

亚波长位相光栅的反射率特性及其应用*

王植恒 傅克祥 文 军 袁景和

(四川大学物理系 成都 610064)

提要 用矢量衍射理论研究了在有限基底上的亚波长位相光栅的反射特性随基底厚度变化的周期性、高透射性、高反射性和偏振分光特性及其可能的应用前景。

关键词 矢量衍射, 亚波长位相光栅, 全透射, 全反射, 偏振分光器

1 引 言

当前光学和光电子学的发展迫切要求研制在各种波段使用的高反射激光膜。人们在研究二元位相光栅时, 已发现光栅参数的设计对光栅的反射率有很大影响。特别是亚波长位相光栅, 由于只有 0 级衍射, 其反射率的变化更为重要。

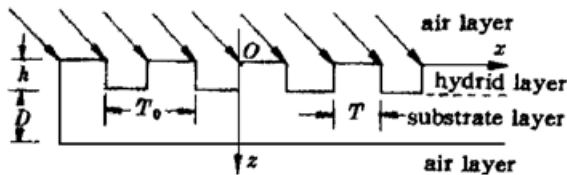


图 1 位相光栅结构图

Fig. 1 The geometry of the phase grating

在研究亚波长光栅的特性时, 已有的文献都没有考虑基底层的影响, 而把它看成是半无限大的介质层^[1~4]。而实际元件的厚度都是有限的, 厚度对反射率的影响是很大的。本文根据文献[5]“位相光栅的半数值矢量解法”设计的程序, 研究了当平面光波垂直入射到图 1 所示的基底厚度为 D 的亚波长位相光栅上, 只存在 0 级反射波和 0 级透射波时, 这种光

栅的反射率特征, 作出了在特定结构参数下反射率随基底厚度变化的曲线, 并对反射率曲线的特性作了分析, 发现反射率在一定条件下是基底厚度的周期性函数, 其周期性是可控制的。在基片的相对折射率 n_s 和入射光波波长 λ_0 给定的情况下, 可灵活调节光栅的周期 T_0 , 填充系数 $b = T/T_0$, 槽深 h 和基底厚度 D , 来实现 TE 波和 TM 波两者均高透射、高反射和一个高透射另一个高反射, 在理论上甚至可实现全反射, 从而可设计出高透射元件、高反射元件和偏振分光元件。

在以下的讨论中, 限定 $T_0 \leq \lambda_0$ 。在垂直入射情况下, 此时在空气层中只存在 0 级衍射, 但由于 $n_s > 1$, 介质基底层中还可能存在若干级次的衍射波。介质中存在多级衍射的条件为

$$\left[\frac{\lambda_0}{T_0 n_s} \right]^2 < 1 \quad (1)$$

在以下的实例计算中, 取 $\lambda_0 = 10.6 \mu\text{m}$, $n_s = 4$ 。计算了在不同光栅结构参数下的反射率, 并作

* 中国工程物理研究院二所和中国科学院光电所微细加工光学技术国家重点实验室资助项目。

出了反射率 R 随基底厚度 D 变化的曲线。

2 基底介质层中只存在 0 级波时的反射特性

由(1)式可知, 当

$$T_0 \leq \frac{\lambda_0}{n_s}, \text{ 即 } T_0 \leq 2.65 \mu\text{m} \quad (2)$$

时, 在空气层和基底层中都只存在 0 级波。

下面计算了两种结构参数的位相光栅在基底厚度变化时其反射率的变化。光栅参数和反射率曲线分别如图 2(a) 和(b) 所示(在以下各图中虚线代表 TM 波, 实线代表 TE 波)。

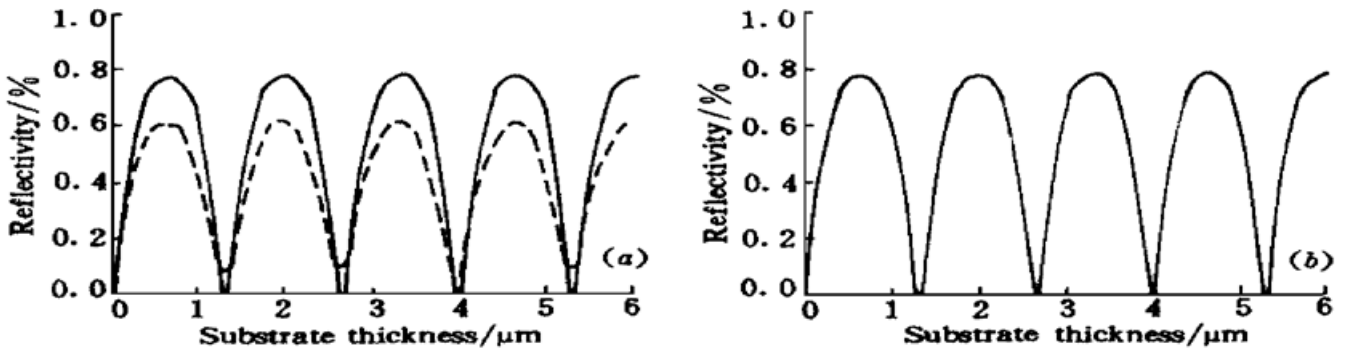


图 2 反射率随基底厚度变化的曲线图

Fig. 2 The curve shows the relationship of the reflectivity and the substrate thickness
 (a) $T_0 = 0.8 \mu\text{m}$, $b = 0.5$, and $h = 1.792 \mu\text{m}$; (b) $T_0 = 0.8 \mu\text{m}$, $b = 0.506$, and $h = 3.62 \mu\text{m}$

图 2(a), (b) 随基底厚度 D 变化的反射率曲线显示了很强的周期性。周期 $T = 1.325 \mu\text{m}$, 它刚好等于均匀介质中的半波长 $\lambda_0/2n_s$ 。这是介质基底层中 0 级衍射波自相干涉的必然结果。只要 T_0 满足条件(2) 式, 在 T_0, b, h 任意给定的条件下, 反射率曲线的周期不变。由图 2(a) 可知, TE 波和 TM 波反射率的最大值或最小值的位置一般不重合且不相等, 最小值一般不等于零, 最大值小于 0.8。但是, 通过调整参数 T_0, b, h , 就可使 TE 波和 TM 波的反射率曲线重合(见图 2(b)), 且最小值为 0, 实现了全透射。

由图 2(a) 所表现出来的反射率变化特征, 与厚度为 h 的各向异性介质单层薄膜的反射率特征完全相同^[6], 称这种薄膜为“亚波长微结构薄膜”(Subwavelength Micro-structure Film, 简称 SMF)。利用图 2(b) 使 TE 波和 TM 波同时高透射的这个特性, 可以设计出一个对任意偏振光或非偏振光高透射的元件。

3 基底层中同时存在 0 级和 ±1 级波时的反射特性

由(1)式可知, 当

$$\frac{\lambda_0}{n_s} < T_0 \leq \frac{2\lambda_0}{n_s}, \text{ 即 } 2.65 < T_0 < 5.3 \mu\text{m} \quad (3)$$

时, 在基底层中将同时存在 0 级和 ±1 级波。

取图 3 所示的光栅结构参数, 可看出图 3 随基底厚度 D 变化的反射率曲线比图 2(a), (b) 复杂, 但也显示了周期性, 其明显的特征是反射率最大值为 1。在图 3 中, 周期 $T = 2.65 \mu\text{m}$, 使

反射率为 1 的间距为 $\tau_1 = 2.65 \mu\text{m}$ 。如果把尖峰平滑掉, 还存在一个准周期 $\tau = 1.325 \mu\text{m}$ 。 τ 和 τ_1 分别是 0 级和 ± 1 级波自相干涉的结果。0 级波自相干涉的周期为介质中的半波长, 即 $\tau = 1.325 \mu\text{m}$ 。 ± 1 级波经过的路径是如图 4 所示的斜线, 它与界面法线夹角 θ 的余弦为

$$\cos\theta = \frac{K_z}{K_{\text{med}}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} n_s\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{T_0}\right)^2}}{2\pi \frac{n_s}{\lambda_0}} = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{T_0 n_s}\right)^2}$$

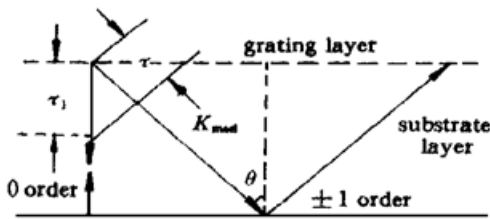


图 4 ± 1 级经过的路径

Fig. 4 The path of ± 1 orders

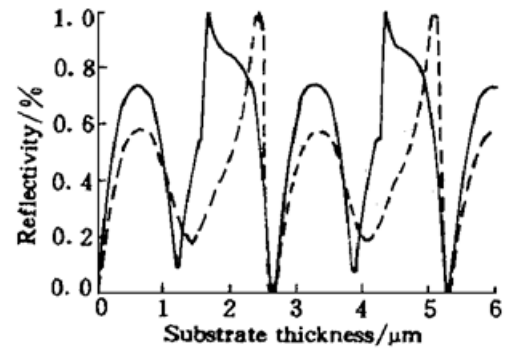


图 3 反射率随基底厚度变化的曲线图

Fig. 3 The curve shows the relationship of the

$$(4) \quad T_0 = 3.06 \mu\text{m}, b = 0.4739, \text{ and } h = 1.69 \mu\text{m}$$

K_{med} 为介质中的波矢量的大小, K_z 为介质中的波矢量的 Z 分量的大小。当等相位面移动半个波长 τ 时, 对应于基底厚度的变化量

$$\tau_1 = \frac{\tau}{\cos\theta} \quad (5)$$

对于图 3 的情况, 由(5) 式得 $\tau_1 = 2.65 \mu\text{m}$ 。

由于空气层中只存在 0 级波, 空气层中反射率的值必是基底层中 0 级波和 ± 1 级波共同作用的结果, 其周期只能是 0 级和 ± 1 级的公共周期。对于图 3, 公共周期 $T = 2\tau = 2.65 \mu\text{m}$, 这就完全解释了反射率的周期性特征。我们还算了一些其他实例, 都符合这种规律。反射率能达到 1, 是由于 ± 1 级波因全反射而引起谐振的结果。由图 3 可以看到, 虽然 TE 波和 TM 波反映出来的这种周期性特征相同, 但反射率取得极大值的位置是不同的。这是由于 TE 波和 TM 波刚好由光栅混合层出射时的初位相不同, 在基底面上 ± 1 级反射波的附加位相也不同所引起的。

TE 波和 TM 波的全反射是这种结构光栅所独有的, 利用这个特性可实现对偏振波的全反射。这时的光栅层就不能被简单地等效成一种均匀介质薄膜, 因为均匀介质薄膜是不能实现全反射的。

4 基底层中同时存在更多级次波的反射特性

由(1) 式可知, 当

$$3 \frac{\lambda_0}{n_s} < T_0 \leq 4 \frac{\lambda_0}{n_s}, \text{ 即 } 7.95 \mu\text{m} < T_0 \leq 10.6 \mu\text{m} \quad (6)$$

时, 在基底层中将同时存在 0 级, ± 1 级, ± 2 级和 ± 3 级波。

按图 5(a), (b) 取光栅的结构参数, 在这两种情况下, 由于若干级次波的相互作用, 基本不存在各级衍射波的公共周期, 因而反射率曲线不存在周期性。由于各级波自相干的准周期不同, 各级全反射引起的谐振点将错开适当的位置, 当这几个谐振点配搭适当时, 就会使反射率在一个较宽的范围(指基底层厚) 内达到 100% (见图 5(a), (b))。这是此种结构光栅的最大特点, 从而为设计高反射元件放宽了在工艺上对制作参数的限制。在图 5(a) 中, 对于 TM 波, 当 $D = 2.14 \sim 2.38 \mu\text{m}$ 时, 反射率均为 1, 我们可以在很宽的基底厚度范围内实现 TM 波的高反

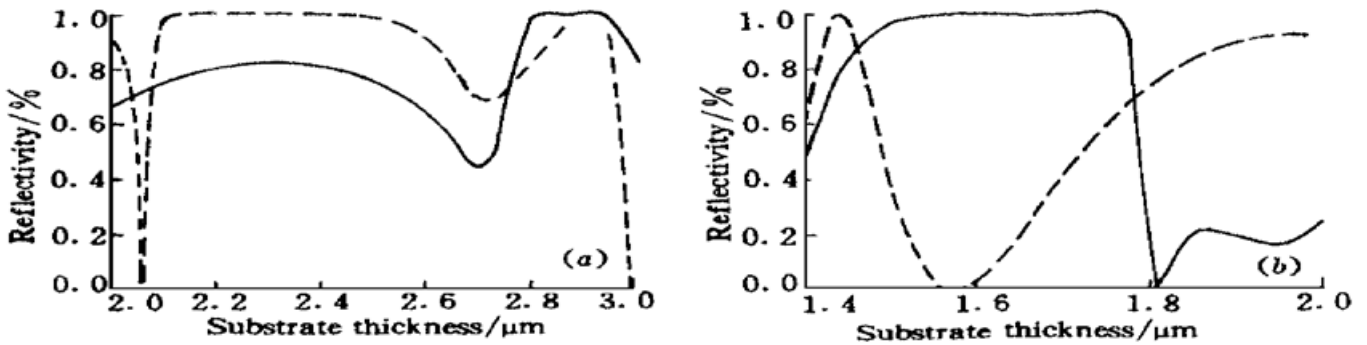


图 5 反射率随基底厚度变化的曲线图

Fig. 5 The curve shows the relationship of the reflectivity and the substrate thickness

(a) $T_0 = 10 \mu\text{m}$, $b = 0.5$, and $h = 2.35 \mu\text{m}$; (b) $T_0 = 10 \mu\text{m}$, $b = 0.5$, and $h = 2.20 \mu\text{m}$

射。在 $D = 2.91 \mu\text{m}$ 处, TE 波和 TM 波的反射率均为 1, 在此处可以实现对任意偏振波或非偏振波的高反射。在图 5 (b) 中, 在 $D = 1.575 \mu\text{m}$ 处, TE 波的反射率为 1, 而 TM 波的反射率为 0。在此处可实现对 TE 波和 TM 波的完全分离。利用此特性, 可设计出一个起偏器。如果入射的是线偏振波, 只要旋转这种起偏器, 就可以使反射波与透射波的比例作任意分配, 因而它也是一个偏振分光开关器件。

应当注意的是, 经数值计算的结果表明:

(1) 要使反射率为 1, 其必要条件是

$$\frac{\lambda_0}{n_s} < T_0 \leq \lambda_0 \quad (7)$$

在这个范围之外, 是不会出现全反射现象的;

(2) 要实现宽范围(指基底层厚)的高反射, 在基底层中至少应同时存在 0 级、 ± 1 级和 ± 2 级波, 这就是说, 要使 $n_s > 2$ 。

5 结 论

(1) 可以通过调整光栅的周期来使各层中只存在 0 级波。通过调整光栅的其他参数可实现 TE 波和 TM 波的高透射, 从而可设计出减反射元件;

(2) 调整光栅的周期可控制基底层中存在的衍射级次。同时实现对反射率的控制。

(3) 通过调整光栅的结构参数可实现 TE 波(或 TM 波)在宽范围基底厚度下的高反射, 或在某一基底厚度下的 TE 波和 TM 波均高反射, 或在某一基底厚度下 TE 波的高反射与 TM 波的高透射, 从而可设计出高反射元件或偏振分光开关元件。

(4) 本文只讨论了在 $0 \sim 6 \mu\text{m}$ 基底厚度范围反射透射特性范围的变化曲线, 由于曲线随基底厚度的变化具有明显的周期或准周期特性, 因此, 大于 $6 \mu\text{m}$ 的基底厚度仍具有同样的变化特性。同时, 本文研究的位相光栅可实现和部分超过目前光学薄膜的光反射性能, 这种以微结构组成的亚波长微结构薄膜(SWF)可能对光学技术的发展起重要的作用。

参 考 文 献

- 1 K. Knop. Rigorous diffraction theory for transmission phase gratings with deep rectangular grooves. *J. Opt. Soc. Am.*, 1978, **68**(9): 1206~ 1210

- 2 E. Noponen, J. Tarunen. Eigenmode method for electromagnetic synthesis of diffractive elements with three-dimensional profiles. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(9) : 2494~ 2502
- 3 E. B. Gran, M. G. Moharam. Hybrid two-dimensional subwavelength surface-relief grating-mesh structures. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(5) : 800
- 4 Zhang Guoping, Ye Jiexiong, Li Zaiguang. Coupled-wave analysis of polarization properties of phase grating. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(12) : 1819~ 1823 (in Chinese)
- 5 Fu Kexiang, Wang Zhiheng, Zhang Dayue *et al.*. A vector analytical method of phase diffraction grating. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(12) : 1652~ 1659 (in Chinese)
- 6 Eric B. Grann, M. G. Moharam, Drew A. Pommet. Artificial uniaxial and biaxial dielectrics with use of two-dimensional subwavelength binary gratings. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(10) : 2695~ 2703

The Property and Application of Reflectivity of Subwavelength Phase Gratings

Wang Zhiheng Fu Kexiang Wen Jun Yuan Jinghe
(*Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064*)

Abstract In this paper, using a vector diffraction theory, it is shown that the properties of the period, the high transmissivity, the high reflectivity and the polarization spectral characteristics of the subwavelength phase gratings with a finite substrate are associated with the substrate thickness. The application of the gratings would be promising.

Key words vector diffraction, subwavelength grating, total transmissivity, total reflectivity, polarization spectrometer