

周期结构金属薄膜的奇异光学性质

姚 洁, 叶永红

(南京师范大学 物理科学与技术学院, 江苏 南京 210097)

[摘要] 二维亚波长周期结构金属薄膜具有光透过率异常增强的现象, 某些情况下, 这种薄膜的峰值透过率比根据传统小孔理论计算的预测值高 3 个量级. 这种结构的金属薄膜在光印刷、近场显微镜和光子器件等方面有着广泛的应用前景, 近年来引起了人们的重视. 根据目前的实验研究报道, 这种周期结构金属薄膜通常利用聚焦离子束刻蚀工艺来获得, 器件的光学响应在可见光波段和近红外波段. 利用镂空模板法制备了周期结构金属薄膜. 实验表明, 制得的器件在红外波段也具有透过率异常增强的现象, 且利用这种方法易于获得大面积对称结构和串联结构的器件.

[关键词] 周期结构金属薄膜, 红外波段, 表面等离子激元波

[中图分类号] O439 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2006)04-0059-03

Extraordinary Optical Properties of Periodically Perforated Metal Films

YAO Jie YE Yonghong

(School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract Metal films with two-dimensional periodic arrays of sub-wavelength apertures can exhibit extraordinary optical transmission. In some cases, the transmission enhancement can be three orders of magnitude greater than what is predicted by the standard aperture theory. There has been a great interest in such structured films due to its potential applications in photolithography, near field microscopy and photonic devices. In most of the experiments reported to date, the perforated metal films were fabricated by the focused-ion-beam method, and their transmission enhancement was in the visible and near-infrared regions. According to our research, a stencil mask method can be used to fabricate such perforated metal films. Our experiments demonstrated that the devices made with this method can also induce transmission enhancement in the middle-infrared region. Moreover, large-scale and the cascaded structures can be easily obtained by our method.

Key words periodically perforated metal film, middle-infrared region, surface plasmon polaritons (SPPs)

0 引言

周期结构金属薄膜具有透过率异常增强的现象^[1-5]. 在某些情况下, 这种薄膜的峰值透过率可达百分之几甚至几十, 高于根据传统小孔理论计算的预测值数个量级. 虽然对产生这种奇异现象的具体机理还在研究中, 但人们普遍认为这是由于金属薄膜表面激发出的表面等离子激元波 (Surface Plasmon Polaritons, SPPs) 引起了透过率的异常增强. 由于这种周期结构金属薄膜在雷达、卫星通讯、亚波长光学、高密度磁光数据存储、生物探测和集成光路的微型化等方面有着广泛的应用前景, 近年来愈来愈引起人们的重视. 目前, 这种周期结构金属薄膜通常是通过使用聚焦离子束刻蚀工艺对金属薄膜进行刻蚀来获得, 而且器件的光学响应在可见光波段. 我们提出了用镂空模板 (stencil mask) 法^[2] 制备“等离激元晶体”的新型制备工艺. 研究表明, 周期结构金属薄膜在红外波段也具有透过率异常增强现象. 此外, 利用这种方法易于获得大

收稿日期: 2006-09-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90401024).

作者简介: 姚 洁 (1977-), 助教, 主要从事光电技术和光电功能材料的教学与研究. E-mail: yaojie@njjnu.edu.cn

通讯联系人: 叶永红 (1968-), 教授, 博士生导师, 主要从事光电技术和光电功能材料的教学与研究. E-mail: yenyjnu@yahoo.com.cn

2 实验结果分析

虽然,关于透光率异常增强的机理还不是完全清楚,但光透过有孔金属膜多层结构时大体包含以下 3 个阶段^[1,6]:首先,第一个金属膜表面激发等离子体激元波(SPPs);随后,相邻两表面上相同的 SPPs 模式相互作用;然后,第二个表面上 SPPs 再次发射.显然,相邻两个表面之间 SPPs 的相互作用越强,透光率的增强越大.

由图 1 可知,周期孔状金属薄膜在红外波段有两个透射通带,其中短波带对应位于空气-银界面上的 $(\pm 1, 0)$ 和 $(0, \pm 1)$ 的 SPP 模式,而长波带对应位于 SU-8-银界面上的 $(\pm 1, 0)$ 和 $(0, \pm 1)$ 的 SPP 模式.在图 2 所示的对称结构中,不存在空气-银界面,所以短波带不存在,相邻的 SU-8-银界面上的 SPP 模式发生共振隧穿效应,使得长波带峰值透过率大大增强;在图 3 对应的串联结构中, SU-8-银界面和空气-银界面都存在,所以短波带和长波带都存在,但两个 SU-8-银界面只隔着一层 SU-8 光刻胶,相邻界面上 SPP 模式可以发生共振隧穿效应,使得短波带大大增强.

图 2 和图 3 中都存在透射通带中心位置红移的现象,这可以作如下解释.孤立的原子可以合成为分子,合成后分子的能量与合成前原子能量之和有差异.与之类似,分属于前后表面上的两个 SPP 模式(相当于“原子”)可以耦合成一个“SPP 分子”,一个“SPP 分子”的能量与对应的两个“SPP 原子”的能量之和有差异,这个能量差异对应透光谱中通带中心位置的移动.在图 2 所示的情况中,该能量差异为 11 meV 左右,这是根据图 2 中长波带中心的红移估算出来的.

与非对称结构器件的透过率曲线谱相比,串联结构器件的透过率曲线在长波带右方的背景透过率大为减少.对于背景频率的透射光,不存在 SPPs 的作用.这些波长的透射光来源于以下两个部分:穿过金属膜的光和直接穿过小孔的光.穿过金属膜的光正比于 $\exp(-t/\delta)$, t 是金属膜的厚度; δ 是金属的趋肤深度.对于银,在红外波段 δ 为 20 nm,串联结构中银的厚度总值为 100 nm,所以这部分对透过率的贡献为 0.67%;穿过小孔的光,量级为 $(D/\lambda)^4$, D 是小孔的孔径; λ 是对应光的波长,在长波带以右, λ 很大,这部分可以忽略不计.

3 结论

综上所述,周期结构金属薄膜在红外波段具有透过率异常增强现象,利用镂空模板法制备“等离激元晶体”的新型制备工艺易于获得大面积对称结构和串联结构的器件.此类具有空间对称性的器件可以利用相邻界面之间 SPPs 模式的共振耦合,使得器件峰值透过率可进一步提高.

[参考文献] (References)

- [1] EBBESEN T W, LEZECH J, GHAEMI H F, et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. Nature, 1998, 391: 667-669.
- [2] YE Y H, ZHANG J Y. Middle-infrared transmission enhancement through periodically perforated metal films[J]. Appl Phys Lett, 2004, 84: 2977-2979.
- [3] BAMES W L, DEREUX A, EBBESEN T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. Nature, 2003, 424: 824-830.
- [4] YE Y H. Cascaded metal films perforated with periodical hole arrays[J]. Optics and Photonics News, 2005(12): 39.
- [5] YE Y H, ZHANG J Y. Enhanced light transmission through cascaded metal films perforated with periodic hole arrays[J]. Opt Lett, 2005, 30: 1521-1523.
- [6] DARMANYAN S A, ZAYATSA V. Light tunneling via resonant surface plasmon polariton states and the enhanced transmission of periodically nanostructured metal films: an analytical study[J]. Phys Rev, 2003, B67: 035424-1-035424-7.

[责任编辑: 丁蓉]

