[17]</sup>利用周期性排列介质圆柱的磁极化米氏共振实现磁导率的有效调节以来, 越来越多的研究人员投身到全介质超材料的光学性质研究中去, 全介质超材料的米氏电磁谐振已经在电磁感应透明<sup>[18]</sup>、隐身材料<sup>[19]</sup>、零折射率材料<sup>[20]</sup>和完美吸收材料等<sup>[21]</sup>方面展现出优异的性能.

在超材料性能调控方面, 利用光、电、磁、热等手段对其THz光谱响应进行调制是获得高性能THz调控和处理器件的有效手段, 其中光调控由于具有调控响应时间短、调控幅度大等优势, 在未来THz功能器件调控方面蕴含巨大的潜力<sup>[22,23]</sup>. 然而目前的光调控工作主要集中于金属型超材料, 对

\* 国家自然科学基金(批准号: 11574408, 11204191, 11374378)、国家重大科学仪器设备开发专项(批准号: 2012YQ14000508)、留学人员科技活动择优资助项目和大学生创新性试验计划(批准号: GCCX2015110005, URTTP2015110036)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [ypyang\\_cun@126.com](mailto:ypyang_cun@126.com)

全介质超材料的光调控及其机理的研究还少有报道. 另外, 现阶段介质超材料的制备绝大部分都采用传统微纳技术中光刻和刻蚀的方法<sup>[15,24]</sup>, 加工过程复杂、耗时且价格昂贵. 基于上述背景, 本文采用激光直写技术取代传统的微纳制造技术制作了全介质 Si 光栅, 并利用太赫兹时域光谱技术对全介质光栅的米氏谐振特性进行了分析, 在此基础上, 利用光调控的方法对全介质光栅在 THz 波段的透过率进行了调制并对其机理进行了解释. 该全介质光栅结构简单、加工容易、调控幅度较高, 具有潜在的应用价值.

## 2 全介质光栅的制备与测试

为了制备出具有周期性结构的全介质光栅, 我们采用激光直写技术对 Si 基片进行加工. 激光直写技术与传统的微纳加工方法相比, 具有快速、工艺过程简单以及成本低等优点. 实验中采用的激光直写系统型号为 Enpon-Nano-H532, 激光波长为 532 nm, 脉冲宽度为 10 ns, 功率为 5 W. 为了减小插入损耗, 采用厚度为 100 μm 的 Si 基片制作光栅, 电阻率为 1000 Ω·cm. 图 1 (a) 和图 1 (b) 分别给出了全介质光栅的低倍率放大照片以及高倍率局部放大照片.

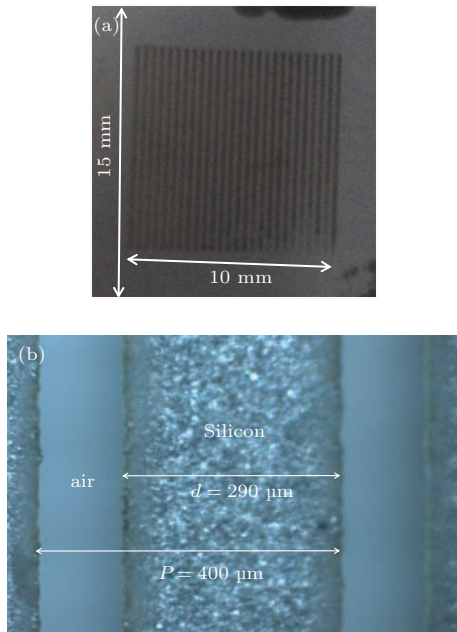


图 1 (a) 全介质 Si 光栅的低倍率放大照片; (b) 全介质 Si 光栅的高倍率局部放大照片

Fig. 1. (a) Low- and (b) high-magnification images of the fabricated all-dielectric grating.

从图 1 可以看到, Si 基片的二维方向尺寸为 15 mm × 15 mm, 中间部分制作成周期性的光栅结构, 光栅部分尺寸为 10 mm × 10 mm, 光栅部分显示出很好的周期性. 光栅部分 Si 柱的宽度  $d = 290 \mu\text{m}$ , 光栅常数  $P = 400 \mu\text{m}$ .

采用标准的太赫兹时域光谱系统测量 THz 波通过全介质光栅的透射特性<sup>[25]</sup>. 中心波长为 800 nm, 重复频率为 82 MHz, 脉宽为 100 fs, 平均功率为 760 mW 的掺钛宝石激光器作为激发光源; THz 脉冲的产生和探测是由光电导天线来实现的, 其中产生光和探测光的功率均为 10 mW. 图 2 给出了全介质光栅调控的光路示意图. 测试过程中, 将待测光栅放置于 THz 波束腰的位置上, 该时域光谱系统只接收沿光轴方向的远场傍轴信号 (即光栅的零级衍射信号). THz 波入射方向垂直于介质光栅平面, THz 波的电场 ( $E$ ) 方向垂直于 Si 柱. 调控光由 GD3-CC311 型半导体激光器提供, 输出波长 808 nm, 功率 0—10 W 连续可调. 调控光由光纤头输出后, 经过透镜耦合后形成圆形光束, 光斑直径约为 15 mm, 能够保证对全介质光栅上入射 THz 波的有效覆盖, 最大光功率密度可达到  $56.6 \text{ mW}/\text{mm}^2$ .

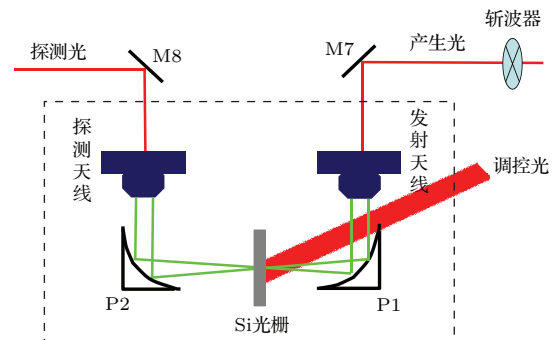


图 2 全介质光栅光调控的光路示意图

Fig. 2. Experimental schematic of the optical modulation of the all-dielectric grating.

## 3 全介质光栅的共振特性研究

全介质光栅透射特性的测试曲线如图 3 中实线所示. 从测试结果可以看到, 全介质光栅在 THz 波段呈现出一系列明显的米氏谐振峰, 在 0.2—1.0 THz 范围内, 共有 3 个明显的谐振峰出现. 谐振峰的位置分别在 0.461, 0.688 和 0.867 THz, 上述 3 个谐振峰对应的透过率分别为 0.05, 0.11 和 0.25. 另外, 上述 3 个谐振峰频率处的反射率增强 (未给出, 见文献<sup>[25]</sup>), 因此利用全介质光栅的米氏

共振可以实现在特定频率位置的反射增强甚至接近全反射.

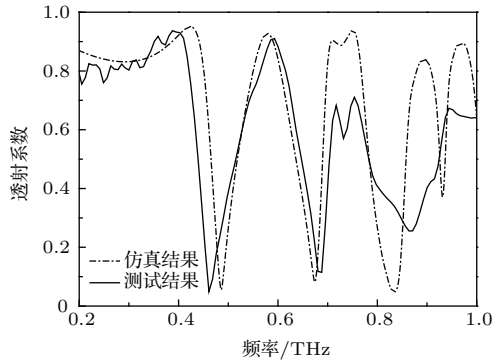


图3 全介质光栅的透射率曲线(测试结果与仿真结果)  
Fig. 3. Measured and Simulated transmission for all-dielectric grating.

采用基于时域有限积分法的 CST Microwave Studio 仿真软件对全介质光栅的透过率进行了仿真. 仿真结果中3个米氏谐振峰的位置分别在0.486, 0.674和0.834 THz, 对应的透过率分别为0.06, 0.08和0.05. 从图3可以看到, 在第一个和第二个谐振峰位置处, 仿真结果与测试结果符合较好; 在第三个谐振峰之后, 仿真结果与测试结果无法很好地符合在一起, 这应该是由于高阶次谐振内部复杂的谐振模式引起的. 另外, 第一个和第二个谐振峰位置处仿真结果与测试结果之间在频率上的微小差异应该是由加工误差以及Si基片厚度不均匀造成的谐振峰位置偏移引起的.

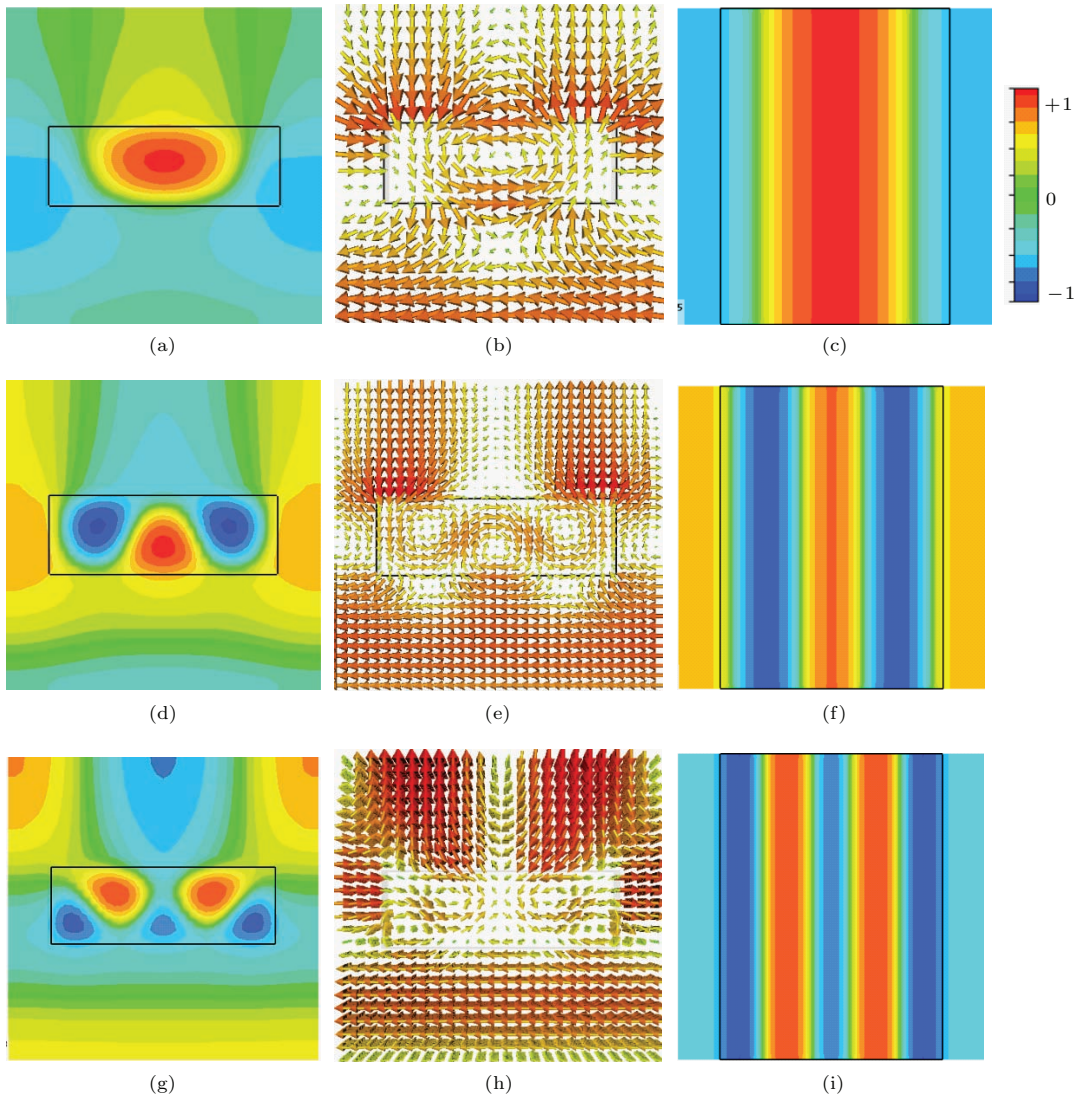


图4 不同谐振频率处Si柱横截面磁场分布((a), (d), (g)),横截面电场分布((b), (e), (h))、剖面磁场分布((c), (f), (i))情况 (a)—(c) 0.486 THz; (d)—(f) 0.674 THz; (g)—(i) 0.834 THz  
Fig. 4. Magnetic field in cross-section ((a), (d), (g)), electric field in cross-section ((b), (e), (h)) and magnetic field in profile ((c), (f), (i)) maps at different frequencies: (a)—(c) 0.486 THz; (d)—(f) 0.674 THz; (g)—(i) 0.834 THz.

为了进一步对各个谐振峰的谐振模式进行研究,我们设置一个Si柱及其附近的空气为仿真单元,对3个谐振频率(0.486, 0.674 和0.834 THz)处的电磁场分布进行了仿真.对于米氏谐振,谐振频率处介质材料内部的电场和磁场分布是由外界入射的THz波的电磁场激励引起的,由于入射THz波的磁场方向沿着光栅Si柱方向,因此感生电场应该是沿着Si柱横截面方向的环形电场.图4(a)给出了第一个谐振频率处Si柱附近横截面(黑色框代表Si柱截面)的磁场分布情况,该磁场最强的区域集中在Si柱的中心位置;图4(b)给出了第一个谐振频率位置Si柱附近同一截面的感生电场分布,可以看到,电场在Si柱中心位置附近产生了一个环流,该电场环流是由入射的THz波沿Si柱方向变化的磁场引起的;图4(c)给出了沿Si柱方向剖面的磁场分布,可以看到,在Si柱内部磁场为垂直上下的,没有发生弯曲.

类似地,图4(d)—(f)以及图4(g)—(i)分别给出了第二个谐振频率和第三个谐振频率处Si柱附近横向截面的磁场分布情况、电场分布情况以及沿Si柱方向剖面的磁场分布.从图4(d)—(f)可以看到:第二个谐振频率处的磁场最强区域集中在Si柱内部的3个区域,且其中1个区域的磁场方向与另外2个区域的磁场方向相反;产生的3个电场环流也集中在3个相应位置;Si柱内部磁场为垂直上下的.从图4(g)—(i)可以看到:第三个谐振频率处的磁场最强区域集中在Si柱中的5个区域,且其中2个区域的磁场方向与另外3个区域的磁场方向相反;产生的5个电场环流也集中在5个相应位置;Si柱内部磁场也是垂直上下的.

上述结果表明3个谐振频率处的谐振模式各不相同,这与之前报道的Si柱横截面为正方形的全介质光栅的米氏谐振电磁场分布模式有所不同<sup>[25]</sup>,这说明全介质光栅的米氏谐振模式与Si柱截面的尺寸有关, Si柱宽度的增加可以使得介质内部的电磁场分布更加分散,对应的谐振模式也更为复杂.

#### 4 全介质光栅的光调控特性研究

不同调控光功率下全介质光栅透过特性的测试曲线如图5所示.可以看到,随着调控光功率的增加,3个米氏谐振峰的谐振深度减小,同时谐振峰宽度增加.在第一个谐振峰位置,随着调控光强度由0 W增加到10 W,透过率从0.05变为0.27,

进一步变为0.33,谐振峰深度减小且宽度增加;在第二个谐振峰位置,随着调控光强度由0 W增加到5 W,透过率从0.11变为0.23,当调控光功率由5 W增加到10 W时,虽然透过率维持0.23不变,但谐振峰深度明显减小且宽度增加;在第三个谐振峰位置,随着调控光强度由0 W增加到10 W,虽然透过率基本不变,但谐振峰深度不断减小且宽度不断增加.上述现象说明在增加调控光功率的过程中,各个谐振峰处谐振强度出现了不同程度的不断减弱.其中第一个谐振峰的光调控效果最为明显,当调控光功率增加到10 W时,调控幅度可以达到54.0%.我们认为各个谐振峰位置谐振强度的减弱是由于在调控光作用下产生的光生载流子使得入射的THz光波的电磁场减弱,从而导致Si柱附近的感生电磁场减弱,进而导致谐振频率处的谐振强度减弱.

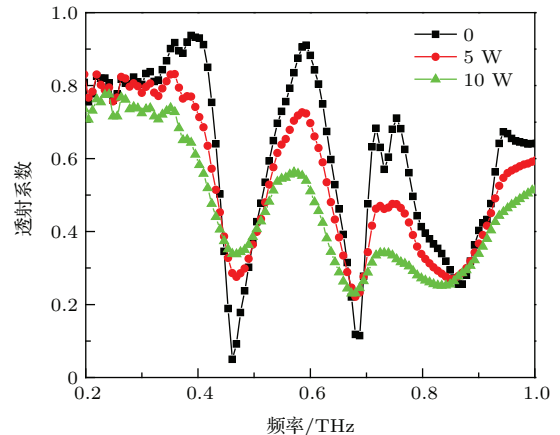


图5 不同调控光功率下全介质光栅的透过率测试曲线  
Fig. 5. Measured transmission for the dielectric grating with different modulation light powers.

为了对调控光作用下谐振频率处谐振强度减弱的原因进行分析验证,我们以第一个谐振频率为例,对Si柱附近的电磁场分布进行仿真.图6给出了不加调控光、5 W调控光作用下和10 W调控光作用下,第一个谐振频率处Si柱附近的磁场分布情况.由于入射的THz波的电磁场不断变化,为了保证感生电磁场相位一致,我们将入射THz波的相位统一设置为 $\theta = 30^\circ$ .从图6可以看到:当调控功率为0 W时,磁场强度最大值为993 A/m;当调控光功率为5 W时,磁场强度最大值为686 A/m;当调控光功率为10 W时,磁场强度为586 A/m.这样就验证了我们的想法,即随着调控光功率的增加,各个谐振峰位置的谐振模式没有发生变化,谐振强

度的减弱是由该谐振模式下感生电磁场的减弱引起的.

由于调控光作用下光生载流子的产生会对全介质 Si 光栅的电导率产生影响, 我们通过仿真, 对 5 和 10 W 两种调控光功率下全介质光栅的电导率进行了估算. 仿真过程中, 假设光生载流子的穿透深度为 2  $\mu\text{m}$ , 通过改变载流子所在薄层 Si 材料的

电导率, 当仿真得到的透射特性曲线与测试结果最为接近时, 即得到该调控光功率下 Si 材料的电导率数值. 利用这种方法, 我们估算出 5 W 的调控光功率下, Si 的电导率约为 1000 S/m; 当调控光功率增加到 10 W 时, Si 的电导率约为 1500 S/m. 上述调控光作用下 Si 介质光栅的电导率数据为后续光调控实验的仿真设计提供了重要的参考.

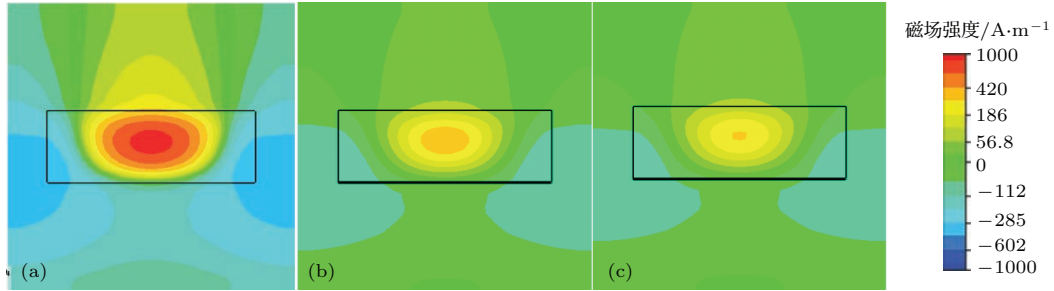


图 6 不同调控光功率下第一个谐振频率处 Si 柱附近的磁场分布 (a) 0 W; (b) 5 W; (c) 10 W

Fig. 6. Magnetic field maps of the first Mie resonance with different modulation light powers: (a) 0 W; (b) 5 W; (c) 10 W.

## 5 结 论

本文采用实验测试与模拟仿真相结合的方法, 对全介质 Si 光栅在 THz 波段的米谐振特性进行了研究, 并采用 808 nm 半导体激光器作为调控光源, 对其光调控特性及调控机理进行了研究. 发现全介质 Si 光栅在 0—1.0 THz 范围内的 3 个米氏谐振峰的谐振模式各不相同, 且谐振模式内部的电磁场分布与光栅 Si 柱的截面尺寸有关; 在调控光的作用下, 全介质 Si 光栅的上述 3 个米氏谐振峰谐振强度出现了不同程度减弱, 最大调控幅度可达 54.0%, 根据模拟结果可以得到调控光作用下各个谐振峰的谐振模式没有发生变化, 谐振强度的减弱是由于光生载流子对入射 THz 波的吸收和散射引起的. 实验中采用的激光直写技术以及对全介质 Si 光栅的米氏谐振特性和光调控特性的研究结果对 THz 波段 Si 基全介质超材料的研究和制备具有重要参考价值.

## 参考文献

[1] Wu X J, Quan B G, Pan X C, Xu X L, Lu X C, Gu C Z, Wang L 2013 *Biosens. Bioelectron.* **42** 626  
 [2] O' Hara J F, Singh R, Brener I, Smirnova E, Han J, Taylor A J, Zhang W 2008 *Opt. Express* **16** 1786

[3] Zhang Y P, Li T T, Lü H H, Huang X Y, Zhang H Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 117801 (in Chinese) [张玉萍, 李彤彤, 吕欢欢, 黄晓燕, 张会云 2015 物理学报 **64** 117801]  
 [4] Fang N, Lee H, Sun C, Zhang X 2005 *Science* **308** 534  
 [5] Gu J Q, Singh R, Liu X J, Zhang X Q, Ma Y F, Zhang S, Maier S A, Tian Z, Azad A K, Chen H T, Taylor A J, Han J G, Zhang W L 2012 *Nat. Commun.* **3** 1151  
 [6] Ding C F, Zhang Y T, Yao J Q, Sun C L, Xu D G, Zhang G Z 2014 *Chin. Phys. B* **23** 124203  
 [7] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402  
 [8] Li L Y, Wang J, Du H L, Wang J F, Qu S B 2015 *Chin. Phys. B* **24** 064201  
 [9] Xiao S, Drachev V P, Kildishev A V, Ni X, Chettiar U K, Yuan H K, Shalaev V M 2010 *Nature* **466** 735  
 [10] Yang Y P, Singh R, Zhang W L 2014 *Chin. Phys. B* **23** 128702  
 [11] Vynck K, Felbacq D, Centeno E, Căbuz A I, Cassagne D, Guizal B 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 133901  
 [12] Zhao Q, Zhou J, Zhang F L, Lippens D 2009 *Mater. Today* **12** 60  
 [13] Bi K, Guo Y S, Liu X M, Zhao Q, Xiao J H, Lei M, Zhou J 2014 *Sci. Rep.* **4** 7001  
 [14] Peng L, Ran L, Chen H, Zhang H, Kong J A, Grzegorzczuk T M 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 157403  
 [15] Zhang J, Macdonald K F, Zheludev N I 2013 *Opt. Express* **21** 26721  
 [16] Shi L, Harris J T, Fenollosa R, Rodriguez I, Lu X, Korgel B A, Meseguer F 2013 *Nat. Commun.* **4** 1904  
 [17] O'Brien S, Pendry J B 2002 *Condens. Matter* **14** 6383  
 [18] Yang Y, Kravchenko I I, Briggs D P, Valentine J 2014 *Nat. Commun.* **5** 5753  
 [19] Narayana S, Sato Y 2012 *Adv. Mater.* **24** 71

- [20] Moitra P, Yang Y, Anderson Z, Kravchenko I I, Briggs D P, Valentine J 2013 *Nat. Photon.* **7** 791
- [21] Slovick B, Yu Z G, Berding M, Krishnamurthy S 2013 *Phys. Rev. B* **8** 165116
- [22] Rahm M, Li J S, Padilla W J 2013 *J. Infr. Milli. Terahz. Waves* **34** 1
- [23] Li Q, Tian Z, Zhang X Q, Singh R, Du L L, Gu J Q, Han J G, Zhang W L 2015 *Nat. Commun.* **6** 7082
- [24] Moitra P, Slovick B A, Yu Z G, Krishnamurthy S, Valentine J 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 171102
- [25] Yang Y P, Cui B, Geng Z X, Feng S 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 111106

## Optical modulation characteristics of all-dielectric grating at terahertz frequencies\*

Cui Bin Yang Yu-Ping<sup>†</sup> Ma Pin Yang Xue-Ying Ma Li-Wen

(School of Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China)

( Received 13 September 2015; revised manuscript received 3 December 2015 )

### Abstract

In recent years, metamaterials (MMs) have been widely investigated for their exotic electromagnetic characteristics which cannot be achieved in nature. However, one of the main limitations in traditional metallic-film MMs is a high level of radiation loss in metal and insertion loss of the high-permittivity or thick substrate. Fortunately, all-dielectric MMs with high refractive-index dielectric structures show significantly less material loss than their metallic counterparts. In this paper, an all-dielectric grating is fabricated on a 100- $\mu\text{m}$ -thick silicon wafer by using direct-laser-writing technique, and the properties of its Mie resonances are investigated by THz time-domain spectroscopy. Then we measure the spectral response of the all-dielectric grating under the optical modulation by a near-infrared pump-THz probe method. The modulation light source is an 808 nm continuous semiconductor laser with a maximum power (10 W). To give an insight into the underlying mechanisms of the Mie-type resonance effects on the arrayed, silicon pillars, the transmission of the all-dielectric grating is investigated numerically by the finite-element simulations through using CST Microwave Studio. In our experiment, the incident THz magnetic field is along the grating lines. The research results show that three typical Mie resonances are excited from 0 to 1 THz in the all-dielectric structure, and all the three resonant modes are different in the distributions of electric field and magnetic field. Furthermore, it is found that the resonance intensities of these three resonance peaks appear to be weakened variously with the increase of the optical power, and the first resonant peak modulation amplitude maximally reaches more than 50%. Combining the simulation results, we prove that the decrease of Mie resonance intensity under photo-excitation is caused by the absorption and the scattering of the incident THz wave by photo-generated carriers. Besides, we estimate the conductivity values of the all-dielectric grating under different optical excitations and find that the conductivity values reach 1000 S/m and 1500 S/m corresponding to 5 W and 10 W optical excitation, respectively. The estimated conductivity data will play an important role in the prospective optical modulation simulation. All the results mentioned above will provide an important reference for researches on the resonance properties of the all-dielectric metamaterials and the development of related functional devices.

**Keywords:** all-dielectric grating, terahertz, optical modulation

**PACS:** 42.79.Dj, 73.90.+f, 42.79.Hp

**DOI:** 10.7498/aps.65.074209

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11574408, 11204191, 11374378), the Special Funds of the Major Scientific Instruments Equipment Development of China (Grant No. 2012YQ14000508), the Technology Foundation for Selected Overseas Chinese Scholar, and the Undergraduate Innovative Test Program, China (Grant Nos. GCCX2015110005, U RTP2015110036).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [ypyang\\_cun@126.com](mailto:ypyang_cun@126.com)