

文章编号: 1000-7032(2016)02-0237-05

含损耗型负介电常数材料的光栅结构透射特性

许 华^{1,2}, 董丽娟^{1,2*}, 刘艳红^{1,2}, 刘丽想^{1,2}, 石云龙^{1,2}

(1. 山西大同大学 固体物理研究所, 山西 大同 037009;

2. 新型微结构功能材料山西省高校重点实验室, 山西 大同 037009)

摘要: 将损耗型负介电常数材料-光子晶体匹配的异质结构作为基本单元排列成周期性结构, 组成一种新型的光栅结构, 利用有限元分析方法计算了该结构的透射特性。通过分别对比不同的光栅周期长度以及异质结构在光栅结构中不同占比对透射率的影响, 确定了光栅结构的透射率与单独的异质结构相比有显著的提高。同时, 通过对电磁场的分析, 解释了该光栅结构透射率提高的物理原因, 这是由光栅结构对电磁场的周期性调制作用导致的。

关键词: 透射特性; 有限元分析; 光栅结构; 负介电常数材料

中图分类号: O436 文献标识码: A DOI: 10.3788/jgxb20163702.0237

Transmission Properties of Grating Structures Containing Lossy Negative Permittivity Material

XU Hua^{1,2}, DONG Li-juan^{1,2*}, LIU Yan-hong^{1,2}, LIU Li-xiang^{1,2}, SHI Yun-long^{1,2}

(1. Institute of Solid State Physics, Shanxi Datong University, Datong 037009, China;

2. Higher Education Key Laboratory of New Microstructure Function Materials in Shanxi Province, Datong 037009, China)

* Corresponding Author, E-mail: donglijuan_2012@163.com

Abstract: We studied the transmission properties of a new grating structures composite of the matching heterostructure units containing lossy negative epsilon materials and photonic crystals by using finite element analysis. The transmittance was analyzed by comparing various grating period length and the different ratio of heterostructure in grating structures, respectively. The above results show that the transmittance of grating structures dramatically increases compare with the single heterostructure. Simultaneously, we expound the physical reason of the enhanced transmittance from the distribution of electromagnetic fields. That is because of the periodic modulation for electromagnetic fields in the new gating structures.

Key words: transmission characteristics; finite element analysis; grating structures; negative permittivity materials

1 引 言

特异材料^[1-2]是一种具有局域共振机制结构的特殊材料, 主要分为单负特异材料和双负特异

材料。单负特异材料又分为负介电常数材料和负磁导率材料。负介电常数材料是指介电常数 $\epsilon < 0$ 、磁导率 $\mu > 0$ 的材料, 金属就是一种典型的损耗型负介电常数材料。负磁导率材料是指介电常数

收稿日期: 2015-10-08; 修订日期: 2015-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(11274207, 11504210, 11504211, 11504212); 教育部科学技术研究重点项目基金(212018); 山西省科技攻关项目(2015031002-2); 山西省自然科学基金(2013011007-2, 2013021010-5); 大同市科技攻关项目(2015015); 大同大学校级青年科研基金(2014Q2)资助项目

$\varepsilon < 0$ 、磁导率 $\mu < 0$ 的材料。负介电常数材料与负磁导率材料组合在一起构成的双层结构会出现共振隧穿效应^[2]。

有文献表明,全介质光子晶体^[3]可以利用有效参数提取法等效为负磁导率材料,它与金属组合成的异质结构会出现共振隧穿现象,利用这种方法可以提高金属的透射性^[4,6]。本文用全介质光子晶体和金属构成异质结构,并在此基础上引入光栅结构,进一步提高结构的透射率^[7,9]。我们将异质结构作为光栅的基本单元周期性排列,构成新型含损耗型负介电常数材料的光栅结构。以往的结构模型通常在金属上做复杂的沟槽结构,与其相比,我们的光栅结构简单,易于制作,更容易实现。本文使用有限元分析软件计算了光栅结构对损耗型异质结构透射率的影响,对比了不同光栅比例对结构透射率的影响,并对其产生机制进行了讨论。另外,计算时选用的金属是一种特殊的磁光金属钴银合金 $\text{Co}_6\text{Ag}_{94}$,这种磁光金属具有非常好的磁光性能,它的磁光常数比磁光介质高 3 个数量级;同时,因为该金属的损耗比金属银的损耗更高,所以研究它的透射特性比金属银更具有普遍性,并且提高它的透射率不仅可以在透射方面有所突破,更对材料的磁光法拉第旋转效应有着更为有利的影响,使该结构可以应用于磁光器件的设计中。

2 异质结构模型

考虑全介质光子晶体 $(AB)_N$ 等效的磁单负材料与金属 M (负介电常数材料) 组合的异质结构^[10],利用虚阻抗和虚相位匹配方法计算光子晶体和金属对应的材料参数与厚度。我们设计了 $(AB)_6M$ 异质结构,该结构示意图如图 1 所示。其中 A 代表 SiO_2 , B 代表 TiO_2 , M 代表金属 $\text{Co}_6\text{Ag}_{94}$,

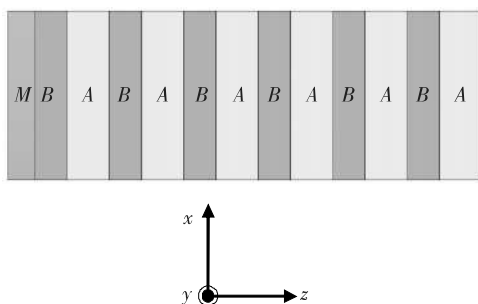


图 1 异质结构 $(AB)_6M$ 示意图

Fig. 1 Schematic of $(AB)_6M$ heterostructure

6 是光子晶体 $(AB)_N$ 的周期数。

本文计算过程中使用的参数为 SiO_2 的折射率 $n_A = 1.443$, TiO_2 的折射率 $n_B = 2.327$, 选取的隧穿波长为 631 nm。 $\text{Co}_6\text{Ag}_{94}$ 的介电常数使用匹配波长 631 nm 处的实际值,无损耗时的 $\text{Co}_6\text{Ag}_{94}$ 的介电常数 $\varepsilon_M = -10$ 。计算得到 SiO_2 、 TiO_2 和 $\text{Co}_6\text{Ag}_{94}$ 的厚度分别为 $d_A = 90$ nm, $d_B = 59.5$ nm, $d_M = 46$ nm。

当异质结构 $(AB)_6M$ 中的金属 M 无色散、无损耗时,用 COMSOL 软件模拟,计算出 400 ~ 800 nm 范围内异质结构的透射率和反射率^[11],如图 2 所示。由图中可以看出,波长 631 nm 处的反射率达到 0,电磁波能量全部进入该异质结构中,出现共振隧穿现象^[2]。

考虑到金属的色散特性,即金属介电常数 ε 会随入射光频率的变化而变化,采用 Drude 模型描述这种色散关系。 $\text{Co}_6\text{Ag}_{94}$ 的介电常数为:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_{\text{cp}}^2}{\omega^2 + i\omega\gamma_e}, \quad (1)$$

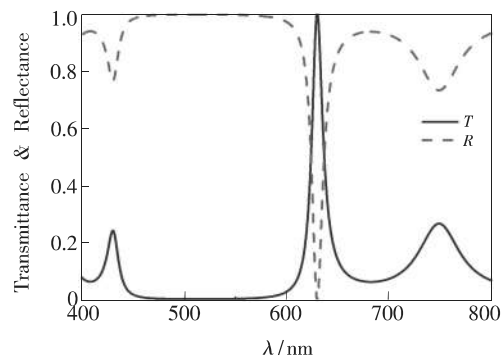


图 2 无损耗时的 $(AB)_6M$ 透射率和反射率

Fig. 2 Transmittance and reflectance of loss-free heterostructure $(AB)_6M$

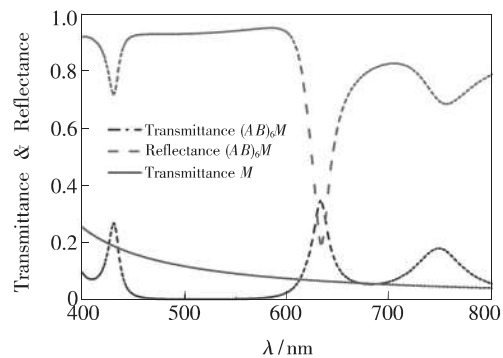


图 3 真实参数下 $(AB)_6M$ 的透射率、反射率以及 M 的透射率。

Fig. 3 Transmittance and reflectance of $(AB)_6M$ and transmittance of M under real parameters

其中 ω_{ep} 是电等离子体频率, γ_e 是损耗系数。 $\omega_{ep} = 1.0086 \times 10^4$ THz, $\gamma_e = 90.77$ THz。

利用有限元分析方法计算, 图3给出了考虑金属的损耗系数时, 真实参数情况下异质结构的透射率和反射率, 以及厚度相同的单层金属 M 的透射率。如图3所示, 异质结构 $(AB)_6M$ 与同样厚度的单层金属 M 相比, 透射率在 631 nm 附近有显著提高。这是由于金属和光子晶体的虚相位和虚阻抗匹配, 在界面上形成了局域共振隧穿。与无损耗时的异质结构透射谱和反射谱相比, 透射率由 1 降低至 0.35。

3 光栅结构模型

以往的研究常倾向于在金属层上做特殊的结构以增强其透射或其他特性, 但在纳米尺度下, 这种刻蚀不易实现。本文将含金属的异质结构作为形成光栅的基本单元, 制成了一种新型含损耗型负介电常数材料的光栅结构。图4为含损耗型负介电常数材料异质结构 $(AB)_6M$ 的光栅结构示意图。其中, a 部分指导质结构 $(AB)_6M$ 所占的长度, b 部分指空气占的长度, 取 $d = a + b$ 表示光栅周期。光栅结构的示意图是光栅结构沿 xOy 面的剖面, 光线沿 y 轴方向传播, 传播方向为图中箭头所指方向。该结构在 z 轴方向的长度为无穷, 在 x 方向以 d 为周期, 周期数为无穷个。如图4所示 $a:b = 1:1$, 此时图中异质结构所占比例为 0.5。

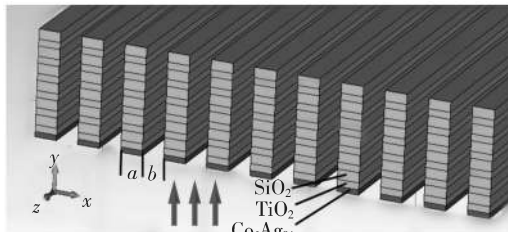


图4 含损耗型负介电常数材料 $(AB)_6M$ 的光栅结构示意图

Fig. 4 Schematic of grating $(AB)_6M$ heterostructure containing lossy negative permittivity material

异质结构的占比, 直接决定了刻蚀量的多少, 对光栅整体的透射率有着很大的影响。因此, 我们讨论了异质结构在光栅中所占比例对光栅结构的透射率的影响, 当光栅常数为 $d = 400$ nm 时, 测得的异质结构占比为 0.3 ~ 0.7 的透过率, 如图5所示。

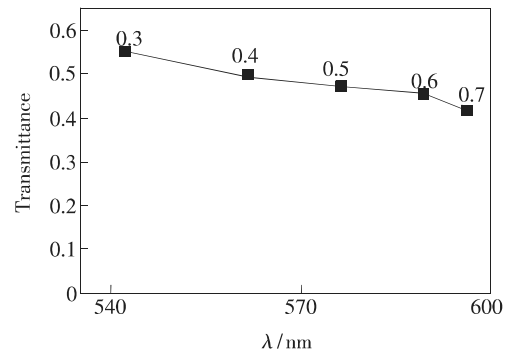


图5 $d = 400$ nm 时, 透射率与光栅比例之间的变化关系。

Fig. 5 Relationship between transmittance and percentage of grating with $d = 400$ nm

显而易见, 随着异质结构占比的减小, 光栅的透射率有了明显提高。单独的异质结构隧穿峰的透射率为 0.35, 异质结构占比为 0.7 时, 光栅结构透射率已达 0.41。当占比达到 0.3 时, 光栅结构的透射率达到了 0.55。与此同时, 伴随着透射率的改变, 光栅结构的隧穿峰峰位也在随着异质结构占比的减少而逐渐向短波方向移动。这主要是由于光栅结构对异质结构的调制作用逐渐增强。

除异质结构占比外, 光栅周期 d 对透射率也有相应影响。 d 越小, 单独异质结构越薄, 光栅的总透过率就越高。图6中显示了当光栅常数 d 变化时, 对应的光栅结构透过率和对应异质结构占比的变化情况。

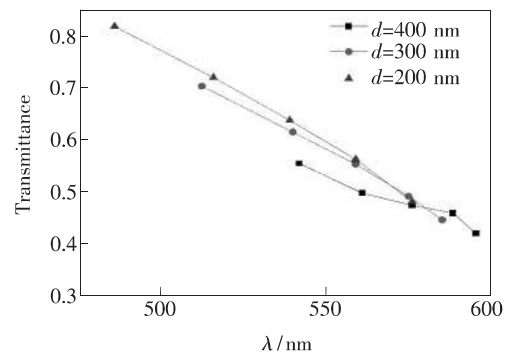


图6 透射率与光栅比例之间的变化关系

Fig. 6 Relationship between transmittance and percentage of grating

由图中可以看出, 随着光栅周期 d 变小, 光栅的透过率有了很大程度的提升。但伴随着这种提升隧穿峰峰位左移现象更加明显, 说明光栅结构对光场的调制作用逐渐掩盖了异质结构对光场的控制作用。我们以其中较具有代表性的光栅周期

$d = 300 \text{ nm}$ 的异质结构占比为 0.3 时为例,对光栅结构的透射率和反射率进行讨论,透射率与入射波长之间的变化关系如图 7 所示。

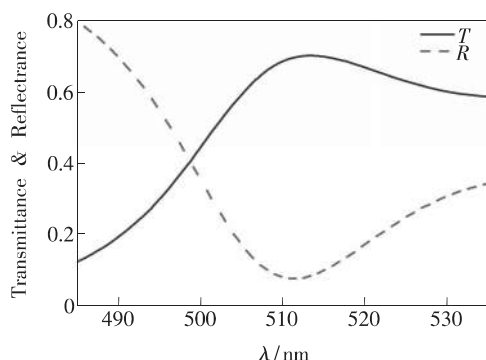


图 7 异质结构占比为 0.3 的光栅结构的透射率和反射率

Fig. 7 Transmittance and reflectance of 0.3 percentage grating structures

光栅结构的周期性调制使反射率降低至 0.08,与损耗型异质结构在隧穿峰处的反射率 0.2 相比有所降低,从而使更多光线进入该结构,导致透射率提高。在波长为 510 nm 处,占比 0.3 的光栅结构透射率达到 0.7。

光栅的作用可看作多缝干涉,它会对光场进行周期性调制^[12]。我们将完整的异质结构制作成透射光栅,通过光栅的干涉作用加强异质结构的透射率。

为了更清楚地分析透射率提高的物理原因,我们计算了光栅周期 $d = 300 \text{ nm}$ 的异质结构占比 0.3 时,波长为 510 nm 处的电场分布。在任意一个异质结构和空气的交界面取一条与 y 轴平行的直线,直线上的电场强度分布如图 8 所示。510

nm 处的电场强度分布图的 x 轴的读数代表所取直线在结构示意图的 y 轴上的投影位置,辅助轴表示各个材料的边界。由图中可以看出,光线由 M 层方向入射,在光子晶体和金属界面处有局域效应,电场在此处发生突变,且电场增强。随着光线在光子晶体 $(AB)_6$ 内传播,电场强度逐渐减弱。

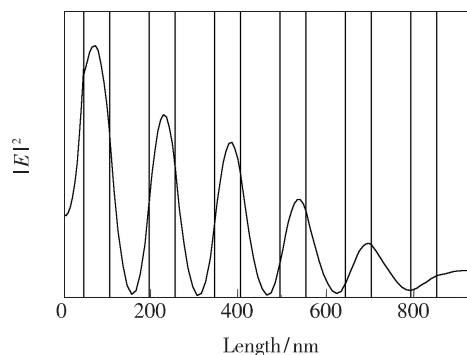


图 8 510 nm 处电场强度分布图

Fig. 8 Electric field intensity distribution at 510 nm

4 结 论

利用有限元分析方法对含损耗型负介电常数材料光栅结构的透射特性进行了研究。含损耗型负介电常数材料与光子晶体异质结构在隧穿条件下实现隧穿效应,将其作为基本单元排列成周期结构从而形成一种光栅结构。与单独的异质结构相比,该光栅结构的透射率得到了显著的提高。这种特性不仅在提高金属透射特性上有意义,而且在磁光器件中具有一定的应用价值。

参 考 文 献:

- [1] VESELAGO V G. The electrodynamics of substance with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Sov. Phys. Usp.*, 1968, 10(4):509-514.
 - [2] ALÙ A, ENGHETA N. Pairing an epsilon-negative slab with a mu-negative slab: resonance, tunneling and transparency [J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 2003, 51(10):2558-2571.
 - [3] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(5):2059-2062.
 - [4] FUJISHIGE T, CALOZ C, ITOH T. Experimental demonstration of transparency in the ENG-MNG pair in a CRLH transmission-line implementation [J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2005, 46(5):476-481.
 - [5] KALITEEVSKI M, IORSH I, BRAND S, et al. Tamm plasmon-polaritons: possible electromagnetic states at the interface of a metal and a dielectric Bragg mirror [J]. *Phys. Rev. B*, 2007, 76(16):165415.
 - [6] 杜桂强,刘念华. 具有镜像对称结构的一维光子晶体的透射谱 [J]. *物理学报*, 2004, 53(4):1095-1098.
- DU G Q, LIU N H. Optical transmission spectra of one-dimensional photonic crystals with a mirror symmetry [J]. *Acta*

- Phys. Sinica*, 2004, 53(4):1095-1098. (in Chinese)
- [7] BELOTELOV V I, KREILKAMP L E, AKIMOV I A, *et al.* . Plasmon-mediated magneto-optical transparency [J]. *Nat. Commun.* , 2013, 4:2128.
- [8] BELOTELOV V I, DOSKOLOVICH L L, ZVEZDIN A K. Extraordinary magneto-optical effects and transmission through metal-dielectric plasmonic systems [J]. *Phy. Rev. Lett.* , 2007, 98(7):077401.
- [9] XIA W B, GAO J L, ZHANG S Y, *et al.* . Optical and magneto-optical anisotropies in large-area two-dimensional Co anti-dots film [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(2):1359-1365.
- [10] DONG L J, JIANG H T, CHEN H, *et al.* . Enhancement of Faraday rotation effect in heterostructures with magneto-optical metals [J]. *J. Appl. Phys.* , 2010, 107(9):093101.
- [11] 罗李娜, 王勇凯, 聂俊英, 等. 金属半圆环/长板阵列的法诺共振特性 [J]. *中国光学*, 2015, 8(3):360-367.
LUO L N, WANG Y K, NIE J Y, *et al.* . Fano resonance properties of the arrays of metallic half-ring/rectangle structure [J]. *Chin. Opt.* , 2015, 8(3):360-367. (in Chinese)
- [12] XU H, HAM B S. Investigation of extraordinary optical transmission and Faraday effect in one-dimensional metallic-magnetic gratings [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(26):21375-21382.



许华(1988 -), 女, 山西大同人, 硕士, 助教, 2013 年于东北大学获得硕士学位, 主要从事光子晶体、特异材料等方面的研究。

E-mail: xyx198@163.com



董丽娟(1976 -), 女, 山西襄汾人, 博士, 副教授, 2009 年于同济大学获得博士学位, 主要从事人工微结构材料的研究。

E-mail: donglijuan_2012@163.com