

文章编号:1001-5078(2018)02-0215-06

· 红外材料与器件 ·

基于纳米“金字塔”结构的光学抗反射特性技术研究

张永平, 王文涛, 王超, 杨健

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要:“金字塔”是一个典型的椎体结构,若将其尺寸缩小到纳米尺度并以面阵形式制作到界面上,光波经过该“金字塔”阵列时,等效为穿过一层折射率渐变的薄膜,在界面的菲涅尔反射将被极大削弱。通过基于严格耦合波的 Rsoft 软件中的 DiffractMOD 模块,分别对三种材料(Si, SiO₂, Ge)构成的亚波长结构在中红外光波入射下的表面反射特性进行模拟研究。研究发现, SiO₂ 材料构成的亚波长结构具有良好的光学抗反射特性。

关键词:金字塔;亚波长结构;反射特性

中图分类号:TN214 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.02.015

Study of optical anti-reflection characteristics based on nanometer “pyramid” structure

ZHANG Yong-ping, WANG Wen-tao, WANG Chao, YANG Jian

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Pyramid is a typical kind of cone structure. When the light passes through the “pyramid” array, it is equivalent to pass through a thin film with a graded refractive index, and the Fresnel reflection at the interface is greatly weakened. The surface reflection characteristics of the sub-wavelength structure composed of three materials (Si, SiO₂, Ge) were simulated with DiffractMOD in Rsoft. The results show that the sub-wavelength structure composed of SiO₂ has good optical anti-reflection characteristics.

Key words: pyramid; sub-wavelength structure; reflection characteristics

1 引言

对于许多光学系统而言,菲涅尔反射^[1]是一个非常不利的因素,特别是在高功率激光系统如惯性约束核聚变(ICF)装置中,由于激光系统的输出功率密度非常高,光学元件表面的反射光不仅会降低输出能量和光束质量,甚至会损坏激光系统的元器件,最终降低系统的寿命和可靠性。因此,必须对光学元件表面进行减反处理。传统的方法是通过在元件表面镀光学薄膜来实现减反,主要包括单层膜法和多层膜法。单层膜法虽然比较容易实现零反射,

但只能针对特定的波长,并且可选的膜层材料受限。多层膜法虽然能在较宽波段内实现减反,并且工艺比较成熟,但是仍存在许多固有的缺陷,如膜层的损伤阈值低。

亚波长结构^[2-3]是指表面结构的特征尺寸与波长相当或更小的精细结构,通过刻蚀占空比随深度变化,形成渐变折射率分布,从而实现抗反射功能,理论上可实现零反射。亚波长抗反射结构具有如下优点^[4-5]:通过调整结构参数,可实现任意的折射率分布,从而获得最佳的光学性能,这是传统镀膜技术难以实现的;亚波长结构是直接刻蚀在衬底上,因此

作者简介:张永平(1991-),男,硕士研究生,主要研究高能激光器板条放大链路中的膜层损耗问题。E-mail:1026099147@qq.com

收稿日期:2017-06-27; **修订日期:**2017-08-20

抗损伤能力更强,可能达到本征材料的损伤阈值,而且在受到强激光辐照时不会脱落;亚波长结构可在宽谱段、大视场范围内减小表面反射,在某些波段可同时实现减反和谐波分离等多重功能;当亚波长结构与雨水、灰尘等接触时,由于结构的特征尺寸非常小,接触面积很小,可实现良好的疏水性和自清洁性,并且亚波长结构受温度、湿度等因素的影响较小;制作方法多,工艺相对简单,不会涉及镀膜技术中各种物理、化学效应带来的不利影响。

2 严格耦合波理论

严格耦合波理论(Rigorous Coupled Wave Analysis, RCWA)^[6-7]是一种有效直接的电磁场理论。一般情况下,入射光束都是以某种特殊的偏振出现在光栅系统中的,当入射光束电场矢量垂直入射平面时,称之为 TE 模,当磁场矢量垂直入射平面时,称之为 TM 模。下面以 TE 偏振入射到一维光栅为例介绍 RCWA 的原理。

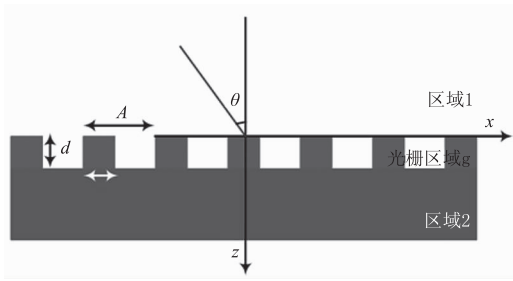


图1 一维光栅示意图

Fig. 1 One-dimensional grating schematic

如图1,光栅周期为 Λ ,厚度为 d ,宽度为 s 。入射光于 xz 平面内以 θ 角入射到光栅上。区域1为入射区域($z < 0$),折射率为 n_1 ;区域2为透射区域($z > d$),折射率为 n_2 ;中间部分为光栅区域 g ($0 < z < d$),折射率记为 n_g 。

将光栅区域内的相对介电常数进行 Fourier 级数展开,得:

$$\varepsilon(x) = \sum_h \varepsilon_h \exp(j \frac{2\pi h}{\Lambda} x) \quad (1)$$

其中, ε_h 是光栅区域相对介电常数的第 h 级 Fourier 分量。

入射光波的归一化磁场可表达为:

$$E_{inc,y} = \exp[-jk_0 n_1 (x \sin \theta + z \cos \theta)] \quad (2)$$

其中, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 是入射波的波长。

区域1和区域2的光波磁场可表达为:

$$E_{1,y} = E_{inc,y} + \sum_i R_i \exp[-j(xk_{xi} - zk_{1,zi})] \quad (3)$$

$$E_{2,y} = \sum_i T_i \exp\{-j[xk_{xi} - k_{2,zi}(z-d)]\} \quad (4)$$

$$k_{xi} = k_0 [n_1 \sin \theta - i(\lambda_0/\Lambda)] \quad (5)$$

$$k_{l,zi} = \begin{cases} \sqrt{(k_0 n_l)^2 - k_{xi}^2}, & |k_{xi}| < k_0 n_l \\ -j\sqrt{k_{xi}^2 - (k_0 n_l)^2}, & |k_{xi}| > k_0 n_l \end{cases}, l = 1, 2 \quad (6)$$

其中, R_i 和 T_i 是光栅的 i 级反射衍射波以及透射衍射波的归一化磁场振幅。

在光栅区域 g , 将光波的磁场 H_{gy} 和电场 E_{gx} 做 Fourier 级数展开:

$$E_{gy} = \sum_i S_{yi}(z) \exp(-jxk_{xi}) \quad (7)$$

$$H_{gx} = -j(\frac{\varepsilon_0}{\mu_0})^{\frac{1}{2}} \sum_i U_{xi}(z) \exp(-jxk_{xi}) \quad (8)$$

其中, ε_0 和 μ_0 分别是真空介电常数和真空磁导率; $U_{xi}(z)$ 和 $S_{yi}(z)$ 分别为光栅区域中光波磁场和电场的第 i 级空间谐波的归一化振幅。光栅区域中的电磁场满足麦克斯韦方程组,因此有:

$$\frac{\partial E_{gy}}{\partial z} = j\omega \varepsilon_0 \varepsilon(x) H_{gx} \quad (9)$$

$$\frac{\partial H_{gx}}{\partial z} = j\omega \varepsilon_0 \varepsilon(x) E_{gy} + \frac{\partial H_{gx}}{\partial z} \quad (10)$$

由以上各式结合边界条件可解得光栅各级反射衍射波对应振幅 DE_{Ri} 和透射衍射波对应振幅 DE_{Ti} 。

$$DE_{Ri} = R_i R_i^* \operatorname{Re}(\frac{k_{1,zi}}{k_0 n_1 \cos \theta}) \quad (11)$$

$$DE_{Ti} = T_i T_i^* \operatorname{Re}(\frac{k_{2,zi}}{k_0 n_1 \cos \theta}) \quad (12)$$

式中, $*$ 代表复数的共轭, Re 代表实部。

3 三种材料亚波长结构的反射特性分析

本文所用到的模拟软件是 RSoft,所用到的工具软件是 DiffractMOD^[8]。

利用 RSoft 软件建立模型,为了能够比较不同结构参数对结构反射特性的影响,我们统一模型的整体高度 H 是 $0.5 \mu\text{m}$,宽 D 是 $1 \mu\text{m}$,整体模型分为基底和周期性结构两部分,其中周期性结构采用“金字塔”形式,整体结构参数的变化体现在基底的高度 h 和周期性结构的周期 l 两个方面,模拟区域为 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$,且整个模拟过程是在 DiffractMOD 的 2D 下进行的。基底的高度 h 分别为 $0.5 \mu\text{m}$ 、 $0.3 \mu\text{m}$ 、 $0.2 \mu\text{m}$ 、 $0.1 \mu\text{m}$ 、 $0 \mu\text{m}$,周期性“金字塔”结构的周期 l 分别为 $0.5 \mu\text{m}$ 、 $0.25 \mu\text{m}$ 、 $0.2 \mu\text{m}$ 、 $0 \mu\text{m}$;入射光波为中红外($2.5 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$);分别考虑 TE 偏振和 TM 偏振入射。

3.1 Si 材料的模拟结果

图2给出了两种模型及其模拟结果。(a)模型对应 $h = 0.3 \mu\text{m}$, $l = 0 \mu\text{m}$; (b)模型对应 $h = 0.2 \mu\text{m}$, $l = 0 \mu\text{m}$ 。

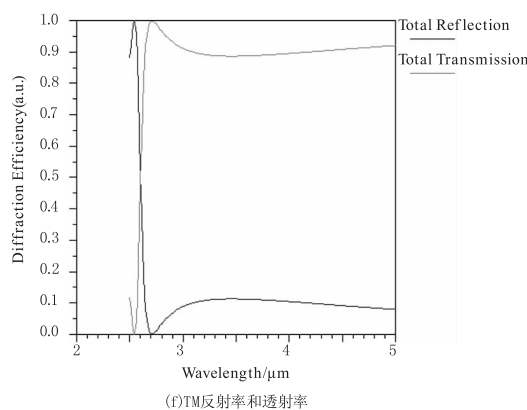
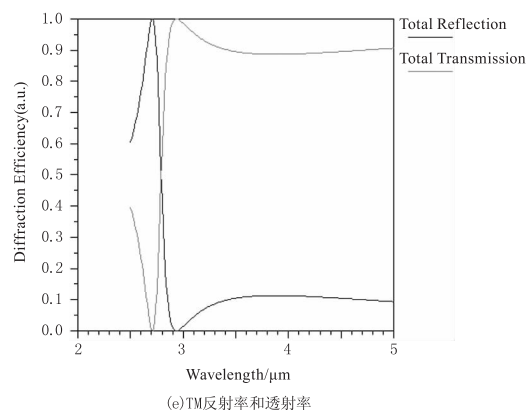
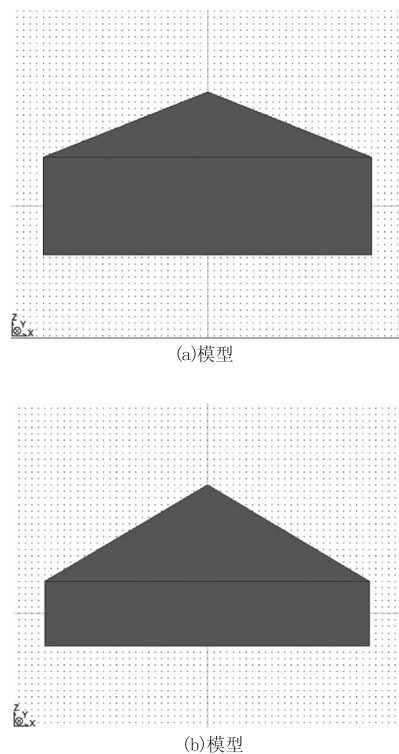
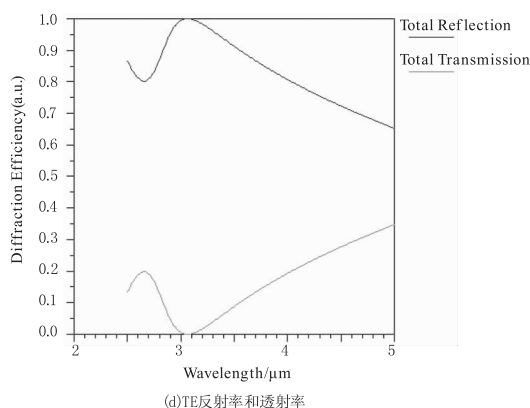
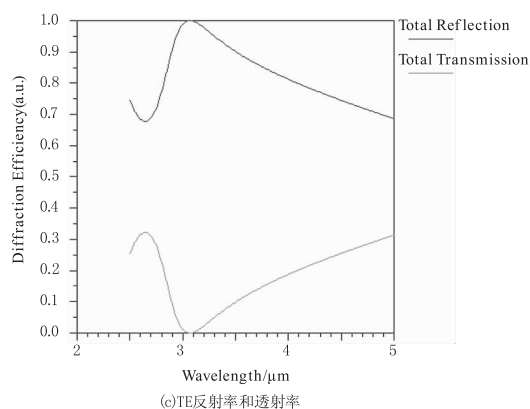


图2 Si 材料模型及其模拟结果

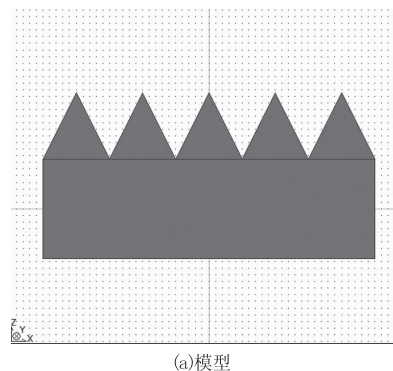
Fig. 2 Si material model and its simulation results

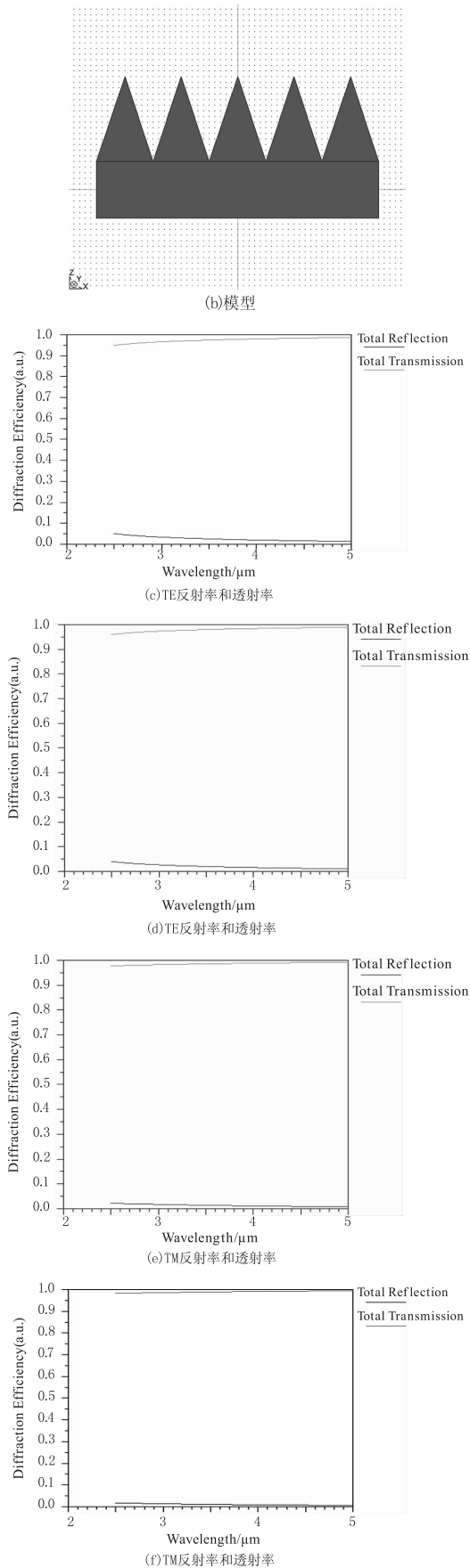


由上图可以看出,TE 偏振光入射时,反射率曲线均位于透射率曲线之上,甚至在某波长下反射率达到了100%;TM 偏振光入射时,虽然存在反射零点,但也仅针对特定的入射波长,反射率曲线后段基本在10%的水平线上。总之,无论是TE 偏振还是TM 偏振入射,该模型没有在某段波长范围内达到很好的稳定的抗反射效果。同样的结论也体现在其他模型中。

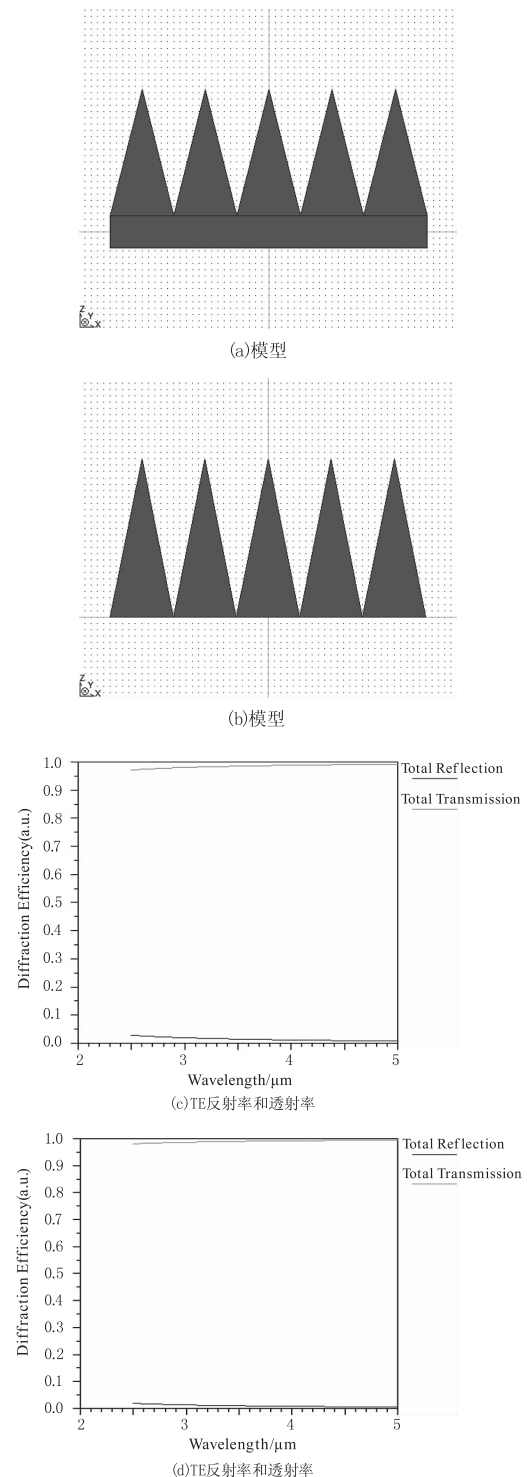
3.2 SiO₂ 材料的模拟结果

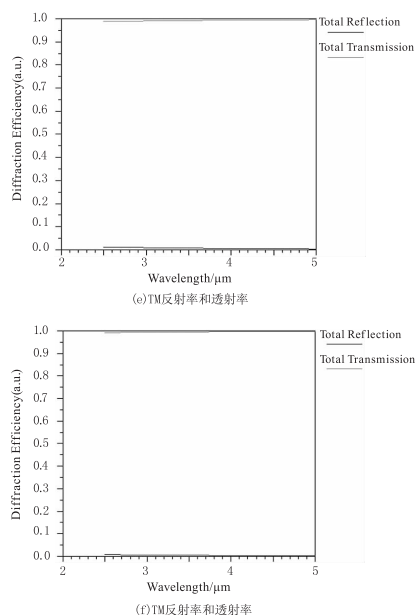
图3示出了两种模型的模拟结果。



图3 SiO₂ 材料模型及其模拟结果Fig. 3 SiO₂ material model and its simulation results

(a) 模型对应的 $h = 0.3 \mu\text{m}$, $l = 0.2 \mu\text{m}$; (b) 模型对应的 $h = 0.2 \mu\text{m}$, $l = 0.2 \mu\text{m}$ 。由图可以看出, 无论是 TE 偏振入射还是 TM 偏振入射, 模型结构都表现出良好的抗反射特性, 不仅在整个入射波段范围内反射率值低, 而且曲线的平稳光滑说明了结构性能的稳定。其他模型也有类似的特性, 如图 4 所示。(a) 模型对应的 $h = 0.1 \mu\text{m}$, $l = 0.2 \mu\text{m}$; (b) 模型对应的 $h = 0 \mu\text{m}$, $l = 0.2 \mu\text{m}$ 。



图4 SiO₂ 材料模型及其模拟结果Fig. 4 SiO₂ material model and its simulation results

3.3 Ge 材料的模拟结果

对于由 Ge 材料构成的 17 种模型中,在入射光波为中红外的条件下,无论是 TE 偏振还是 TM 偏振入射,均没有获得数值低且走势平稳的反射率曲线。部分模拟结果如图 5 所示。

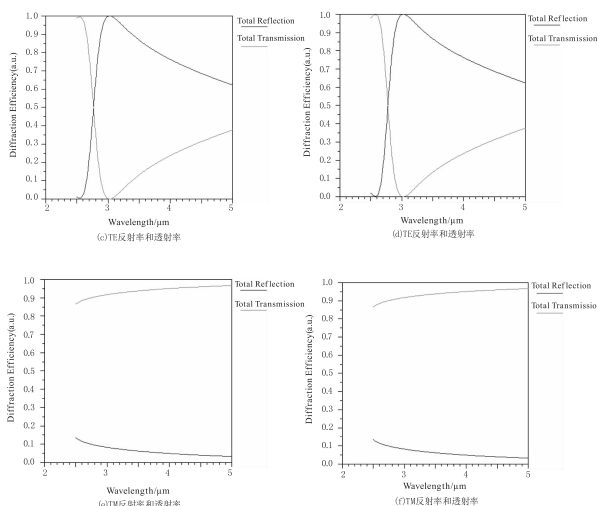
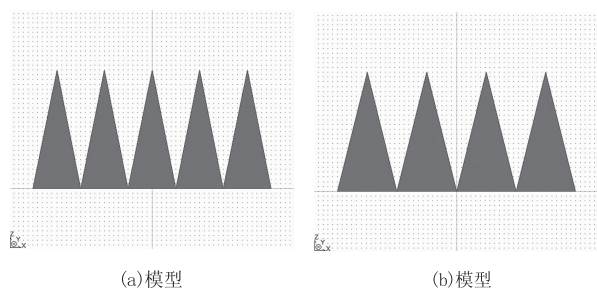


图5 Ge 材料模型及其模拟结果

Fig. 5 Ge material model and its simulation results

(a) 模型对应的 $h=0 \mu\text{m}, l=0.2 \mu\text{m}$; (b) 模型对应的 $h=0 \mu\text{m}, l=0.25 \mu\text{m}$ 。

4 结构参数对结构特性的影响

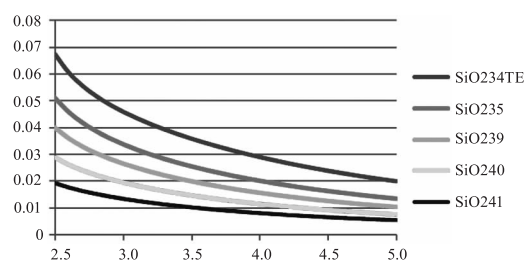
亚波长结构的光学抗反射特性受很多因素的影响,包括结构自身的内在因素,比如结构的组成材料、结构的厚度、结构的高度以及结构的周期等等,实际中还包括很多外在因素,比如制作亚波长结构的刻蚀温度、刻蚀时间以及腐蚀液浓度等。本文主要从结构的高度和周期两个方面分析与探讨其对整体结构光学抗反射特性的影响。

4.1 结构高度对反射特性的影响

讨论结构高度对结构反射率的影响,主要就是考虑模型结构基底高度的变化带来的影响。

4.1.1 TE 偏振入射情况

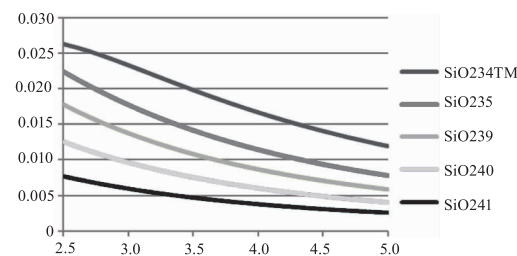
以 SiO₂ 材料为例,选择五组模拟结果,它们的结构反射率如图 6 所示,结构周期 l 均为 $0.2 \mu\text{m}$,左侧编号的基底高度依次为 $0.5 \mu\text{m}$ 、 $0.3 \mu\text{m}$ 、 $0.2 \mu\text{m}$ 、 $0.1 \mu\text{m}$ 以及 $0 \mu\text{m}$ 。

图6 SiO₂ 材料 TE 反射率随结构高度的变化Fig. 6 TE reflectivity of SiO₂ material varies with structure height

从图 6 中看出,随着结构高度的逐渐减小,结构的反射率也随之降低。其他情况也有类似的变化规律。

4.1.2 TM 偏振入射情况

同样以 SiO₂ 材料为例,如图 7 所示。从图 7 中同样可以看出,随着结构高度的逐渐减小,结构的反射率也随之降低。但是比较图 6 和图 7,发现 TM 反射率值要 TE 反射率值低得多。

图7 SiO₂ 材料 TM 反射率随结构高度的变化Fig. 7 TM reflectivity of SiO₂ material varies with structure height

4.2 结构周期对反射特性的影响

结构周期是指模型中周期性“金字塔”结构的周期,即是三角形的底宽。讨论周期对结构反射率的影响,也就是三角形底宽的变化所带来的影响。通过整理众多模拟数据结果,我们发现只有在一定波长范围内,反射率随着结构周期的增加而降低。如图8所示,对应模型结构基底高度为 $0.3\ \mu\text{m}$,左侧编号的结构周期依次为 $0.2\ \mu\text{m}$ 、 $0.25\ \mu\text{m}$ 、 $0.5\ \mu\text{m}$ 和 $1\ \mu\text{m}$ 。

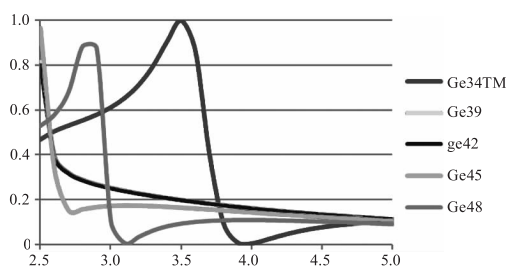


图8 Ge材料TM反射率随结构周期的变化

Fig. 8 TM reflectivity of Ge material varies with structure cycle

5 结论

利用 Rsoft 软件分别对三种材料构成的多种模型进行模拟实验,结果表明 SiO_2 材料在中红外波长内具有良好的抗反射特性,特别是当入射光波为 TM 偏振时,反射率曲线近乎与零反射水平线重合。另外,在中红外波段下,三种材料模型结构的反射率随着结构高度的减少而降低;而只有一定波长范围内反射率随着结构周期的增加而降低。

参考文献:

- [1] HU Qing. Analysis of fresnel reflection loss on fiber splice and its effects on the properties of the transmission[J]. Semiconductor Optoelectronics, 1998, (2): 136 – 139. (in Chinese)
胡庆. 光纤接头的菲涅尔反射损耗分析及其对传输特性的影响[J]. 半导体光电, 1998, (2): 136 – 139.
- [2] LI Haihua, HUANG Kang, WANG Qingkang. Design of the wideband anti-reflective sub-wavelength nanostructures[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(2): 267 – 270. (in Chinese)
李海华, 黄康, 王庆康. 亚波长纳米结构宽波段抗反射特性[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 267 – 270.
- [3] JIAO Fang. Fabrication and research on subwavelength structured antireflection coating based on nanoimprint lithography[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013. (in Chinese)
焦方. 基于纳米压印技术的亚波长结构减反射膜的制备与研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [4] YU Weixing, LU Zhenwu. Comparison of periodic sub-wavelength structure and multilayer antireflection coatings[J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(1): 10 – 13. (in Chinese)
鱼卫星, 卢振武. 亚波长周期结构与多层增透膜反射特性的比较[J]. 光学精密工程, 2001, 9(1): 10 – 13.
- [5] YANG Lili, XUAN Yimin. Thermal radiation spectrum characteristics of sub-wavelength graded refractive index structures[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, (23): 2253 – 2256. (in Chinese)
杨理理, 宣益民. 亚波长缓变折射率结构热辐射光谱特性[J]. 科学通报, 2015, (23): 2253 – 2256.
- [6] XIA Jichao, HUANG Yuanshen, ZHU Dongyue. The optimal design for sub-wavelength grating based on the rigorous coupled wave theory[J]. Optical Instruments, 2010, 32(6): 40 – 44. (in Chinese)
夏纪朝, 黄元申, 朱冬月. 基于严格耦合波理论的亚波长光栅优化设计[J]. 光学仪器, 2010, 32(6): 40 – 44.
- [7] Moharam M G, Gaylord T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction[J]. Journal of the Optical Society of America(1917 – 1983), 1981, 71(7): 811.
- [8] SHENG Xin. Study on plasmonic hologram based on metallic nanowire gratings[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016. (in Chinese)
盛欣. 亚波长金属结构的表面等离子体全息研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.