

文章编号 : 0253-2239(2001)08-1001-03

亚波长结构对 10.6 μm 的抗反射表面的研制*

陈思乡 易新建 李 毅

(华中理工大学光电子工程系, 武汉 430074)

摘要: 运用等效媒质理论对亚波长结构的抗反射表面进行了分析, 设计出了一种抗反射表面结构, 并利用二元光学制作工艺技术, 对这种表面进行了实验制备。测试结果表明, 这种表面结构就像单层抗反射膜一样, 具有很好的增透效果, 表面结构的等效折射率相当于镀层材料折射率, 而刻蚀深度则相当于镀层的四分之一波长厚度。

关键词: 抗反射; 亚波长结构; 二元光学

中图分类号: TN202 文献标识码: A

1 引 言

光学元件特别是高折射率材料的元件, 由于具有大的反射系数, 必须对其表面进行抗反射处理。传统的方法是在元件表面淀积抗反射镀层——单层或多层膜系。但是淀积膜层有其固有的一些缺陷^[1,2], 如膜层附着力、抗蚀性、热胀失配、组分渗透与扩散等问题, 另外在某些领域如红外成像, 抗反射镀层会引起背景噪声的增大, 使系统的信噪比降低, 并且由于红外波长要求的镀层太厚, 在红外探测器的工作环境下, 还会产生冷凝分层现象, 严重影响系统的性能。亚波长结构抗反射表面的提出^[1-3], 解决了传统的抗反射镀层的这些缺陷。所谓亚波长结构表面是指表面结构尺寸与光波波长相当或更小的周期性的精细结构表面, 它是采用半导体大规模集成电路(VLSI)的工艺方法在衬底材料上通过离子束刻蚀技术形成的。近来, 随着微电子加工技术的成熟和亚微米技术的出现, 人们对亚波长结构的研究越来越多, 离实用化越来越近。

2 理论分析和设计

2.1 等效媒质理论

对于亚波长结构来说, 适用于标量衍射理论的假设条件不再成立, 此时必须动用电磁场的矢量衍射理论进行分析和研究, 但是其引入的巨大运算量使得采用矢量理论的光学设计十分困难。等效媒质理论^[4-7]是研究亚波长结构抗反射表面比较直观的

理论。等效媒质理论认为, 当入射光通过小于光波波长的浮雕结构时, 光波的性质类似于光波通过一等效均匀媒质, 波阵面的形状不发生改变, 等效媒质的光学常数诸如介电常数、磁导率和电导率等由浮雕结构所占的空域比来确定。

分析如图 1 所示简单的一维浮雕结构。浮雕结构的周期比光波波长小得多, 因此, 周期内的场可以认为是均匀的。当光波电矢量与光栅矢量 K 平行时(TM 偏振模式), 电位移的法向分量连续, 在介面处媒质的特点突然改变, 因此在浮雕结构周期内电位移矢量有相同的值, 电场矢量可写为:

$$E_1 = D/\epsilon_1, \quad E_2 = D/\epsilon_2, \quad (1)$$

平均电场为:

$$E = (1-f)E_1 + fE_2 = \left(\frac{1-f}{\epsilon_1} + \frac{f}{\epsilon_2}\right)D \quad (2)$$

其中 $f = a/\Lambda$ 为填充因子, ϵ_1 和 ϵ_2 分别为入射媒质和基底媒质的介电常数。等效介电常数

$$\epsilon_{E//K} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{(1-f)\epsilon_2 + f\epsilon_1}, \quad (3)$$

或为

$$\frac{1}{\epsilon_{E//K}} = \frac{1-f}{\epsilon_1} + \frac{f}{\epsilon_2}. \quad (4)$$

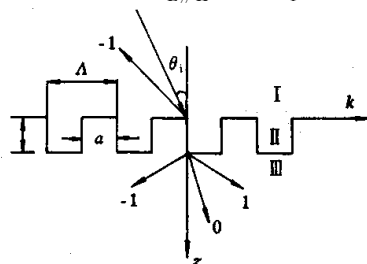


Fig. 1 Diffractive diagram of 1-D surface-relief structure

* 国家科委 863 高科技(863-409)资助课题。

同理,当电矢量与 \mathbf{K} 垂直时(TE 偏振模式),等效介电常数

$$\epsilon_{E \perp \mathbf{K}} = \mathbf{D}/\mathbf{E} = (1-f)\epsilon_1 + f\epsilon_2. \quad (5)$$

由于 $\epsilon = n^2$, n 为媒质的折射率,因此等效媒质的折射率可以写为:

$$n_{E \perp \mathbf{K}} = [(1-f)n_i^2 + fn_s^2]^{1/2}, \quad (6)$$

$$n_{E // \mathbf{K}} = [(1-f)n_i^2 + f/n_s^2]^{1/2}, \quad (7)$$

其中, n_i 和 n_s 分别为入射媒质和基底的折射率。

2.2 浮雕周期的界定

对于浮雕结构周期的定量描述,可以通过光栅的衍射方程来导出。周期光栅的衍射光栅方程为

$$n_s \sin \theta_m + n_i \sin \theta_i = m\lambda/\Lambda, \quad (8)$$

式中, θ_m 为第 m 级衍射的衍射角, θ_i 为入射角, Λ 为光栅周期, λ 为光波波长。根据等效媒质理论的假设,光栅的衍射仅有零级存在,而 $m = 1$ 的一级衍射角应达到 $\pi/2$ 的临界条件,即光栅方程对于任意入射角都没有实解,因此可确定浮雕结构的上限值:

$$\Lambda/\lambda < 1/(n_s + n_i). \quad (9)$$

例取

$$n_s = n_i = 3.4, n_i = 1.0, \lambda = 10.6 \mu\text{m},$$

则

$$\Lambda < \lambda/(n_s + n_i) \approx 2.5 \mu\text{m}.$$

2.3 二维浮雕结构分析

为简便考虑,研究二维对称的正方柱状浮雕。对于某一偏振状态(如 E 为 x 方向),二维结构可以分解为二个一维结构的组合,如图 2 所示。

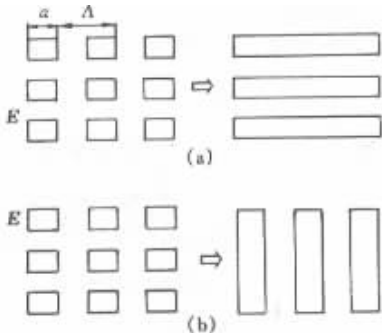


Fig. 2 Approximation of a structure periodic in two dimensions by one in one dimension

对于图 2(a) 的转化

$$\epsilon_{2d}^{\text{pv}} = (1-f)\epsilon_i + f\epsilon_{\perp}, \quad (10)$$

对于图 2(b) 的转化

$$\epsilon_{2d}^{\text{vp}} = (1-f)\epsilon_i + f/\epsilon_{//}, \quad (11)$$

其中, $\epsilon_{//}$ 和 ϵ_{\perp} 分别由(4)式和(5)式求出。

因二维对称性,对 E 为 y 方向的情况,同样可得到上述结果。因此,对称结构的二维浮雕是不依赖于

光波的偏振状态的。其等效折射率可近似选取为:

$$n_{\text{eff}} = \epsilon_{\text{eff}}^{1/2} = [(\epsilon_{2d}^{\text{pv}} + \epsilon_{2d}^{\text{vp}})/2]^{1/2}. \quad (12)$$

2.4 二维浮雕填充因子和刻蚀深度

和单层抗反射镀层一样,当等效折射率 $n_{\text{eff}} = \sqrt{n_s n_i}$ 时,在 $1/4$ 波长处有最小反射率值。浮雕深度

$$h = \lambda/4n_{\text{eff}}. \quad (13)$$

将 $n_{\text{eff}} = \sqrt{n_s n_i}$ 代入等效折射率表达式(12),则可求出填充因子 f 的值。

3 试验制备和结果

考虑到二维对称性,在硅基衬底上制备正方柱状的表面结构,设计对 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ 的抗反射,根据上节分析以及设备最小特征尺寸的考虑,选取浮雕周期 $\Lambda = 2.5 \mu\text{m}$,可以确定浮雕深度 $h = 1.4 \mu\text{m}$,填充因子 $f = 0.80$, $a = 1.4 \mu\text{m}$ 。

实验制备过程是先将双面抛光的硅基薄片清洗干净,然后利用设计的掩模版在 Karlsruhe MJB3 型光刻机上进行光刻,借助光刻胶将图形转移到基片表面,最后在离子刻蚀机上利用氩离子束将预转移的图形刻蚀在衬底上。通过控制涂胶转速确定胶层厚度。为克服离子束流分布及离子束相对衬底表面的入射角对刻蚀速率、侧向刻蚀和刻蚀位置的影响,刻蚀样品置于旋转的载片平台上。调节轰击粒子的能量和刻蚀时间来控制刻蚀速率和刻蚀深度,典型的刻蚀速率为 20 nm/min 。真空度达 $4 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 时充氩气至稳定的真空度 $4 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 后开始刻蚀。

图 3 是实验样品的扫描电镜形貌照片。由于图形尺寸太小,在光刻显影和离子束刻蚀过程中造成了浮雕图形与设计稍有变形。

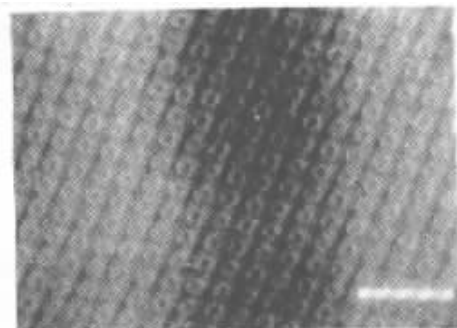


Fig. 3 SEM photograph of the relief structures.

Bar is $10 \mu\text{m}$

图 4 是通过 SLOAN DEKTAK II 型轮廓仪测得的样品的台阶高度分布,测量时采用慢速扫描。可以看出,图形边缘不是陡峭变化而呈现平滑趋势,说明样品的结构图形稍微有些变细而不是标准的正

方柱状结构,导致实际的填充因子小于设计值。

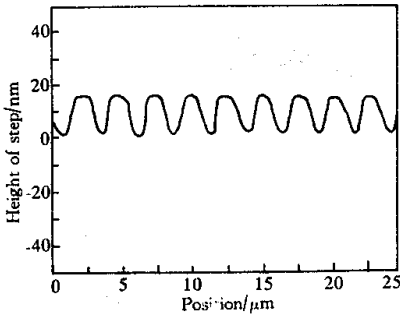


Fig. 4 The profiles of square pillars on substrate

图5是硅片单面刻蚀抗反射结构前后的透射率曲线,测试是在日立红外分光光度计上完成的。

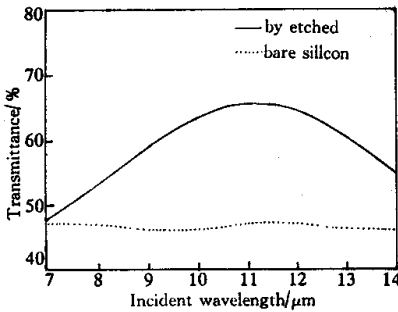


Fig. 5 Measured transmittance of the etched and bare silicon wafers

从图可以看出,在设计中心波长附近,样品的透射率曲线出现峰值,峰值位置透射率比硅片的理论零反射透射率(约70%)偏低,峰值位置对 $\lambda = 10.6\ \mu\text{m}$ 稍有红移。峰值透射率的降低可以归结为偏小的填充因子导致抗反射结构的等效折射率变小,达不到零反射的要求。峰值位置红移是由浮雕结构的实际刻蚀深度超过设计深度引起的。在短波

长方向透过率曲线快速下降的原因可以理解为对较短波长而言,浮雕结构的尺寸非足够小以致于产生了零级以上的衍射光波,使透射光能量受到损失。

结论 1) 二维亚波长浮雕周期结构表面可以产生效果明显的增透作用,可以作为传统抗反射镀层的替代。2) 等效媒质近似理论,对亚波长结构的抗反射应用提供了比较直观的解释。3) 由于等效折射率与填充因子有关,因此可以通过调整填充因子而得到所要求的折射率值,制备人造介质材料,尽管在自然界中拥有这种折射率值的材料并不存在。

参考文献

- [1] Gaylord T K, Baird W E, Moharam M G. Zero-reflectivity high spatial-frequency rectangular-groove dielectric surfaces-relief gratings. *Appl. Opt.*, 1986, **25** (24):4562~4567
- [2] Raguin D H, Morris G M. Antireflection structured surfaces for the infrared spectral region. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(7):1154~1167
- [3] Wilson S J, Hutley M C. The optical properties of moth eye antireflection surfaces. *Opt. Acta*, 1982, **29**(7):993~1009
- [4] Motamedi M E, Southwell W H, Gunning W J. Antireflection surfaces in silicon using binary optics technology. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(22):4371~4376
- [5] Raguin D H, Morris G M. Analysis of antireflection-structured surfaces with continuous one-dimensional surface profiles. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14):2582~2599
- [6] Gram E B, Moharam M D, Pommet D A. Optimal design for antireflective tapered two-dimensional subwavelength grating structures. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1995, **12** (2):330~339
- [7] Lalanne P. On the effective medium theory of subwavelength periodic structures. *J. Modern Opt.*, 1996, **43**(10):2063~2085

Design and Fabrication of Antireflection Structured Surfaces

Chen Sixiang Yi Xinjian Li Yi

(Department of Opto-Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

(Received 10 March 2000; revised 9 August 2000)

Abstract: On the basis of the effective medium theory (EMT), both one-dimensional and two-dimensional periodic structures of antireflection surface are investigated and analyzed. The 2-D relief-structure patterns for antireflection are designed and fabricated on silicon wafers by binary optical processing methods. This 2-D structure can be used as an alternative to thin-film coatings to enhance transmission at the boundary between two different media.

Key words: antireflection; subwavelength structures; binary optics