

文章编号: 0253-2239(2010)06-1745-04

锗衬底红外抗反射亚波长结构的研究

徐启远 刘正堂 李阳平 张 淼

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 为了减小锗表面的反射, 利用模式理论对锗衬底正方柱形亚波长结构的衍射特性进行了研究。结果发现, 当周期较小时, 占空比大于 0.78 对透射率的影响比较明显; 周期大于 0.25λ , 零级透射率随周期的增大急剧下降, 而总透射率随周期的增大变化不大; 周期较小透射率随结构高度的变化呈余弦周期性, 周期增大透射率随结构高度的变化呈余弦平方周期性, 并且周期越大余弦平方周期性越明显; 此外, 周期较小时, 可以实现大角度范围内的高的透射率, 周期较大时, 可以制备为窄带滤波器。

关键词 光学材料; 抗反射亚波长结构; 模式理论; 锗(Ge)

中图分类号 O484 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103006.1745

Studies of Infrared Antireflection Subwavelength Structure on Ge Substrate

Xu Qiyuan Liu Zhengtang Li Yangping Zhang Miao

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University,
Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract In order to solve the reflection of the germanium surface, the square pillar subwavelength structures are analyzed and designed by model theory. The results show that filling factors that are bigger than 0.78 have a more important effect on transmittance when periods is smaller. Zero transmittance decreases so quickly with periods increasing while sum transmittance decreases so few with periods increasing when periods are bigger than 0.25λ . The relationships between transmittance and depth are cosine when the period is smaller while the relationships between transmittance and depth are pseudo cosine when period is bigger. Besides transmittance is high within wide incident angles when the period is smaller, when the period is bigger the subwavelength structures can be made narrowband filter.

Key words optical materials; antireflection of subwavelength structure; model theory; germanium (Ge)

1 引 言

锗是目前常用的长波红外窗口材料之一, 红外吸收小。但是锗的折射率大($n=4$), 反射率特别高(单面反射率为 36%, 双面反射率为 54%), 所以用作窗口材料时必须进行抗反射处理, 提高其透射性能。表面镀膜是通常采用的抗反射手段, 它是利用反射光发生相消干涉来降低表面反射、达到增透效果, 目前得到了广泛的应用。但是光学薄膜由于是

沉积不同的材料而制成, 存在自身不能克服的缺陷, 如粘附性、热膨胀失配等。抗反射亚波长结构表面是一种新兴的增透方法, 刻蚀于衬底表面^[1], 可以克服抗反射薄膜遇到的粘附性、热膨胀失配等问题, 其耐久性完全取决于衬底本身。此外, 通过设计及调节亚波长结构的参数(周期、占空比、高度及表面面形等), 可以改变其等效折射率, 从而实现与衬底折射率的良好匹配、获得最佳增透效果^[2]。

收稿日期: 2009-07-01; 收到修改稿日期: 2009-08-06

基金项目: 航空科学基金(2008ZE53043)资助课题。

作者简介: 徐启远(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事红外光学材料的模拟计算及实验等方面的研究。

E-mail: xuqiyuanguod@126.com

导师简介: 刘正堂(1951—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事红外光学材料与薄膜技术等方面的研究。

E-mail: liuzht@nwpu.edu.cn

D. H. Raguin 等^[3]运用等效介质理论和耦合波理论对 GaAs 衬底的亚波长结构进行研究,发现二维亚波长结构比一维亚波长结构对非偏振光具有更好的抗反射特性;E. B. Grann 等^[4]发现二维亚波长结构具有对称结构时,亚波长结构等效于单轴薄膜,二维亚波长结构具有非对称结构时,亚波长结构等效于双轴薄膜;鱼卫星等^[5]对玻璃衬底的亚波长结构进行研究,发现正方形亚波长结构具有抗反射特性,并具有对方位角、偏振角不敏感的特性;D. W. Zhang 等^[6]对玻璃衬底和硅衬底的圆柱形亚波长结构进行研究,发现圆柱形亚波长结构也具有抗反射特性;曹召良等^[7]对二维抗反射亚波长结构进行模拟分析,发现当周期足够小时,亚波长结构面形对反射率没有影响;郝琦等^[8]对纳米球尺寸和周期等结构参数对反射率的影响进行研究,给出了一种可行的密排球形亚波长

抗反射表面的设计方法。而对周期比较大、衬底折射率高的亚波长结构透射特性研究较少。

本文充分利用亚波长结构的对称性^[9]及文献[10]中提高收敛性的方法对锗衬底的正方形亚波长结构进行研究,探寻亚波长结构参数对透射率的影响规律。

2 理论分析

为了研究问题的方便,选择如图 1 所示的亚波长结构表面。假设 T_x 和 T_y 分别为 x, y 轴方向的周期 $T_x = T_y = T$, f_x 和 f_y 分别为 x, y 轴方向的占空比 $f_x = f_y = f$, $f_x = a/T_x$, $f_y = b/T_y$; 采用文献[9]中的符号,为了提高计算的收敛速度,对文献[9]中的系数矩阵进行改进^[10]。

$$\begin{bmatrix} S'_y \\ S'_x \\ U'_y \\ U'_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & K_y E^{-1} K_x & I - K_y E^{-1} K_y \\ 0 & 0 & K_x E^{-1} K_x - I & -K_x E^{-1} K_y \\ K_x K_y & \alpha A^{-1} + (1 - \alpha) E - K_y^2 & 0 & 0 \\ K_x^2 - \alpha E - (1 - \alpha) A^{-1} & -K_x K_y & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_y \\ S_x \\ U_y \\ U_x \end{bmatrix},$$

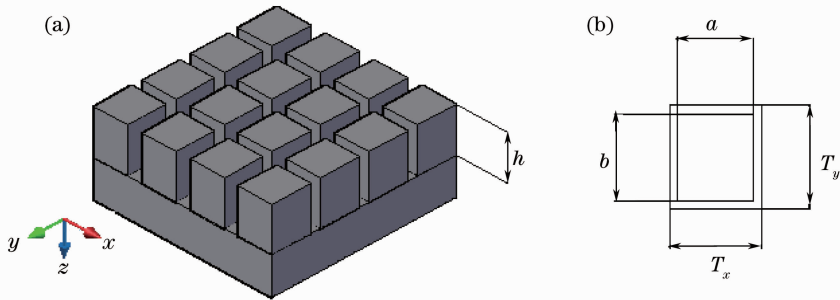


图 1 正方形亚波长结构示意图。(a) 三维视图; (b) 平面视图

Fig. 1 Schematic diagram of square pillar subwavelength structure surfaces. (a) three-dimensional view; (b) platform view of structural unit

根据文献[10]可以知道对于正方形亚波长结构,式中的 $\alpha = 0.5$ 。

通过求解上式可以求得本征值 r_m , 电场本征矢量 \mathbf{W}_e 及磁场本征矢量 \mathbf{W}_m , 然后根据边界条件匹配,运用 \mathbf{S} 矩阵^[11]方法可求得亚波长结构的反射率及透射率公式。

3 亚波长结构参数对抗反射特性的影响规律

3.1 占空比对透射率的影响

当亚波长结构的周期很小时,亚波长结构等效于单层薄膜^[4]。因此,令亚波长结构的周期 $T = 0.1\lambda$, 根据薄膜理论可知高度 $h = 0.125\lambda$; 假设光垂

直入射时,即 $\theta = 0$; 方位角 $\phi = 0$; 偏振角 $\psi = \pi/2$; 根据上述参数模拟出的透射率随占空比变化的曲线如图 2 所示,从图中可以看出,当占空比为 0.78 时,透射率最高,接近于 100%; 当占空比大于 0.78 时,透射率随占空比的增加急剧下降,而占空比小于 0.78 时,透射率随占空比的减小缓慢下降。因此在制作亚波长结构时应使占空比小于或等于 0.78。

3.2 周期与透射率的关系

图 3 是光垂直入射,占空比为 0.78 时,透射率随周期的变化曲线。从图 3 可以看出,当周期小于 0.25λ 时,零级透射率曲线和总透射率曲线重合,这说明当周期小于 0.25λ 时,只有零级衍射的存在,而当周期大于 0.25λ 时,零级透射率曲线和总透射率

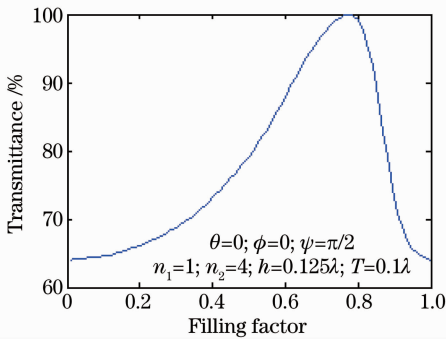


图 2 透射率随占空比的变化曲线

Fig. 2 Transmittance as a function of filling factor for square pillar sub wavelength structures with parameters

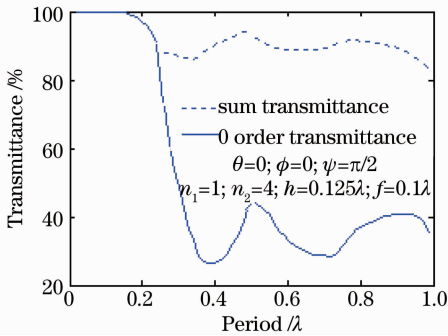


图 3 透射率随周期的变化曲线

Fig. 3 Transmittance as a function of period for square pillar sub wavelength structures with parameters

曲线分离,这主要是由于周期的增大,衍射级次也随之增加,除零级衍射外还有其它衍射级次的存在。此外,周期大于 0.25λ 时,零级透射率随周期的增大急剧下降,周期接近 0.4λ 后,随周期的增大出现震荡。对于总透射率来说,当周期大于 0.25λ 时,随周期的增大出现震荡,但是变化不是很大,透射率在 90% 附近。

在此需要说明的是周期等于 0.25λ ,是文献[12]所说的临界周期点,文献[12]中的临界周期点实际上就是垂直入射发生一级衍射的临界点。亚波长结构的透射率是总的透射率(此后如果不加以说明,透射率就是指的总的透射率),它不仅包括零级透射波,还包括其它各级透射波。

3.3 高度与透射率的关系

为了比较不同周期下,透射率随亚波长结构高度的变化曲线,令周期分别为 0.10λ , 0.23λ 和 0.49λ 。从图 4 可以看出, $T=0.10\lambda$ 时透射率随亚波长结构高度的变化呈余弦周期性, $T=0.23\lambda$ 时透射率随高度的变化呈余弦展周期, $T=0.49\lambda$ 时余弦展周期性变化的趋势更加明显。此外,亚波长结构的周期越大,其高度的周期性也越大。并且周期

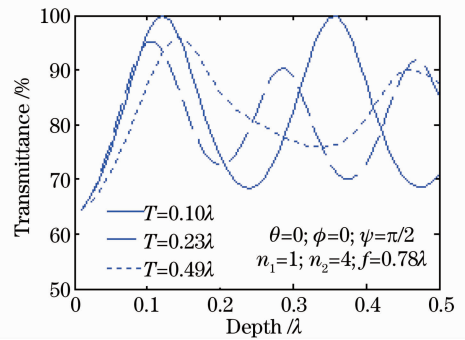


图 4 透射率随亚波长结构高度的变化曲线

Fig. 4 Transmittance as a function of depth for square pillar sub wavelength structures with parameters

$T=0.10\lambda, h=0.11\lambda$ 和周期 $T=0.23\lambda, h=0.11\lambda$ 时的透射率相同。

3.4 入射角与透射率的关系

图 5 是透射率随入射角的变化曲线,从图上可以看出当周期 $T=0.10\lambda, h=0.11\lambda$ 或 $T=0.23\lambda, h=0.11\lambda$ 时透射率随入射角的增加而减少,但是当入射角小于 40° 时,透射率随入射角的增大变化并不大,因此对于正方柱形亚波长结构来说,当周期比较小时,可以实现大角度范围内的高透射率。另外,从图 5 上可以看出,当 $T=0.49\lambda, h=0.14\lambda$ 时,透射率随入射角的变化而发生震荡,当入射角等于 9° 时透射率最高,达 96% 。因此当锗衬底的正方柱形亚波长结构周期较大时,可以制备为窄带滤波器。

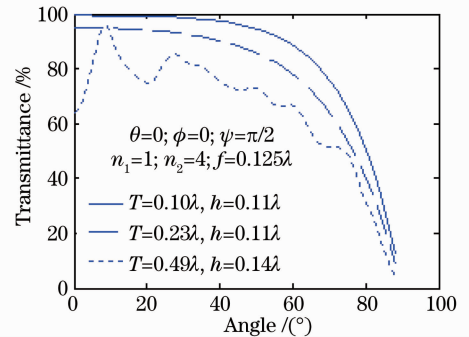


图 5 透射率随入射角的变化曲线

Fig. 5 Transmittance as a function of angle for square pillar sub wavelength structures with parameters

4 结 论

利用模式理论对亚波长结构进行研究,结果发现正方柱形亚波长结构可以实现大角度范围内的高增透,尤其是亚波长结构的周期小于 0.2λ ,高度为 0.125λ ,占空比为 0.78 时,其增透效果最好,并且当入射角小于 40° 时,透射率随入射角的变化不大,透射率高达 99% 以上。

参 考 文 献

- 1 C. G. Bernhard. Structural and functional adaptation in a visual system [J]. *Endavour*, 1967, **26**(98): 79~84
- 2 D. S. Hobbs, B. D. MacLeod. Design, fabrication and measured performance of anti-reflecting surface textures in infrared transmitting materials [C]. *SPIE*, 2005, **5786**: 349~364
- 3 D. H. Raguin, G. M. Morris. Antireflection structured surfaces for the infrared spectral region[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(7): 1154~1167
- 4 E. B. Grann, M. G. Moharam, D. A. Pommet. Artificial uniaxial and biaxial dielectrics with use of two dimensional sub-wavelength binary gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(10): 2695~2703
- 5 Yu Weixing, Lu Zhenwu, Wang Peng *et al.*. Vector analysis of two-dimensional surface-relief structure diffraction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 980~986
鱼卫星, 卢振武, 王 鹏 等. 二维表面浮雕结构的矢量衍射分析 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(8): 980~986
- 6 D. W. Zhang, Z. W. Lu, W. X. Yu *et al.*. Electromagnetic diffraction analysis of columned grid gratings[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2002, **4**(2): 180~186
- 7 Cao Zhaoliang, Zhang Huijuan, Li Fengyou *et al.*. Design consideration of two-dimensional antireflective subwavelength periodic gratings [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(6): 537~541
曹召良, 张慧娟, 李凤友 等. 二维抗反射亚波长周期结构光栅的设计分析[J]. *光学精密工程*, 2002, **10**(6): 537~541
- 8 Hao Yu, Jiang Tian, Feng Yijun *et al.*. Analysis and fabrication of the two-dimensional periodic anti-reflective subwavelength structure [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s2): 271~274
郝 巧, 姜 田, 冯一军 等. 二维抗光反射亚波长周期结构的分析与实现[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s2): 271~274
- 9 M. G. Moharam, E. B. Grann, D. A. Pommet *et al.*. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(5): 1068~1076
- 10 P. Lalanne. Improved formulation of the coupled-wave method for two-dimensional gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(7): 1592~1598
- 11 L. F. Li. Note on the S-matrix propagation algorithm[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(4): 655~660
- 12 Cao Zhaoliang, Lu Zhenwu, Li Fengyou *et al.*. Diffractive characteristics of antireflective dielectric gratings with subwavelength periodic structure [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2003, **7**(14): 694~697
曹召良, 卢振武, 李凤友 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, **7**(14): 694~697