

文章编号: 0253-2239(2010)01-0224-04

# 亚波长环形电磁结构的光学特性研究

孙 梅<sup>1</sup> 徐德刚<sup>2</sup> 邢素霞<sup>1</sup> 姚建铨<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 北京工商大学信息工程学院, 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** 利用聚焦离子束(focused ion beam, FIB)刻蚀方法在 120 nm 厚的金膜上制备了实验测量样品。再用实验的方法测量了在可见光波段及近红外波段的透射曲线,当样品具有相同的晶格常数以及空气孔直径时,环形空气孔结构,不仅具有六重旋转对称性还具有中心对称性,它的最大透射率大约是正方晶格空气孔的 5 倍。亚波长环形空气孔结构透射增强峰的在可见光波段,而正方晶格空气孔的透射增强峰在近红外波段,样品的透射强度和透射增强峰的位置各不相同,证明了结构的旋转对称性对透射曲线的影响。

**关键词** 表面光学;聚焦离子束刻蚀方法;环形空气孔结构;旋转对称性;亚波长

中图分类号 O482.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103001.0224

## Study on Optical Properties of Subwavelength Electromagnetic Materials

Sun Mei<sup>1</sup> Xu Degang<sup>2</sup> Xing Suxia<sup>1</sup> Yao Jianquan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Information Engineering, Beijing University of Technology and Business, 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 Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, China

**Abstract** By mean of focused ion beam (FIB) etching, the samples were prepared on a 120 nm-thick gold film. The comparison of optical transmission shows that the circular hole arrays, which possesses the six-fold rotational symmetry and central symmetry, has higher transmittance than the two periodic structures'. Its peak efficiency is about five times larger than that of the square hole arrays. It can be attributed to the stronger constructive interference of multiple scattered waves in a higher symmetrical hole structure. The position of the enhanced peak for the circular hole arrays locates in the visible region, while that of square hole arrays is in the infrared region.

**Key words** surface optics; focused ion beam etching; circular hole arrays; rotational symmetry; subwavelength

## 1 引 言

表面等离子体激元(SPP)是由 Ritchie<sup>[1]</sup> 在 20 世纪 60 年代首先提出来的,它是局域在金属表面的一种由自由电子和光子相互作用形成的混合激发态<sup>[2]</sup>。在光滑金属薄膜表面上 SPP 无法直接和光耦合,因为不能同时保持能量  $E$  和动量  $K$  的守恒,也就是说 SPP 的波矢大于光波的波矢,这是 SPP 的短波特性。

1998 年 Ebbesen 等<sup>[3]</sup> 提出了金属薄膜上亚波长空气孔结构的异常透射现象,这是一个复杂并且

非常有意义的课题,引起了国内外科研工作者们极大的关注。在金属薄膜表面利用微加工的手段,制作一些具有二维周期性排列的亚波长微纳米结构,使得透射光有反常增强的现象<sup>[3~5]</sup>,即透射光强度不仅远高于经典衍射理论计算结果,而且大于按照空气孔所占金属表面的面积比计算结果,并且透射曲线的峰值位置与周期性结构的周期、周围介质的介电常数、金属膜的厚度以及入射光的角度等<sup>[6~13]</sup>。这是因为周期性排列的结构为入射光提

收稿日期: 2008-12-08; 收到修改稿日期: 2009-06-08

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 光子晶体传输特性等方面的研究。

E-mail: smcxh123@163.com

供了光栅耦合的机会,也就是说,周期导致能带折叠,形成轮廓明显的表面等离子体带隙结构,这一点和晶体物质中电子带隙结构的形成相类似。

目前大多数的工作主要是致力于对这种现象物理机制的解释,尽管还不能阐明实验中所有现象并为所有的研究者接受,但这种现象必将在近场光学和纳米光刻等领域中得到广泛的应用。

## 2 样品的制备

近几年来,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。光和金属微结构的相互作用,会产生一些新的物理现象,实现新的器件功能。特别是现代微加工技术的成熟与发展,人们可以在光学厚度的金属薄膜(如金、银、铝等)上面制作亚波长的纳米结构<sup>[14,15]</sup>,这些具有亚波长纳米结构的材料,会呈现出与大块材料完全不同的性质。研究纳米尺寸效应的关键是实现纳米尺度的结构和器件。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。亚波长金属微结构在微电子、光电子、通信、信息、生物医学、航空航天以及深空探测等领域有着广阔的应用前景。

聚焦离子束(FIB)技术是在电场和磁场的作用下,将离子束聚焦到亚微米甚至纳米量级,通过偏转系统和加速系统控制离子束,实现微纳米图形的监测分析和纳米结构的无掩膜加工<sup>[16]</sup>。它用聚焦离子束代替了扫描电镜(SEM)及透射电镜(TEM)中质量较轻的电子束,使传统的显微分析观察和微加工技术的接合有了新的突破。FIB技术的主要优点是以很高的精度实现复杂的微结构,但是微结构的尺寸受限于加工间、较低的加工速度是FIB技术的最大缺点,另外,在加工过程中引入的离子注入和污染等问题也是需要考虑的。典型的FIB设备包括液态金属离子源、离子柱系统、二次粒子探测器、多轴移动样品台、真空系统、电子控制面板和计算机控制系统等硬件部分。FIB的功能主要有定点切割、选择性材料蒸镀、选择性刻蚀和刻蚀终点探测等。图1给出的是美国FEI公司的DB235型聚焦离子束刻蚀系统。

本文利用中国科学院物理所微加工实验室的聚焦离子束刻蚀方法制备了实验测量样品,SEM如图2所示,在0.8 mm厚的石英基底上用真空蒸镀的方法镀120 nm厚的金膜。样品空气孔的直径 $d=350$  nm。金属膜上的亚波长环形空气孔结构是由



图1 DB235型聚焦离子束刻蚀系统

Fig. 1 DBS235 focused ion beam etching system

11个具有不同半径的同心圆组成的,这些圆环之间的距离是相等的,均为 $R=1\ \mu\text{m}$ ,也就是说如果第一个圆环的半径为 $R$ ,那么第 $n$ 个圆环的半径为 $nR$ 。同样地,如果第一个圆环上空气孔的个数为 $m$ ,那么第 $n$ 个圆环上空气孔的个数则为 $mn$ ,其中 $m, n$ 均为整数。众所周知,旋转对称性作为点阵结构的基本特性,它对周期性排列的空气孔的光学特性也有很大的影响。在二维的晶体结构中,有5类旋转对称性,根据旋转轴分别用符号1,2,3,4和6来表示<sup>[17]</sup>。由样品的结构可以清楚的看到,对于正方晶格和六角晶格的空气孔,它们分别具有四重和六重旋转对称性。

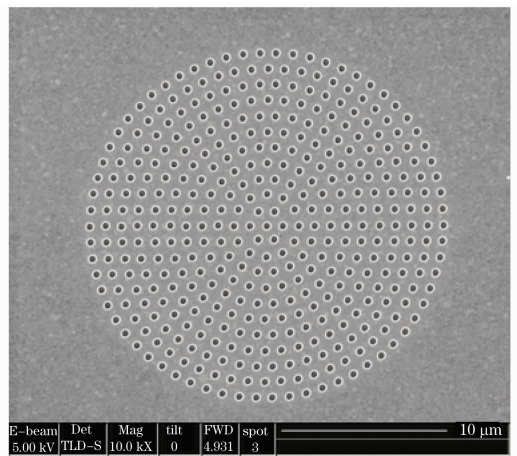


图2 环形空气孔 SEM图

Fig. 2 SEM image of circular hole arrays

## 3 样品的测量

实验中选用功率50 W的卤灯作为光源,选用卤灯作为光源的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近红外波段,可以测得样品的完整透射谱线。由光源发出的光被斩波器(chopper)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,再通过一短焦距透镜引入单色仪。单色仪的输出信号由探测器进行放大后输出,探测器输出的电压信号接入锁相放大器的

信号输入端, chopper 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 所示的是实验测量装置示意图。

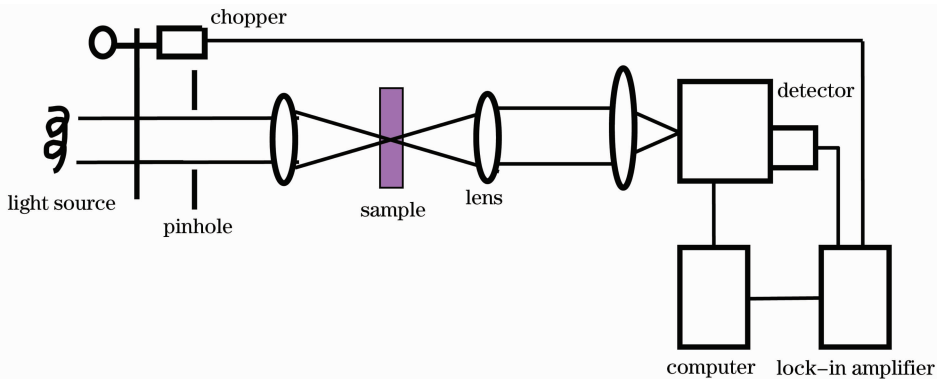


图 3 样品测量示意图

Fig. 3 Schematic of the sample measuring system

样品透射率是这样得出的: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,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。

## 4 结果与分析

实验测量中,环形空气孔的探测器为光电倍增管(波长范围 400~900 nm),而正方晶格和六角晶格探测器的探测范围为近红外,即 0.9~2.2  $\mu\text{m}$ 。图 4 给出的是环形空气孔的透射曲线,在 511 nm 和 712 nm 波长处有两个较强的透射峰,透射率分别为 10% 和 35%。如果考虑这种结构中空气孔的占空比  $f=10\%$ ,那么在 712 nm 波长处的透射率是平均透射率的 3.5 倍。为了比较,又测量了正方晶格空气孔结构的透射曲线,正方晶格的结构参数:晶格常

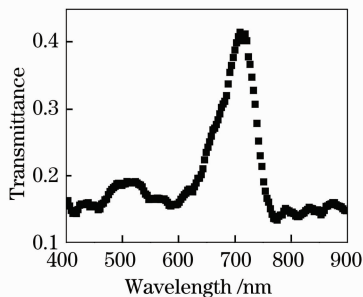


图 4 环形空气孔结构的透射曲线

Fig. 4 Measured transmission spectrum of the circular hole structure

数  $a=1 \mu\text{m}$ , 空气孔的直径  $d=350 \text{ nm}$ , 石英基底的厚度为 0.8 mm, 金膜 120 nm。如图 5 所示(■线),在近红外波段 1170 nm 和 1580 nm 处也存在两个透射增强峰,其透射率分别为 3% 和 6%。图 5 同时给出了利用传输矩阵方法对正方晶格空气孔的模拟结果(●线)<sup>[18]</sup>,在 1140 nm 和 1550 nm 处的透射率分别为 4% 和 7%。这和实验测量结果吻合的比较。

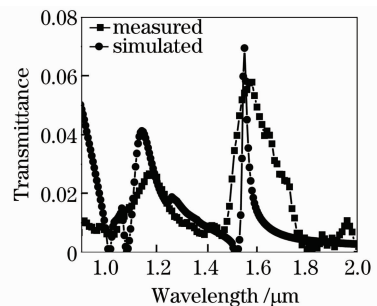


图 5 正方形空气孔结构的透射曲线

Fig. 5 Transmission spectrum of the square hole structure

二维周期性排列的结构,当入射光垂直照射时,其共振波长可用  $\lambda_{\text{max}} = a(i^2 + j^2)^{-1/2} \left( \frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m} \right)^{1/2}$  来表示,其中  $a$  为晶格常数,  $\epsilon_d \epsilon_m$  分别为基底或者介质(例如空气)和金属膜的介电常数,  $i, j$  均为整数。然而,环形空气孔结构相对来说是一个更加复杂的结构,不能用一个固定的公式给出它的倒格矢,但是由实验测量结果可以看出它的透射曲线最大值和最小值的位置以及透射强度与正方晶格空气孔是各不相同的。当入射光垂直照射到金属表面时被空气孔的

点阵散射且在空间相互干涉,均匀衍射模被反射而衰减模被局域在金属表面。由于在实验测量中所使用的入射光不是偏振光,衰减模可以在金属表面沿着任何一个方向传播并能受到二级散射的作用。点阵中的空气孔受到周围空气孔的散射作用,特别是那些与它之间距离最短的那些空气孔。所以,空气孔结构的旋转对称性愈高,空气孔周围的场就愈强,所以透射曲线增强峰的透射率也就愈大。具有六重旋转对称性的六角晶格空气孔(晶格常数  $a=1\ \mu\text{m}$ , 空气孔的直径  $d=350\ \text{nm}$ )的透射率大约是具有四重旋转对称性的正方晶格空气孔的 2 倍,而环形空气孔结构,它不仅具有六重旋转对称性还具有中心对称性,它的最大透射率大约是六角晶格空气孔的 2.5 倍。因此,通过实验再一次证明了空气孔结构的旋转对称性在表面等离子体增强透射过程中也起着非常重要的作用。作为比较,我们还测量了环形空气孔结构在近红外波段的透射曲线,在  $800\sim 2200\ \text{nm}$  的近红外波段,它是一条平滑的曲线,没有任何透射增强峰出现,所以环形空气孔独特的结构造成它与周期排列空气孔结构的不同,通过实验也再一次证明,亚波长结构的透射增强现象不仅在周期性结构中存在,环形空气孔这样的准周期性结构也能得到异常透射现象,甚至后者的透射强度会更高。最主要的一点是如何设计正确的空气孔结构来增强高阶散射波之间的干涉作用。

## 5 结 论

利用微加工的手段,制作了环形空气孔的样品,然后用实验的方法测量了在在可见光波段及近红外波段的透射曲线,并且与正方晶格空气孔透射曲线相比较,当样品具有相同的晶格常数以及空气孔直径时,样品的透射强度和透射增强峰的位置各不相同,证明了结构的旋转对称性对透射曲线的影响。

## 参 考 文 献

- 1 H. Raether. Surface Plasmons [M]. Ed. Hohler. Berlin: Springer, 1998
- 2 R. H. Ritchie. Plasmon losses by fast electrons in thin film[J]. *Phys. Rev.*, 1957, **106**(12): 874~881
- 3 T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi *et al.*. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, **391**(12): 667~669
- 4 H. F. Ghaemi, T. Thio, D. E. Grupp *et al.*. Surface plasmons enhance optical transmission through subwavelength holes[J]. *Phys. Rev. B*, 1998, **58**(11): 6779~6782
- 5 A. Krishnan, T. Thio, H. J. Lezec *et al.*. Evanescently coupled resonance in surface plasmon enhanced transmission[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **200**(1): 1~7
- 6 N. Bonod, S. Enoch, L. Li *et al.*. Resonant optical transmission through thin metallic films with and without holes[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(5): 482~490
- 7 V. M. Vigoureux. Analysis of the ebbesen experiment in the light of evanescent short range diffraction[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **198**(4-6): 257~263
- 8 A. Degiron, H. J. Lezec, W. L. Barnes *et al.*. Effects of hole depth on enhanced light transmission through subwavelength hole arrays[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(23): 4327~4329
- 9 A. Degiron, H. J. Lezec, N. Yamamoto *et al.*. Optical transmission properties of a single subwavelength aperture in a real metal[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **239**(1-3): 61~69
- 10 M. Sun, R. J. Liu, Z. Y. Li *et al.*. The influence of hole shape in enhanced transmission through subwavelength hole arrays[J]. *Chin. Phys.*, 2006, **15**: 1591~1594
- 11 M. Sun, J. Tian, Z. Y. Li *et al.*. The role of periodicity in enhanced transmission through subwavelength hole arrays[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(2): 486~488
- 12 F. I. Baida, D. Van Labeke. Light transmission by subwavelength annular aperture arrays in metallic films[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **209**(1-3): 17~22
- 13 H. J. Lezec, A. Degiron, E. Devaux *et al.*. Beaming light from a subwavelength aperture[J]. *Science*, 2002, **297**(5582): 820~822
- 14 Cao Zhaoliang, Lu Zhenwu, Li Fengyou *et al.*. Diffractive characteristics of antireflective dielectric gratings with subwavelength periodic structure [J]. *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
- 15 Yi Deer, 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
- 16 Meng Xiangfeng, Li Lifeng. Methods for increasing sidewall steepness of reactive ion-beam etched, sub-micrometer-period gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 189~193
- 孟祥峰, 李立峰. 提高离子束刻蚀亚微米光栅侧壁陡直度的方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 189~193
- 17 C. Kittel. Introduction to Solid State Physics[M]. Chichester: Wiley, 1996
- 18 Z. Y. Li, L. L. Lin. Photonic band structure solved by a plane-wave-based transfer-matrix method[J]. *Phys. Rev. E*, 2003, **67**(4): 46607