

# 正交偶极分形槽红外波段光学特性研究

孙梅<sup>1</sup> 徐德刚<sup>2</sup> 郭培源<sup>1</sup> 姚建铨<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>北京工商大学计算机与信息工程学院, 北京 100048  
<sup>2</sup>天津大学精仪学院激光与光电子研究所光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 利用电子束直写系统(EBL)和反应离子束刻蚀系统(RIE)制作了两级正交偶极分形槽样品,其中空气槽的宽度为  $0.12\ \mu\text{m}$ ,两级正交偶极分形槽结构中第一级和第二级的臂长分别为  $1.8\ \mu\text{m}$  和  $0.8\ \mu\text{m}$ 。样品总体尺寸为  $35\ \mu\text{m}\times 35\ \mu\text{m}$ ,是由  $20\times 20$  个正交偶极排列而成的,每个正交偶极之间的周期为  $1.5\ \mu\text{m}$ 。采用实验和传输矩阵(TMM)理论模拟的方法研究了分形槽结构在近红外和中红外波段的透射曲线,正交偶极分形槽结构在  $1.7\ \mu\text{m}$  和  $5.2\ \mu\text{m}$  波长处得到两个增强透射峰,其透射率分别为 36% 和 49%。理论模拟结果与实验测量结果基本一致。证明了两级正交偶极分形结构中自相似性的存在。

**关键词** 分形结构;正交偶极;自相似性;传输矩阵

**中图分类号** O433.1, O472+.3

**OCIS** 130.3060 230.4000

**文献标识码** A

## Transmission Properties of Cross Dipole Fractal Slits for Infrared Wavelengths

Sun Mei<sup>1</sup> Xu Degang<sup>2</sup> Guo Peiyuan<sup>1</sup> Yao Jianquan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China  
<sup>2</sup>Key Laboratory of Optoelectronics Information and Technical Science, Ministry of Education, Institute of Lasers and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** Two-stage cross dipole fractal slits are fabricated by electron beam lithography (EBL) and reactive ion etching (RIE) system, and the width of the fractal slits is about  $0.12\ \mu\text{m}$ . The primary and secondary cross dipole arm lengths of the fractal unit are  $1.8\ \mu\text{m}$  and  $0.8\ \mu\text{m}$ , respectively. The overall size of the sample used in the experiment is  $35\ \mu\text{m}\times 35\ \mu\text{m}$ , which is composed of  $20\times 20$  periodic array of two-stage cross dipole fractals. The period of the fractal lattice is  $1.5\ \mu\text{m}$ . The transmission spectrum of the two stages cross dipole fractal slits is simulated using the transfer-matrix method (TMM) in the near- and mid-infrared region. There are two enhanced transmission peaks at  $1.7\ \mu\text{m}$  and  $5.2\ \mu\text{m}$  with the transmission coefficient of 36% and 49%. The measured transmission spectrum agrees well with the simulation.

**Key words** fractals; cross dipole; self-similarity; transfer-matrix method

## 1 引言

“分形”由分形几何的创始人 B. B. Mandelbrot 于 1975 年由拉丁语 Frangere 一词创造而成<sup>[1]</sup>,词本身具有破碎、不规则等含义。而首次把“分形”应用在频率选择表面的设计者是 Parker 和 Sheikh<sup>[2]</sup>,由于分形结构独特的性质,使微波天线的小型化、薄断面以及多共振波长成为可能,随后人们提出各种各样的分形结构来满足人们日益增长的军事和商业需要:Minkowski 和 Sierpinski 地毯分形可以用来设计具有两个或三个共振波长的微波天线,而其中共振波长的数目取决于生成分形的迭代次数<sup>[3~7]</sup>;分形结构的空间填充特

收稿日期: 2010-01-04; 收到修改稿日期: 2010-02-05

基金项目: 国家 973 计划(2007CB310403)资助课题。

作者简介: 孙梅(1976—),女,博士,讲师,主要从事光子晶体及 THz 光学方面的研究。E-mail: smcxh123@163.com

性,比如 Minkowski 环和 Hilbert 曲线,使微波天线日趋小型化<sup>[8,9]</sup>。

分形是一种复杂的几何图形结构,它不具有周期性,但也不是随机分布的,完全无序的。因此,理解等离子体波在具有分形图案的金属薄膜表面传播时的色散关系和电磁模式,光和这些等离子体波的相互作用规律,以及薄膜的两个表面的等离子体波的相互耦合行为,就比周期性系统更加复杂和更具挑战性<sup>[10]</sup>。对这种复杂体系的研究和探索,无疑将大大丰富人们对光在具有高度复杂几何结构的金属材料里的传播现象和规律的认识。通过掌握这些现象和规律,可望为控制光的传播行为,实现新的应用提供新的思路 and 手段。

D. H. Werner 等<sup>[11]</sup>和 P. Drupp 等<sup>[12]</sup>分别研究了正交偶极分形金属结构在微波与电磁场之间的相互作用,正交偶极分形金属结构在相应的波长区域也具有多共振波长。正交偶极分形金属结构一方面结构比较简单,适合用微加工的手段来制作样品,另一方面正交偶极分形金属结构的径向对称性对偏振和入射光的方向性不敏感,对于实验测量装置要求不高。所以本文选择正交偶极分形槽结构作为研究的对象,从理论和实验两方面研究了它在近红外和中红外的光学传输特性。

## 2 样品的制备

近年来,随着纳米科学和技术的发展,对亚波长金属微结构中光的激发和传播行为控制的研究逐渐得到广泛的重视和飞速发展。研究纳米尺寸效应的关键是实现纳米尺度的结构和器件<sup>[13~16]</sup>。因此,样品制备过程中所需的微加工仪器起着至关重要的作用。

电子束曝光(EBL)技术是利用电子束扫描将有机聚合物加工成精细掩模图形的工艺技术。电子束曝光与普通光学曝光技术一样,都是在有机聚合物(抗蚀剂)薄膜上制作掩模图形。只是电子束曝光技术中所采用的电子束抗蚀剂对电子束比较敏感,受电子束辐照后,物理和化学性能发生变化,在一定的显影剂中表现出良溶(正性电子束抗蚀剂)或非溶性(负性电子束抗蚀剂)特性,从而形成所需要的图形。

它主要包括:1)电子光学部分,用于形成和控制电子束,是电子束曝光系统的核心,由电子枪、透镜系统、束闸及偏转系统等组成;2)工件台系统,用于样品进出样品室,以及样品在样品室内的精确移动;3)真空系统,用于实现和保持样品室及电子枪的真空;4)图形发生器及控制电路,其作用是根据计算机的命令对电子束进行控制;5)电力供应系统;6)计算机控制系统,现在一般用计算机控制。图 1 给出的是德国 Raith 公司的 Raith 150 电子束曝光系统。



图 1 Raith 150 电子束直写系统

Fig.1 Raith 150 electron beam lithography

由于正交偶极样品的透射谱线受各个参数的影响较大,比如,每个分形单元之间的周期、各个级的长度以及分形槽的宽度等,所以首先用传输矩阵方法(TMM)对样品的各个参数做了优化。在利用传输矩阵的方法对参数优化时,考虑了样品结构的二重镜面反射的对称性,这样大大节约了计算的内存和时间<sup>[17,18]</sup>。另外,利用传输矩阵的方法进行数值模拟时,使用了实验测量中金膜的色散曲线(介电常数是一个虚数,具有实部和虚部),因此,金属介质的吸收效应在传输矩阵中是自动考虑在内的。根据优化后的参数,利用中国科学院物理研究所微加工实验室用 EBL 制备了样品(图 1 所示)。首先利用涂胶机在光学厚度(200 nm)的金膜上覆盖一层 216 nm 的 PMMA 胶,其中石英基底(0.5 mm)与金膜之间 5 nm 的铬层是为了增强金膜与基底的附着性。Raith 150 和 Plasma Lab 80 反应离子束刻蚀系统(RIE)最后生成周期性排列的正交偶极分形槽结构,刻蚀气体选择的是氟气,刻蚀时间大约为 15 min,图 2 给出了利用 EBL 和 RIE 技术在金膜上刻蚀的实验样品扫描电子显微镜(SEM)图,为了避免正交偶极分形槽结构在高频带出现光栅波瓣,把图形旋转了 45°。图 2(a)中,周期性排列正交偶极分形槽结构的总体尺寸为 35 μm × 35 μm,是由 20 × 20 个正交偶极排列而成的,每个正交偶极之间的周期为 1.5 μm。图 2(b)是(a)的局部放大图,120 nm 宽的空气槽可以很清晰地看出来。其中两级的正交偶极分形槽结构中第一级和第二级的臂长分别为 1.8 μm 和 0.8 μm。

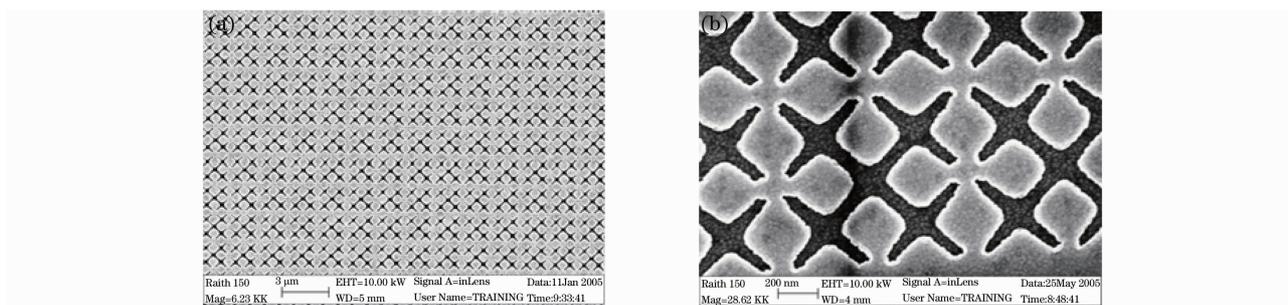


图2 (a)正交偶极分形槽结构,(b)局部放大图

Fig. 2 (a) Scanning electron microscope(SEM) images of the cross dipole fractal slit structure, (b) enlarged picture of small region

### 3 样品的测量

实验中选用功率 50 W 的卤灯作为光源,其主要原因在于激光器总有一定的波长范围的限制,而卤灯的发光范围可以从可见到红外波段,可以测得样品的完整透射谱线。由光源发出的光被斩波器调制后,经过一个直径为 0.5 mm 的小孔光阑进行准直,然后由一个放大倍数为 40 倍的显微物镜会聚。样品放置于显微物镜的焦点处。经过样品的透射光束由另一个放大倍数为 25 倍的显微物镜收集,再通过短焦距透镜引入单色仪。单色仪的输出信号由红外探测器进行放大后输出,红外探测器输出的电压信号接入锁相放大器的信号输入端,斩波器的输出信号接入锁相放大器的参考输入端。最后,由计算机进行数据的采集和处理。图 3 是实验测量装置示意图。

在测试完样品的透射谱以后,马上将样品移开,使入射光直接通过一个完全相同的没有金膜的干净石英基片,用来校准透射谱线,测出无样品时的本底信号,再用本底信号去除样品信号,便可得出绝对的透射率信号。在这一过程中假定了由于样品的加入对于光路的影响很小的前提条件。这一前提在本实验中是可以满足的。

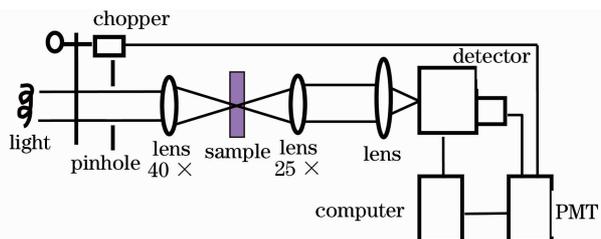


图3 样品测量示意图

Fig. 3 Scheme of measuring samples

### 4 正交偶极分形结构的研究

图 4 给出了用 TMM 方法和实验测量的周期性排列的正交偶极分形槽结构的透射谱线。实线所示的是传输矩阵的模拟结果,在波长  $1.72 \mu\text{m}$  和  $5.2 \mu\text{m}$  有两个强的透射峰,其透射率分别为 36% 和 49%。为了进一步证实理论模拟的结果,用实验装置测量了经过优化的样品在近红外波段的透射谱线,如图 4 中虚线所示,在  $0.9 \sim 2.5 \mu\text{m}$  的波长范围内,正交偶极分形结构在  $1.68 \mu\text{m}$  处有一透射率为 29% 的增强峰。与实验曲线相比,理论模拟曲线略微红移且透射峰要比实验测量宽。把这些偏差归因于样品制备的实际参数与理论计算所选参数的微小差别。首先,仅从扫描电子显微镜照片来确定样品的结构参数有一定的误差;另一方面,理论计算没有将为了增强金膜在石英基底上的牢固性所采用的 5 nm 的厚铬膜计算在内。

自相似特性是分形结构的一个独特的性质,而分形结构比例系数也称为分形的维数,是描述这种自相似程度的一个定量参数。D. H. Werner 等<sup>[11,12]</sup>研究的正交偶极分形金属结构在微波区域具有多共振波长,而共振波长的峰值位置与分形结构的的比例系数有密切的关系。在本文的实验测量中,经过优化的正交偶

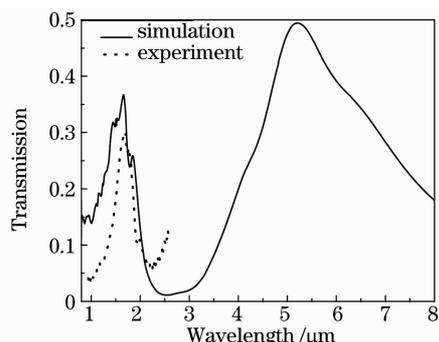


图4 正交偶极分形结构的透射曲线

Fig. 4 Transmission spectrum of cross dipole fractal slit

极分形的第一级和第二级的臂长分别选择为  $1.8 \mu\text{m}$  和  $0.8 \mu\text{m}$ , 那么几何图形的比例系数为  $1.8/0.8=2.25$ 。也即第二个透射峰的波长位置应该是第一个透射峰的 2.25 倍。在实验中, 第一个透射增强峰在  $1.68 \mu\text{m}$  处, 那么第二个透射峰的位置应该在  $1.68 \times 2.25=3.8 \mu\text{m}$  处。由于探测器探测范围和光源的限制, 不能用实验的方法探测到第二个增强透射峰。为了进一步证实正交偶极分形结构的透射曲线的两个增强峰是自身的结构所致, 用 TMM 对单个分形的透射曲线做了模拟, 参数的选择与经过优化的两级正交偶极分形一致, 其中第一级和第二级的臂长分别仍为  $1.8 \mu\text{m}$  和  $0.8 \mu\text{m}$ , 每个正交偶极之间的周期是  $1.5 \mu\text{m}$ 。数模拟结果如图 5 所示, 相对于两级的正交偶极分形结构(实线), 单个初级正交偶极分形结构的透射峰(虚线)的位置向短波移动  $1 \mu\text{m}$ , 这归因于两级的正交偶极分形结构中第二级所造成的负载效应<sup>[19]</sup>。同理可得, 当周期为  $1.5 \mu\text{m}$ , 臂长为  $0.8 \mu\text{m}$  的单个正交偶极在  $1.7 \mu\text{m}$  处, 得到一个透射率为 50% 的增强峰(虚线)。由上面的分析可以很确定地说, 正交偶极分形结构的自相似性导致了它具有两个共振波长的增强透射峰。

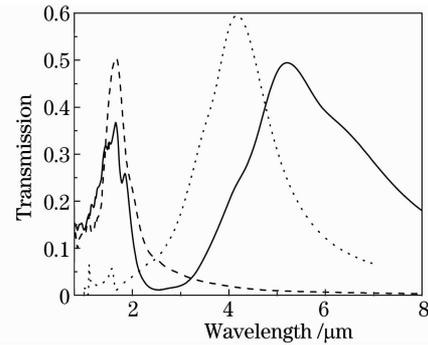


图 5 单级与两级正交偶极分形结构的透射曲线  
Fig. 5 Simulation transmission spectra of the single and two-stage original cross-dipole fractal slits

## 5 结 论

首先利用传输矩阵的方法对正交偶极分形槽结构进行了优化设计, 然后用 EBL 和 RIE 微加工技术, 成功制作了亚波长的正交偶极分形结构。并从实验和理论模拟两方面研究了正交偶极分形槽结构的透射曲线, 在  $1.7 \mu\text{m}$  和  $5.2 \mu\text{m}$  波长处得到两个增强透射峰, 其透射率分别为 36% 和 49%。由于探测器探测范围和光源的限制, 不能用实验的方法探测到第二个增强透射峰。但通过 TMM 对单个正交偶极分形的透射曲线模拟计算, 证实了第二增强透射峰的存在, 从而也进一步证实正交偶极分形结构的透射曲线的两个增强峰是自身的结构所致, 即正交偶极分形结构自相似性的存在。

## 参 考 文 献

- 1 B. Mandelbrot. The Fractal Geometry of Nature[M]; New York, W. H. Freeman and Co., 1983
- 2 K. J. Vinoy, K. A. Jose, K. K. Varadan *et al.*. Hilbert curve fractal antenna: a small resonant antenna for VHF/UHF applications[J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2001, **29**: 245~249
- 3 J. Romeu, Y. Rahmat Samii. Dual band FSS with fractal elements[J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**: 702~703
- 4 J. Romeu, Y. Rahmat Samii. Fractal FSS: A novel dual-band frequency selective surface[J]. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2000, **48**: 1097~1105
- 5 J. P. Gianvittorio, J. Romeu, Y. Rahmat Samii. Self-similar prefractal frequency selective surface for multiband and dual-polarized application[J]. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2003, **51**: 3088~3096
- 6 M. Ali, G. J. Hayes, H. S. Hwang *et al.*. Design of a multi-band internal antenna for third generation mobile phone handsets[J]. *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, 2003, **51**: 1452~1461
- 7 J. P. Gianvittorio, Y. Rahmat Samii. Fractal antennas: A novel antenna miniaturization technique, and applications[J]. *IEEE Ant. and Propag. Magazine*, 2002, **44**: 20~36
- 8 C. Puente, J. Romeu, R. Pous *et al.*. Small but long Koch Fractal monopole[J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(1): 9~10
- 9 D. H. Werner, R. L. Haupu *et al.*. Fractal antenna engineering: the theory and design of Fractal antenna arrays[J]. *IEEE Antenna and Propagation Magazine*, 1999, **41**(5): 34~39
- 10 Chen Yihang. Multichannel thin-film optical filters with fractal characteristic[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1079~1082
- 陈溢杭. 具有分形特征的多通道薄膜光学滤波器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1079~1082
- 11 D. H. Werner, D. Lee. Design of dual-polarised multiband frequency selective surface using fractal elements[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(6): 487~488

- 12 R. P. Drupp, J. A. Bossard, Y. H. Ye *et al.*. Dual-band infrared single-layer metalodielectric photonic crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(10): 1835~1837
- 13 Cao Zhaoliang, Lu Zhenwu, Li Fengyou *et al.*. Diffractive characteristics of antireflective dielectric gratings with subwavelength periodic structure[J]. *Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(7): 694~697  
曹召良, 卢振武, 李凤有 等. 亚波长周期结构抗反射介质光栅的衍射特性[J]. 光电子·激光, 2003, **14**(7): 694~697
- 14 Yi De'er, Yan Yingbai, Tan Qiaofeng *et al.*. Study on broadband achromatic quarter-wave plate by subwavelength gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5): 405~408  
伊德尔, 严瑛白, 谭峭峰 等. 亚波长光栅用于实现宽光谱消色散 1/4 波片的研究[J]. 中国激光, 2003, **30**(5): 405~408
- 15 Sun Mei, Xu Degang, Xing Suxia *et al.*. Study on optical properties of subwavelength electromagnetic materials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 224~227  
孙 梅, 徐德刚, 邢素霞 等. 亚波长环形电磁结构的光学特性研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(1): 224~227
- 16 Zhang Liang, Li Chengfang. Polarization effect of 150 nm subwavelength aluminum wire grating in near infrared[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 467~471  
张 亮, 李承芳. 150 nm 亚波长铝光栅的近红外偏振特性[J]. 中国激光, 2006, **33**(4): 467~471
- 17 Z. Y. Li, L. L. Lin. Photonic band structures solved by a plane-wave-based transfer-matrix method[J]. *Phys. Rev. E.*, 2003, **67**(4): 046607
- 18 Z. Y. Li, K. M. Ho. Application of structural symmetries in the plane-wave-based transfer-matrix method for three-dimensional photonic crystal waveguides[J]. *Phys. Rev. B.*, 2003, **68**(24): 245117
- 19 R. P. Drupp, J. A. Bossard, Y. H. Ye *et al.*. Dual-band infrared single-layer metalodielectric photonic crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(10): 1835~1837