

# 亚波长浮雕结构的红外抗反射研究\*

陈思乡 易新建 曾延安 陈四海

(华中理工大学光电子工程系, 湖北, 武汉, 430074)

**摘要** 基于等效媒质理论, 对周期性浮雕结构的抗反射特性进行了分析和研究, 给出了二维对称的抗反射浮雕结构等效光学参数的估算方法. 提出了基于最小特征尺寸考虑的脊基和隙空的设计概念. 利用离子束刻蚀工艺技术, 在 Si 片上制备了一种二维红外抗反射浮雕图案. 测试结果表明, 这种表面结构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  $1/4$  波长厚度.

**关键词** 抗反射, 亚波长结构, 二元光学.

## BINARY SUBWAVELENGTH RELIEF STRUCTURES FOR INFRARED ANTIREFLECTION\*

CHEN Si-Xiang YI Xin-Jian ZENG Yan-An CHEN Si-Hai

(Department of Opto-electronic Engineering, Huazhong

University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** Based on the effective medium theory, the antireflection properties of periodic subwavelength surface-relief structures were analyzed and investigated. An estimation method for effective optical index for 2-D symmetric structures was given. Based on the consideration of feature size, the design concept of ridges and meshes was suggested. A two-dimensional infrared antireflection relief pattern was fabricated on a Si wafer, using ion beam etching process. From experimental results, it was shown that the structures, of which the characteristics are similar to that of a single antireflection film, obviously suppressed the reflection in infrared spectrum, and its effective refractive index is equivalent to the refractive index of the film. And the etching depth is equivalent to the thickness of  $1/4$  wavelength of the film.

**Key words** antireflection, subwavelength structure, binary optics.

### 引言

在光学系统中, 由于表面反射的存在, 特别是高折射率材料, 如锗、硅等大的反射损失, 元件对光能透过率大大降低. 因此, 必须采取抗反射措施, 以增强元件的使用价值. 传统的抗反射方法是蒸镀淀积单层或多层抗反射膜系, 但是淀积膜层有其固有的缺陷, 如膜层附着力、抗蚀性以及组份渗透扩散等问题, 并且在某些领域如红外成像, 抗反射膜层将会引起温度升高而影响红外探测器的探测效果, 而由于波长太长, 要求的镀膜太厚, 在低温下还会产生冷凝分层现象. 因此引入更好的增透方法已成为必然. 亚波长结构抗反射表面为解决上述问题提供了契机.

所谓亚波长结构表面是指表面结构尺寸与光波

波长相当或更小时的表面结构. 亚波长结构表面的抗反射作用最初是由飞蛾的眼角膜研究开始认识的. Bernhard<sup>[1]</sup>首次发现一种黑夜飞行的飞蛾为了躲避天敌进行隐蔽和伪装, 其眼角膜几乎不产生对近红外光的反射, 这一发现极大地推动了人们对飞蛾眼角膜结构的研究兴趣. 但最初的研究只是复制这种眼角膜, 随着成熟的微电子加工工艺在二元光学中的引入, 作为二元光学的亚波长结构的研究越来越多, 实用化也越来越近. 由于亚波长表面结构采用二元光学的微电子加工技术完成, 因而作为抗反射表面结构时克服了抗反射膜层的许多不足, 由于表面浮雕结构是由基底刻蚀得到, 和基底为一体, 因此其附着力、抗蚀刻、渗透扩散等问题都不存在.

\* 国家高技术 863 基金资助项目.

稿件收到日期 2000-03-20, 修改稿收到日期 2000-07-07

\* The project supported by the National High Technology (863) Foundation of China).

Received 2000-03-20, revised 2000-07-07

# 1 等效媒质理论

由于亚波长结构表面尺寸与光波波长相当或更小,此时标量衍射理论已经失效,必须运用严格的电磁场的矢量衍射理论进行分析和研究,如耦合波理论<sup>[2,3]</sup>和模态理论<sup>[4]</sup>.但是其引入的巨大运算量使得采用矢量理论计算和设计的二元光学十分困难.

等效媒质理论<sup>[5,6,7]</sup>是研究亚波长结构表面比较直观的近似理论.它认为,当入射光波波长小于浮雕结构周期时,只产生零级的透射和反射衍射.在光波由入射媒质通过亚波长结构区域时,光波的性质类似于光波通过一等效媒质,波阵面的形状不发生改变,等效媒质的光学参数由浮雕的结构特征来确定.对于单台阶的浮雕结构可以用单层反射膜来等效,对于多台阶的浮雕结构可以等效于多层膜系结构,而连续浮雕结构可以等效于一折射率渐变的膜层(见图1).通过媒质等效后可以运用成熟的有关理论进行分析和计算.

分析图2所示一维浮雕结构.由于浮雕周期比光波波长小得多,因此,浮雕结构周期内的场可以认为是均匀的.当电矢量与光栅矢量 $k$ 垂直时,电矢量的切线分量经过不连续表面时是连续的,在浮雕结构周期内将有相同的 $E$ 值,在两个区域内的电位移矢量可写为:

$$D_i = \epsilon_i E, D_s = \epsilon_s E$$

因此,电位移平均矢量为:

$$D = (1-f)D_i + fD_s = (1-f)\epsilon_i E + f\epsilon_s E \quad (1)$$

等效介电常数为:

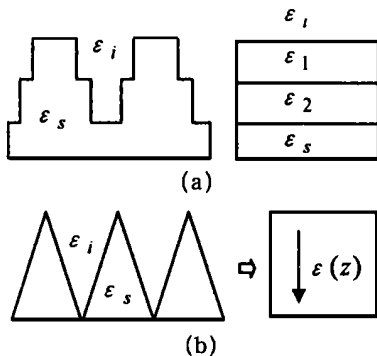


图1 亚波长结构等效媒质近似示意图

(a) 多层膜等效 (b) 渐变折射率层等效

Fig. 1 Diagram of effective mediums approach for subwavelength structures

(a) film stack as the effective medium

(b) gradient index film as the effective medium

$$\epsilon_{E, k} = \frac{D}{E} = (1-f)\epsilon_i + f\epsilon_s, \quad (2)$$

其中 $D$ 和 $E$ 分别为电位移矢量和电场矢量的模.同理,当光波电矢量与 $k$ 矢量平行时(TM偏振模式),等效介电常数为:

$$\epsilon_{E, k} = \frac{\epsilon_i \epsilon_s}{(1-f)\epsilon_i + f\epsilon_s}$$

$$\text{或 } \frac{1}{\epsilon_{E, k}} = \frac{1-f}{\epsilon_i} + \frac{f}{\epsilon_s} \quad (3)$$

其中, $f = a/\Lambda$ 为填充因子, $\epsilon_i$ 和 $\epsilon_s$ 分别为入射媒质和基底介电常数.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:

$$n_{E, k} = [(1-f)n_i^2 + fn_s^2]^{1/2}, \quad (4)$$

$$n_{E, k} = \left[ \frac{1-f}{n_i^2} + \frac{f}{n_s^2} \right]^{-1/2}, \quad (5)$$

此即为等效媒质理论的零级等效折射率表达式,它是依赖于电磁场的偏振状态的,也称为形式双折射.

## 2 设计方法

### 2.1 浮雕周期的简单界定

对于如图2所示的一维周期浮雕结构,满足周期光栅的衍射方程:

$$n_s \sin \theta_m + n_i \sin \theta_i = \frac{m\lambda}{\Lambda}, \quad (6)$$

式(6)中 $\theta_m$ 为第 $m$ 级衍射角, $\theta_i$ 为入射角, $\Lambda$ 为光栅周期, $m$ 为衍射级次.

根据等效媒质理论的假设,光通过浮雕结构时,光栅的衍射仅有零级存在,而 $m=1$ 的一级衍射至少应达到 $\pi/2$ 的临界条件,对于任意的入射角,光栅方程没有实的解.因此可以得出不等式:

$$\frac{\Lambda}{\lambda} < \frac{1}{n_s + n_i}, \quad (7)$$

通过式(7)不等式可以确定亚波长抗反射表面结构

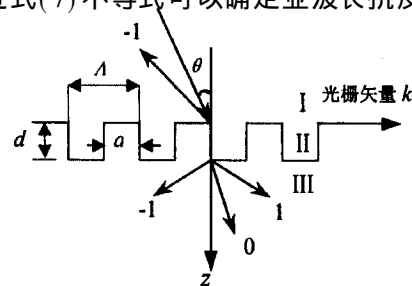


图2 一维结构衍射示意图

Fig. 2 Diffraction diagram of 1-D surface relief structure

的尺寸上限.

## 2.2 浮雕结构等效折射率

为简便考虑, 研究对称的二维正方柱形浮雕. 对于某一偏振状态(如  $E$  平行  $X$  方向), 二维结构可以分解为二个一维结构的组合, 如图 3 所示.

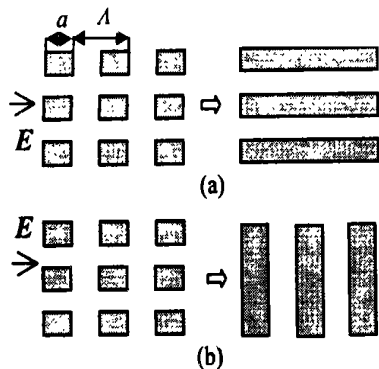


图 3 二维周期结构的一维近似示意图

(a) TM 近似 (b) TE 近似

Fig. 3 Approximation of 2D periodic structures by 1D periodic structures

(a) TM approach, (b) TE approach

对于图 3(a) 的转化

$$\epsilon_{d}^{pp} = (1-f)\epsilon + f\epsilon \quad (8)$$

对于图 3(b) 的转化

$$\frac{1}{\epsilon_{d}^{pp}} = \frac{1-f}{\epsilon} + \frac{f}{\epsilon}, \quad (9)$$

由于二维对称性, 对于  $E$  平行  $Y$  方向的情况, 同样可以得到上述结果, 因此, 对称结构的二维结构是不依赖于光波的偏振状态的, 即不存在一维结构的形式双折射现象. 对于任意偏振状态, 其折射率有几种近似求法:

- (1) 求简单平均值  $\bar{n} = (1-f)n_i + f n_s$ ;
- (2) 将两种偏振状态下的介电常数, 取平均值

$$\epsilon = \frac{1}{2}(\epsilon + \epsilon),$$

$$n = \epsilon^{1/2},$$

因此  $n_{eff} =$

$$\left| \frac{[(1-f)n_i^2 + f n_s^2][f n_i^2 + (1-f)n_s^2] + n_i^2 n_s^2}{2[f n_i^2 + (1-f)n_s^2]} \right|.$$

(3) 先求出  $\epsilon_{d}^{pp}$  和  $\epsilon_{d}^{pp}$  的平均值, 再求出等效折射率值

$$\epsilon_{eff} = \frac{1}{2}(\epsilon_{d}^{pp} + \epsilon_{d}^{pp}), \quad (10)$$

$$n_{eff} = \epsilon_{eff}^{1/2}. \quad (11)$$

在确定了二维浮雕结构的等效折射率表达式后, 可以根据薄膜理论的抗反射条件, 确定浮雕刻蚀深度和填充因子.

浮雕深度为

$$d = \lambda/4n_{eff}, \quad (12)$$

等效折射率为

$$n_{eff} = \frac{1}{n_s n_i}, \quad (13)$$

由于  $n_{eff} = \frac{1}{n_s n_i}$ , 代入式(13)等效折射表达式则可求出填充因子  $f$  的值.

## 2.4 隙空和脊基的混合设计

在对二维结构进行等效设计特别是多层设计的, 当要求的等效折射率值接近基底材料折射率时, 采用前面所述方法简单估计填充因子  $f$  值很大, 图中各方块(称为脊基)间的间隙将变得非常小, 使实际制造变得困难. 如果采用隙空和反填充因子概念则可以解决这个问题. 图 4 表示二维浮雕结构脊基和隙空分布. 二维结构的周期单元可分解为两个部份: 具有和基底相同折射率的脊基以及具有和入射媒质(一般为空气)相同折射率的隙空, 反填充因子即隙空所占的百分数  $r = 1 - f$ . 对于要求较高有效折射率的结构, 应该采用隙空形式, 这样可以使得分布于脊基周围的隙空集中起来, 而对于要求较低有效折射率的结构, 则应采用脊基分布形式, 这样可以使结构的最小特征尺寸达到最大.

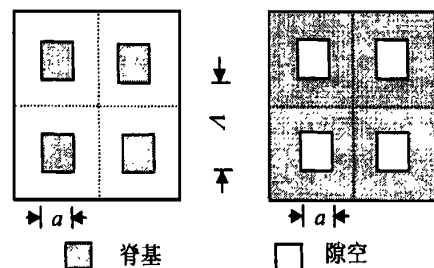


图 4 二维脊基和隙空结构示意图

Fig. 4 2-D ridges and meshes structure

对于图 1 所示多层等效的情况, 较小等效折射率和较大等效折射率都存在, 可以采用隙空和脊基的混合分布形式, 即对于接近基底折射率部分采用隙空分布, 而对于接近较小入射媒质折射率部分采用脊基分布, 从而形成多层的脊基和隙空的混合分布.

## 3 试验与结果

2.3 二维浮雕填充因子和刻蚀深度的确定 考虑二维对称性, 在硅基底上制备正方柱状的

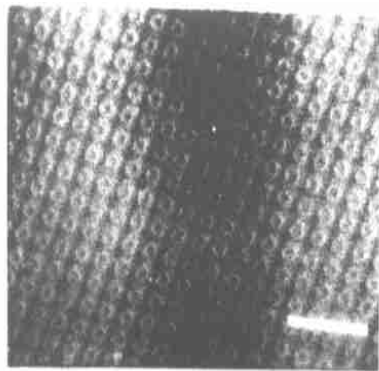


图 5 实验样品的扫描电镜照片  
Fig. 5 SEM photograph of the sample

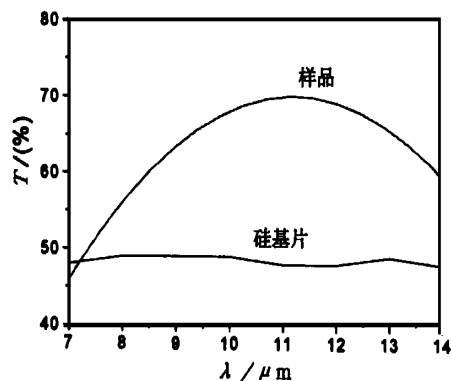


图 6 样品和硅片的红外透射曲线  
Fig. 6 The curves of IR transmittance of the sample and bare silicon wafer

表面结构, 设计对  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$  的红外抗反射, 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  $d = 1.4 \mu\text{m}$ , 填充因子  $f = 0.63$ .

实验制备过程是将双面抛光的硅基薄片清洗干净, 然后利用设计的掩膜版在 Karluss MJB3 型光刻机上进行光刻, 最后在离子束刻蚀机上刻蚀完成, 通过控制刻蚀时间和轰击粒子的能量来控制刻蚀深度和刻蚀速率.

图 5 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.

图 6 是硅片刻蚀抗反射前后的透射率曲线, 测试是在日立红外分光光度计上完成的. 从图 6 上可以看出, 在设计的中心波长附近, 样品的透射率曲线出现峰值, 峰值位置对  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$  稍有右移, 这是由浮雕结构的实际刻蚀深度超过设计深度引起的. 在短波长方向透射率曲线快速下降的原因可以理解为对较短波长而言, 浮雕结构的尺寸不够小, 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.

#### 4 结语

亚波长结构抗反射表面的设计基础是等效媒质近似理论, 设计思想是通过等效媒质近似理论, 结合薄膜理论来确定结构的等效数(如等效介电系数和折射率等), 分析结构的特性尺寸(如填充因子周期),

选择制造方法. 对于一维浮雕光栅结构, 其特性尺寸与入射光的偏振状态有关, 而对于二维对称的浮雕结构, 则与光波的偏振状态无关. 在进行多层等效设计时还须考虑隙空和基脊的选择, 这样可以使制造变得容易.

#### REFERENCES

- [1] Wilson S J, Hutley M C. The optical properties of moth eye antireflection surface, *Optica Acta*, 1982, **29** (7): 993—1009
- [2] Brauer R, Bryngdahl O. Electromagnetic diffraction analysis of two dimensional gratings, *Opt. Comm.*, 1993, **100**: 1—5
- [3] Peng S, Morris G M. Efficient implementation of rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings, *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1995, **12** (5): 1087—1096
- [4] Gaylord T K, Moharam M G. Analysis and application of optical diffraction by gratings, *Proc. IEEE*, 1985, **73** (5): 894—930
- [5] Lalanne P. On the effective medium theory of subwavelength periodic structures, *J. Modern Optics*, 1996, **43** (10): 2063—2085
- [6] Raguin D H, Morris G M. Antireflection structured surfaces for the infrared spectral region, *Appl. Opt.*, 1993, **32** (7): 1154—1167
- [7] Mait J N, Prather D W, Mirotznik M A. Design of binary subwavelength diffractive lenses by use of zeroth order effective-medium theory, *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1999, **16** (5): 1157—1167