

文章编号:1004-4213(2010)09-1602-4

周期排列的 H-空气槽光学特性研究*

孙梅¹, 邢素霞¹, 陈媛媛¹, 徐德刚²

(1 北京工商大学 计算机与信息工程学院, 北京 100048)

(2 天津大学 精仪学院激光与光电子研究所, 天津 300072)

摘要:利用电子束直写系统和反应离子束刻蚀的方法制作了周期性排列 H-形空气槽. 样品的参量:金膜的厚度为 120 nm, 石英基底的厚度 0.8 mm(其中有 5 nm 厚的铬层), 样品是由 30×30 个单个 H-形周期排列形成的, 总体尺寸为 $40 \times 40 \mu\text{m}^2$. 每个 H-形之间的周期为 $1.1 \mu\text{m}$, H-形的臂长均为 500 nm, 空气槽的宽度为 120 nm. 然后用实验的方法测量了在近红外波段的透过曲线, 在近红外波段 $1.6 \mu\text{m}$ 处的透过率约为 16.3%, 用传输矩阵的方法对 H-形空气槽结构进行了理论模拟, 实验与理论模拟结果吻合较好. 随后研究了当入射光的偏振方向与 H-形结构的长轴之间的夹角分别为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 时透过曲线的变化情况. 通过实验和理论表明, 表面等离子体在这种特殊的结构中仍然存在, 并且在光的增强透过起着决定性的作用.

关键词:亚波长, 聚电子束直写系统; H-形空气槽

中图分类号: O485, O433.4 **文献标识码:** A

doi: 10.3788/gzxb20103909.1602

0 引言

表面等离子体 (Surface Plasmons, SPs) 是由 Ritchie 在 20 世纪 60 年代提出来的^[1], 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^[2]. 在相互作用中, 自由电子与那些具有相同共振频率的光波发生集体振荡. 该表面电荷振荡与光波电磁场之间的相互作用就构成了具有独特性质的 SPs.

在近红外和可见光波段, 金属材料在光照激发条件下, 存在着复杂的表面等离子体振荡现象. 表面等离子体波可以在光滑或粗糙的金属薄膜表面传播, 作为一种电磁波局域化模式, 其传播行为可以用简单的色散关系来描述, 主要取决于金属材料的介电常数. 当金属薄膜表面利用微加工手段做上周期性几何图案时, 表面等离子体的传播受到 Bragg 散射作用, 出现许多新的物理现象, 如光子能带和光子带隙. 近年来, 国际上对此种新型材料做了一些理论和实验上的研究. 虽然目前对一些物理机理还不能做出合理的解释, 但是人们已经从各个方面进行了深入的研究, 特别是对影响其光学特性的各个参量的研究, 并且提出了各种各样的模型.

1998 年, Ebbesen 阐述了金属薄膜上亚波长空气孔结构的异常透过现象^[3], 引起了国内外科研工

作者们极大的关注^[4-9]. 在亚波长光学, 控制光的传输方向依赖于两个主要因素: 形状和周期. 一方面, 利用亚波长结构的形状生成局域场、改变局域共振的波谱. 另一方面, 亚波长结构的周期性用来在光子或等离子体的色散关系中产生带隙. K. J. Klein 等已经证明周期性排列的长方形和圆形空气孔的透过曲线随空气孔形状的变化而变化^[10], 比如增强峰的位置和曲线的形状等, 并且提出用空气孔的“形状共振”来解释了这种变化. 而 A. Degiron 等指出所谓的“形状共振”, 就是局域表面等离子体 (Localized Surface Plasmon, LSP) 在起作用^[11]. 主要从理论和实验两方面研究 H-形空气槽中也存在光的增强透过现象, 并对近红外波段的光学特性进行了分析.

1 样品的制备

在垂直于金属薄膜表面的方向上, 电场强度是呈指数规律衰减的. 因此, 表面等离子体的电场强度在金属薄膜表面时具有最大值. 在可见光和近红外波段, 光波不能直接与光滑金属表面上等离子体耦合 (光被反射或散射), 其原因可以从色散曲线上来解释, 如图 1, 图中 SPs 的波矢大于光波的波矢, 即 SPs 的短波特性的. 然而, 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结构, 周期使能带折叠, 形成轮廓明显的表面等离子体带隙结构, 这和晶体物质中电子带隙结构的形成类似.

* 国家自然科学基金 (2007CB310403) 资助

Tel: 010-68985506

Email: smcxh123@163.com

收稿日期: 2010-03-02

修回日期: 2010-05-20

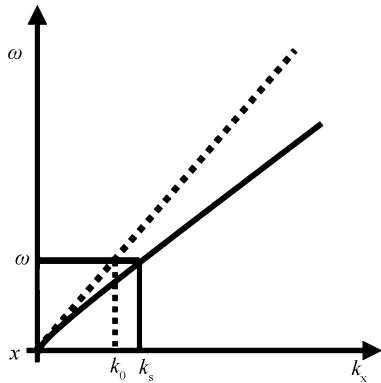


图1 SPs与光波的色散曲线
Fig. 1 Dispersion curve for SPs

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^[12].现代微加工技术的成熟与发展可以在光学厚度的金属薄膜(如金、银、铝等)上制作亚波长的纳米结构^[13-16],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,这些特异的性质具有广阔的实际应用和理论研究前景.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.

电子束曝光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PC机控制.

利用中科院物理所微加工实验室的电子束直写系统(Electron Beam Lithography, EBL)和反应离子束刻蚀(Reactive Ion Etching System, RIE)的方法制作了周期性排列 H-形空气槽,SEM 如图 2.样品的参量:金膜的厚度为 120 nm,石英基底的厚度 0.8 mm(其中有 5 nm 厚的铬层),样品总体尺寸为 $40 \times 40 \mu\text{m}^2$,是由 30×30 个单个 H-形周期排列形成的.每个 H-形之间的周期为 $1.1 \mu\text{m}$,H-形的臂长均为 500 nm,空气槽的宽度为 120 nm.此时 H-空气槽的占空比为 0.148.

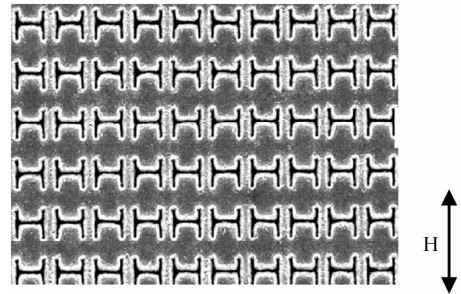


图2 周期性排列的 H-形空气槽 SEM 图
Fig. 2 SEM image of the periodic array of H-shaped structure

2 结果分析

首先测量了 H-形空气槽样品的透过曲线,如图 3.在光路中加入了起偏器和检偏器,得到了入射光为垂直于长轴方向的偏振光(定义图中箭头的方向为长轴方向).根据实验样品的参量设置,选用近红外探测器,探测的波长范围为 $0.8 \sim 2.2 \mu\text{m}$,最大透过率的波长在 $1.2 \mu\text{m}$ 处.图 3 中的实线为实验测量结果,在近红外波段 $1.6 \mu\text{m}$ 处的透过率约为 16.3%.如果考虑这种结构中空气孔的占空比 $f = 14.8\%$,那么在 $1.6 \mu\text{m}$ 波长处的透过率大于 1.所以通过实验证明,在周期性排列的 H-形空气槽结构中,SPs 在增强透过中也起着决定性的作用.然后,用传输矩阵的方法对 H-形空气槽结构进行了理论模拟.如图 3 中虚线,在波长为 $1.58 \mu\text{m}$ 处有一透过率为 24% 的透过增强峰,与实验测量结果相比较,理论模拟向短波长方向移动了 20 nm 并且透过强度要明显高于实验测量结果.这与用扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)确定样品的参量以及利用传输矩阵方法理论模拟的理想性分不开,差别也在误差允许范围之内.

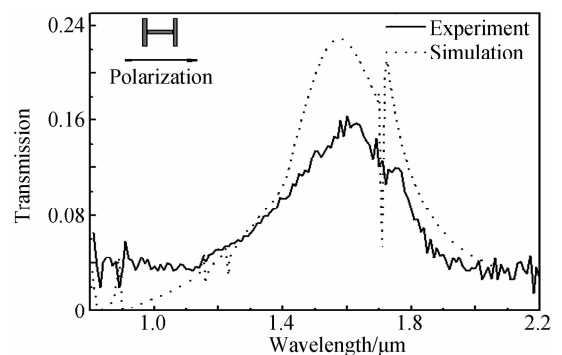


图3 H-形空气槽透过曲线
Fig. 3 Transmission spectrum of H-shape structure

周期性排列的 H-形空气槽的透过曲线随入射光偏振方向的变化而变化,这一点与结构本身的各向异性相一致.如图 4 给出的是当入射光的偏振方向与 H-形结构的长轴(如图 2 箭头方向)之间的夹角分别为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 时透过曲线的变化

情况. 首先, 透过强度随角度的增大而减小. 其次, 透过峰由透过较强且较宽的峰分裂成一系列的较窄且小的峰. 为了比较, 也测量了光滑金膜在 $0.8 \sim 2.2 \mu\text{m}$ 波段的透过情况(图 4 中最下面的实线). 与其它的透过曲线比较, 光滑金薄膜的透过曲线相对来说较为光滑, 其中, 微小的波动是由于实验装置中的噪音造成的. 图中的插页是用传输矩阵的方法计算的当入射光的偏振方向与 H-形结构的最长轴之间的夹角为 90° 时的透过曲线, 看到透过曲线上有一些透过较强且非常尖锐的峰出现(峰的宽度小于 5 nm), 而在实验测量中, 这些尖锐的峰被湮灭了, 本文把实验测量与理论模拟的不一致归因于探测器的分辨率不够灵敏, 对于宽度仅有 5 nm 的透过峰, 探测器是无法分辨开来的. 并且由于在样品的制备过程中, 由于制作工艺的复杂性和不可控制性, 用于实验测量的样品在结构上难免会存在着不均匀性, 这些因素都会造成实验测量与理论计算的差别. 类似于这种透过曲线随偏振变化在平行排列的光栅中已经从实验和理论两方面得到了证明^[17-18].

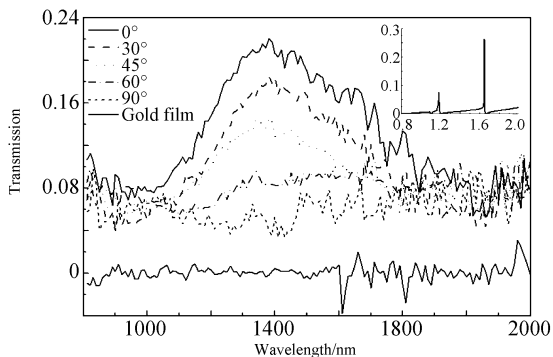


图 4 H-形空气槽随偏振变化的谱线

Fig. 4 Transmission spectra of H-shaped arrays for various polarization angles

3 结论

利用微加工的手段, 首先制作周期性排列的 H-形空气槽样品, 然后用实验的方法测量了在在近红外波段的光学特性, 并且研究了入射光随偏振光的变化. 经实验和理论证明: 表面等离子体对透过光增强起决定性的作用. 通过传输矩阵(Transfer Matrix Method, TMM)法进行了理论模拟, 结果与实验测量吻合的比较好.

参考文献

[1] RAETHER H. Surface plasmons[M]. Berlin: Springer, 1998.
 [2] RITCHIE R H. Plasmon losses by fast electrons in thin film [J]. *Phys Rev*, 1957, **106**(5): 874-881.
 [3] EBBESEN T W, LEZEC H J, GHAEMI H F, *et al.* Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, **391**(12): 667-669.

[4] MATTEO J A, FROMM D P, YUE Y, *et al.* Spectral analysis of strongly enhanced visible light transmission through single C-shaped nanoapertures [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, **85**(4): 648-650.
 [5] DEGIRON A, LEZEC H J, YAMAMOTO N, *et al.* Optical transmission properties of a single subwavelength aperture in a real metal[J]. *Opt Commun*, 2004, **239**(1-3): 61-69.
 [6] SUN Mei, XU Deng-gong, YAO Jin-quan. Influence of lattice symmetry and hole shape on the light enhanced transmission through the subwavelength hole arrays[J]. *Optoelectron Lett*, 2009, **5**(4): 317-320.
 [7] BAIDA F, van LABEKE D. Light transmission by subwavelength annular aperture arrays in metallic films[J]. *Opt Commun*, 2002, **209**(1-3): 17-22.
 [8] GAODON R, BROLO AG, MCKINNON A, *et al.* Strong polarization in the optical transmission through elliptical nanohole arrays[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, **92**(3): 037401.
 [9] GHAEMI H F, THIO T, GRUPP D E, *et al.* Surface plasmons enhance optical transmission through subwavelength holes[J]. *Phys Rev B*, 1998, **58**(11): 6779-6782.
 [10] KOERKAMP K J, ENOCH J S, SEGERINK F B, *et al.* Strong influence of hole shape on extraordinary transmission through periodic arrays [J]. *Phys Rev Lett*, 2004, **92**(3): 183901.
 [11] DEGIRON A, EBBESEN T W. The role of localized surface plasmon modes in the enhanced transmission of periodic subwavelength apertures[J]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2005, **7**(2): S90-S96.
 [12] ZHANG Dian-wen, LU Zhen-wen, CAO Zhao-liang, *et al.* Analysis of the surface shape in solid etching process[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(7): 888-893.
 张殿文, 卢振武, 曹召良, 等. 刻蚀表面面形的分析[J]. *光子学报*, 2002, **31**(7): 888-893.
 [13] FENG Shuai, WANG Yi-quan, LI Zhi-yuan, *et al.* Controlling the focusing properties of a triangular-lattice metallic photonic-crystal slab[J]. *Chin Phys*, 2007, **16**(6): 1689-1693.
 [14] CAO Zhang-liang, LU Zhen-wu, LI Feng-you, *et al.* Analysis of fabrication error of subwavelength dielectric gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 76-79.
 曹召良, 卢振武, 李凤有, 等. 亚波长介质光栅的制作误差分析 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(1): 76-79.
 [15] SUN Mei, XU Deng-guang, XING Su-xia, *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] ZHAO Hua-jun. Blazed characteristics of subwavelength dielectric gratin [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2413-2417.
 赵华君. 亚波长介质光栅的闪耀特性分析[J]. *光子学报*, 2008, **37**(12): 2413-2417.
 [17] SANG Tian, WANG Zhan-shan, WU Yong-gang. Research on guide-mode resonance for sub-wavelength dielectric grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 641-645.
 桑田, 王占山, 吴永刚, 等. 亚波长介质光栅导模共振研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5): 641-645.
 [18] GAY-BALMAZ P, MACCIO C. Microwire arrays with plasmonic response at microwave frequencies[J]. *Appl Phys Lett*, 2002, **81**(15): 2896-2898.

Enhanced Transmission Through Periodic H-shaped Arrays

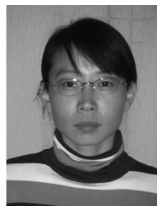
SUN Mei¹, XING Su-xia¹, CHEN Yuan-yuan¹, XU De-gang²

(1 *School of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China*)

(2 *College of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: An enhanced near infrared transmission through periodic H-shaped arrays in metallic thin films is presented. The sample is fabricated by electron beam lithography and reactive ion etching system. The 0.5-mm-thick quartz substrate is deposited with a 120-nm-thick Au film and a 5-nm-thick chromium adhesion layer. The overall size of the sample is about $40 \times 40 \mu\text{m}^2$, which is composed of 30×30 periodic H-shaped arrays. The period of the H-shaped lattice is $1.1 \mu\text{m}$. The arm length of H-shaped is 500 nm and the line width is 120 nm. A broad transmission band centered at about $1.6 \mu\text{m}$ is found and the transmission coefficient can be as high as about 16.3% for a line width of 120 nm. A simulation by using transfer matrix method (TMM) reproduces quite well the obtained transmission spectrum. Polarization measurements of H-shaped arrays are also demonstrated. The results prove the important role of localized surface plasmon (LSP) in enhanced transmission through the special structure.

Key words: Subwavelength holes; EBL; H-shaped arrays



SUN Mei was born in 1976. She received her Ph. D. degree from Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences. Now she is a lecturer and her current research interests focus on photonic crystal and THz optics.