

线性共蒸法制备非均匀膜的误差特性模拟分析*

沈自才^{1,2}, 孔伟金^{1,2}, 邵建达¹, 范正修¹

(1. 中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 对双源线性共蒸法制备的非均匀薄膜折射率分布与光学特性的关系作了探讨, 并与均匀介质膜的光学特性作了对比; 从折射率正变和负变两个方面, 讨论了混合介质膜折射率不同变化规律对光学性能带来的影响; 讨论了厚度误差和折射率极值误差对非均匀膜光学性能的影响。结果发现: 折射率变化规律误差主要对非均匀膜的应用波段范围产生影响, 而膜层厚度误差和折射率极值误差超过一定值时, 将对薄膜光学特性产生重要影响。

关键词: 光学薄膜; 非均匀; 渐变折射率; 共蒸法

中图分类号: O484 **文献标识码:** A

渐变折射率薄膜, 又称为非均匀膜, 其主要特征为沿着膜层表面的法线方向折射率连续变化, 而在垂直于法线的水平方向上折射率保持不变^[1]。与传统的分层介质膜相比较, 渐变折射率薄膜既消除了膜层间的界面及其带来的不稳定性, 又极大地增加了膜系设计的调控度, 可以用来满足现代薄膜光学中均匀薄膜所无法满足的光谱特性要求, 并有望在性能稳定性上获得较大提高。

渐变折射率薄膜的研究与均匀膜相比还缺乏更深入的研究。在应用上, 目前主要研究的是增透膜、太阳能玻璃吸收膜、啁啾介质激光镜^[2,3]和 rugate 滤光片^[4,5]等, 特别是在高功率激光元件中, 高损伤阈值光学薄膜的制备已经成为限制各种激光器件整体性能的“瓶颈”。渐变折射率薄膜, 由于消除了界面, 可以大大提高薄膜的抗激光损伤阈值。

在以前的工作中, 作者对共蒸法制备的非均匀膜的光学特性进行了详细的讨论。但由于设备和控制误差等因素的影响, 实际制备中总是会产生一些误差, 主要有薄膜厚度误差、折射率变化规律误差、折射率极值误差等。本文将对各种可能产生的误差对多周期非均匀膜光学性能带来的影响进行探讨, 这将对制备高性能光学薄膜如高抗激光损伤阈值的光学滤光片具有重要指导意义。

1 非均匀膜的折射率分布对光谱透射率性能的影响

在以前的工作中, 我们假设在用双源共蒸法制备渐变折射率薄膜时, 两种膜料的沉积单分子大小近似相等、沉积速率为线性变化、总沉积速率为两种膜料的沉积速率之和且为常数。在这些条件下, 分别运用德鲁德理论和罗伦兹-罗伦茨理论^[6]对线性共蒸法制备的非均匀膜的折射率变化规律进行了模拟分析, 得到非均匀膜的折射率变化规律形式分别为^[7]

$$n(z) = \left\{ \frac{n^2(0) - [n^2(0) - n^2(h)]z/h}{n^2(h) - n^2(0) - n^2(h)z/h} \right\}^{1/2} \quad (2)$$

式中: $n(0)$, $n(z)$ 和 $n(h)$ 分别是膜层厚度为 0, z 和 h 的薄膜的折射率。图 1 给出了薄膜折射率从 1.46 到 1.92 的多周期非均匀膜的折射率分布示意图, 每个周期的几何厚度为 $2h$ 。

假设在多周期性分布的非均匀薄膜变化中, 折射率首先从低折射率向高折射率变化称为正变, 折射率首先从高折射率向低折射率变化称为负变。膜层的折射率从高变到低再变到高或者从低变到高再变到低称为一个周期, 有几个完整连续的

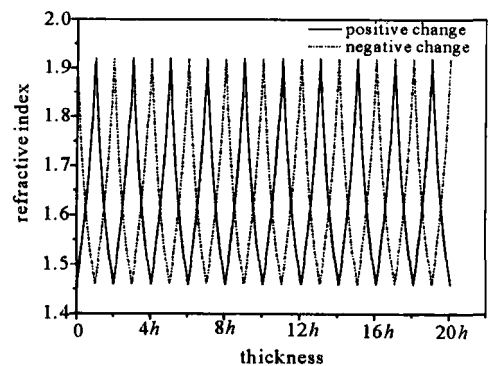


Fig. 1 Periodic changes of refractive index

图 1 折射率的周期分布示意图

* 收稿日期: 2004-11-18; 修订日期: 2005-01-05

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 沈自才 (1980—), 男, 博士研究生, 主要从事渐变折射率光学薄膜和新材料的研究; 上海市 800-211 信箱; E-mail: zicaishen@163.com。

“高-低-高”或者“低-高-低”折射率连续变化称为完整周期的折射率负变或者正变,若在几个完整周期后还有半个周期的渐变折射率连续变化称为存在半周期分布的非均匀膜。

图 2 给出了分别应用德鲁德理论和罗伦兹-罗伦茨理论时多周期分布非均匀膜的透射光谱示意图,周期数分别为 9 和 9.5,单周期厚度为 250 nm,基底的折射率为 1.52,膜的结构为:空气/膜层/基底。其中(a),(b),(c),(d)分别为多周期正变、多周期负变、存在半周期的多周期正变和存在半周期的多周期负变时的情况。为了比较,同时给出了相同几何厚度和折射率极值大小的多周期分布均匀介质膜的透射率光谱曲线。

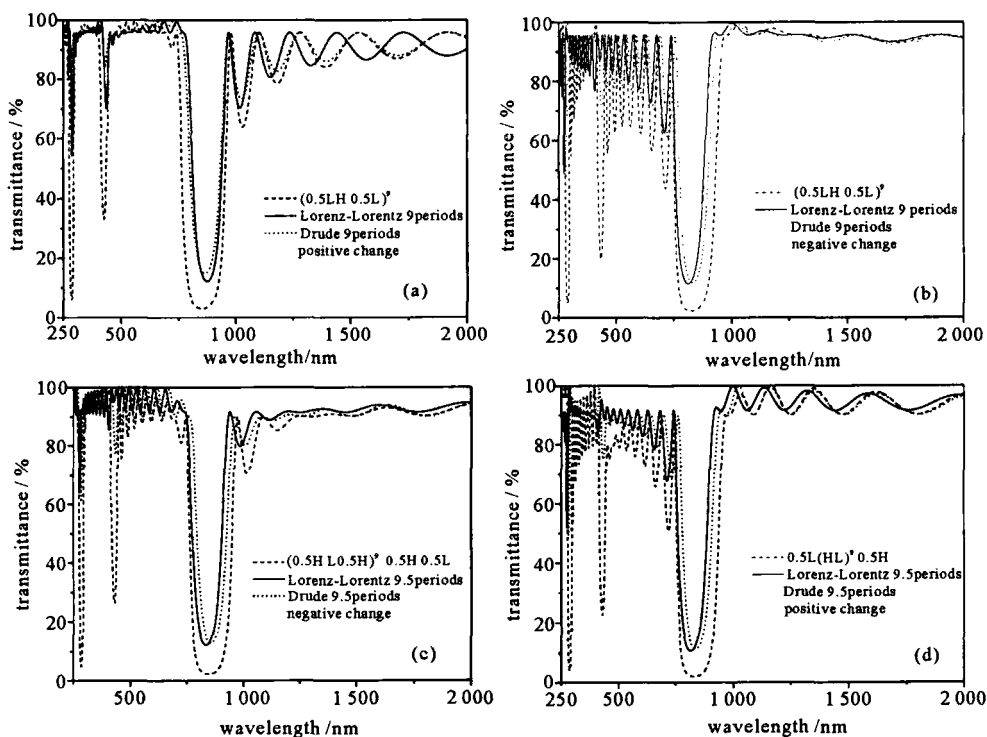


Fig. 2 Transmittances of inhomogeneous and homogeneous coatings

图 2 非均匀膜与均匀膜的透射光谱示意图

由图 2 可知,在两种理论下的多周期分布非均匀膜正变时,完整周期非均匀膜的膜层折射率分布与短波通均匀介质层状膜系 $(0.5LH0.5L)^n$ 类似;存在半周期的非均匀膜的膜系类似于层状膜系 $0.5L(HL)^n0.5H$ 。当两种理论下的多周期分布为负变时,完整周期分布的非均匀膜的负变多周期膜系与长波通层状介质基本膜系 $(0.5HL0.5H)^n$ 类似;而存在半周期时的负变多周期膜系类似于均匀介质层状膜系 $0.5H(LH)^n0.5L$ 。但是非均匀介质膜的透射率大于均匀介质膜的透射率。相应的可用于长、短滤光片的范围较宽,但是用于负滤光片的范围则较均匀介质膜的窄。

对德鲁德理论和罗伦兹-罗伦茨理论下的透射光谱图分析可知^[6],两种理论下的相应的透射率曲线基本相似,尤其对可以较理想地应用于短波通滤光片和长波通滤光片的情况。因此可以用德鲁德理论来分析线性共蒸法沉积的非均匀膜的光学特性。

2 误差特性分析

在以前的讨论中,假设两种膜料的沉积单分子大小相等,总的沉积速率为两种膜料的沉积速率之和;但是在实际制备中,膜料的沉积单分子大小并不相等,而非均匀膜的沉积速率为两种膜料的沉积速率之和也将带来误差,此外,还有设备的监控误差等,这些都将对非均匀膜的折射率变化规律、膜层厚度和折射率可达到的极值等带来误差。下面讨论误差对非均匀膜光学特性的影响。

2.1 折射率变化规律不同对非均匀膜光学性能的影响

在非均匀膜的实际制备时,设备等客观因素将对非均匀膜的折射率变化规律带来误差。下面给出几种常见的折射率变化规律,如:线性、正弦、双曲和指数等来研究折射率变化规律发生变化时对非均匀膜光学性能的影响。

$$n(z) = \begin{cases} m_1 + (n_2 - m_1) z/h & \text{线性} \\ \frac{m_1 n_2}{n_2 - (n_2 - m_1) z/h} & \text{双曲} \\ m_1 \left(\frac{n_2}{m_1}\right)^{z/h} & \text{指数} \\ m_1 + (n_2 - m_1) \sin\left[\frac{z}{2} z/h\right] & \text{正弦 1} \\ m_2 + (n_2 - m_1) \sin\left[\frac{z}{2} (3 + z/h)\right] & \text{正弦 2} \end{cases} \quad (3)$$

对折射率分别为 1.46 和 1.92 的两种膜料,正变取 $m_1 = 1.46, m_2 = 1.92, n(z)$ 为薄膜厚度为 z 时的折射率。其 9 个周期分布的正变和负变透射光谱示意图见图 3。

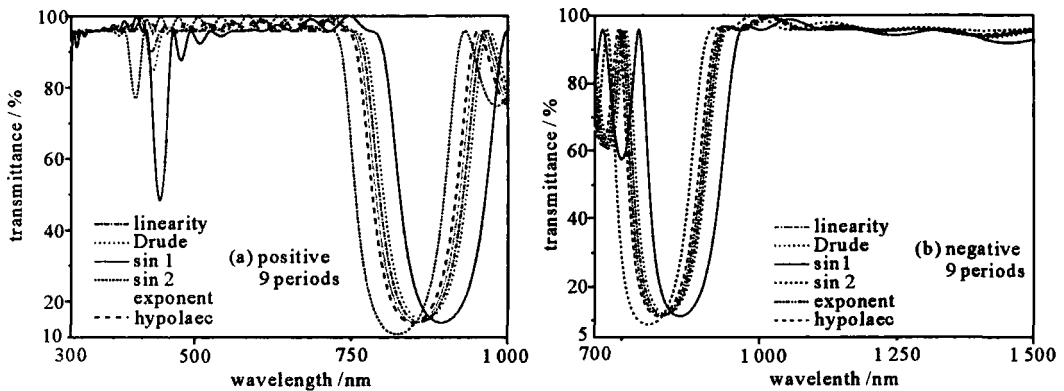


Fig. 3 Transmittances of inhomogeneous filters with different rules

图 3 几种不同规律的非均匀滤光片透射光谱示意图

由透射光谱图分析可知,不同折射率变化规律的多周期分布非均匀膜图谱基本相似;正弦 1 变化、德鲁德变化、线性变化、指数变化、双曲变化和正弦 2 的透射光谱曲线依次向左漂移。在正变的多周期分布非均匀膜中,线性变化规律与德鲁德变化规律基本相似,其透射光谱图见图 4;双曲变化和指数变化基本没有波谷,大大拓宽了透射光谱范围,见图 5;正弦 2 变化规律有波谷存在,但和德鲁德变化规律比较也拓宽了可应用的透射光谱范围,正弦 1 变化规律则由于波谷波动较大,减小了透射光谱范围。在负变的多周期分布非均匀膜中,透射光谱图形基本相似。

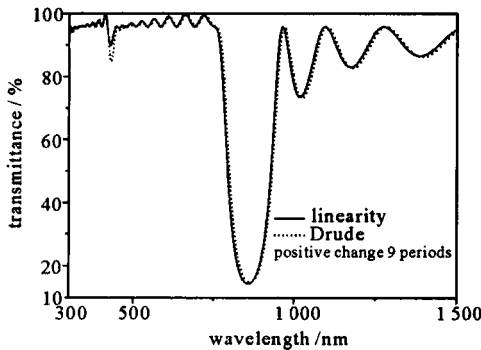


Fig. 4 Transmittance of linear inhomogeneous coatings

图 4 线性变化非均匀膜的透射光谱图

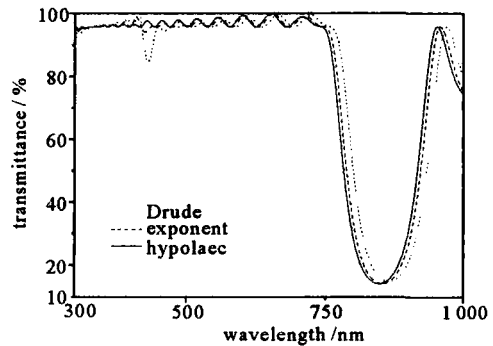


Fig. 5 Transmittance of hyperbola and exponent inhomogeneous coatings

图 5 双曲和指数变化非均匀膜透射光谱图

由上面分析可以看出,即使在折射率变化规律存在误差的情况下,线性共蒸法沉积的多周期分布非均匀膜仍可作为长波通和短波通滤光片,但应用的波段范围将发生变化。

2.2 膜层厚度误差对非均匀膜光学性能的影响

在薄膜的制备过程中,膜厚误差总是存在的。下面的讨论中,假设非均匀膜半周期厚度的最大偏差分别为 $\pm 3, \pm 5, \pm 7, \pm 10, \pm 15$ nm,而每个半周期膜层的厚度在此范围内随机波动,膜层变化规律为德鲁德变化,产生随机厚度误差后的非均匀膜透射光谱图见图 6。

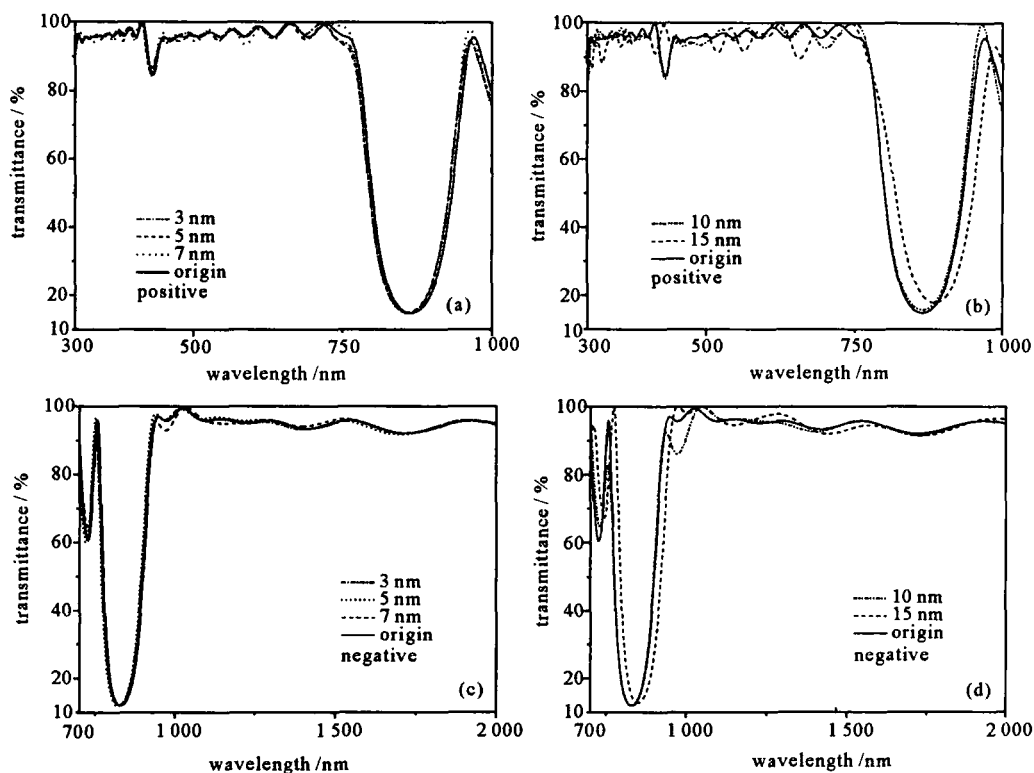


Fig. 6 Influence of thickness-error on the optical characteristics of coatings

图 6 厚度误差对薄膜光谱特性的影响示意图

由透射光谱图可以看出,随着膜层厚度随机波动误差的逐渐增大,可应用于滤光片的波段范围内光学性能逐渐变差。由图谱分析知道, ± 7 nm 以内的厚度随机误差对非均匀膜的光学性能影响较小,大于 ± 7 nm 厚度误差将会对非均匀薄膜的光学性能产生较大影响。因此应该较好控制沉积参数,尽量减小沉积厚度误差。

2.3 折射率极值误差对非均匀膜光学性能的影响

在多周期非均匀膜的制备中,由于沉积条件等的波动,引起沉积的非均匀膜的折射率最大和最小极值发生随机波动。在下面的讨论中,假设折射率极值的随机波动范围分别为 ± 0.02 和 ± 0.03 。单周期薄膜的折射率变化规律为德鲁德变化,理论和发生波动后的透射光谱示意图见图 7。

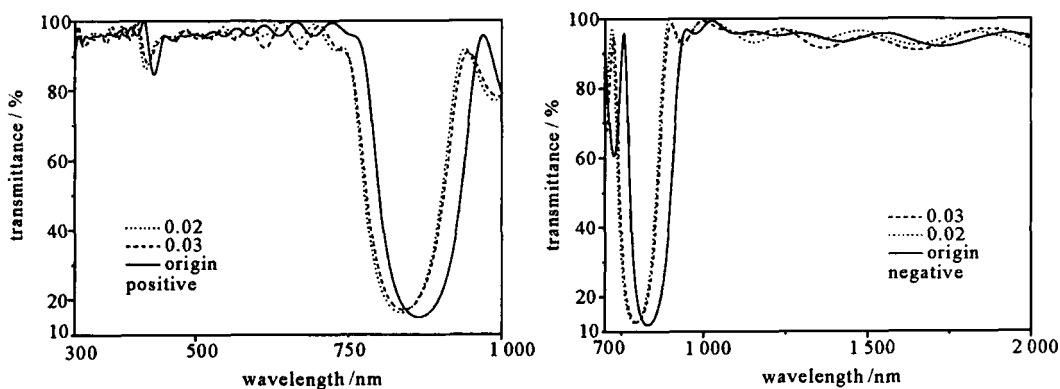


Fig. 7 Influence of index-error on the optimal characteristics of coatings

图 7 折射率误差对薄膜光谱特性的影响示意图

由图中分析可以看出,薄膜的折射率范围发生随机波动后,在可应用的滤光波段内透射性能降低。当折射率极值随机波动误差为 ± 0.02 时,对非均匀膜的光学性能影响较小;但当为 ± 0.03 时,将对薄膜的光学性能产生较大的负面影响。因此,在非均匀膜的制备过程中,要严格控制沉积参数的相对稳定,使之折射率极值误差控制在 ± 0.03 以内,这在理论上和实验上均是可行的。

3 结 论

完整周期的正变非均匀膜折射率分布与短波通多层介质基本膜系 $(0.5LH0.5L)^n$ 类似;存在半周期的正变非均匀膜系类似于多层周期介质膜系 $0.5L(HL)^n0.5H$;完整周期分布的非均匀膜的负变多周期膜系与长波通多层介质基本膜系 $(0.5HL0.5H)^n$ 类似,而存在半周期时的负变多周期膜系类似于多层介质膜系 $0.5H(LH)^n0.5L$ 。

当折射率变化规律不同时,线性变化规律的多周期非均匀膜光谱特性与德鲁德理论变化规律的线性共蒸非均匀膜光谱特性相似;双曲变化和指数变化基本没有波谷,大大拓宽了透射光谱范围;正弦 2 变化规律有波谷存在,但和德鲁德变化规律比较也拓宽了可应用的透射光谱范围,正弦 1 变化规律则由于波谷波动较大,减小了透射光谱范围。

在折射率极值和膜层厚度存在随机波动误差时, ± 7 nm 以内的半周期膜厚随机误差对非均匀膜的光学性能影响较小, ± 0.02 的折射率极值随机误差对非均匀膜的光学性能影响较小,但当超出这个范围时,对非均匀膜的光学性能将产生较大的影响。

参考文献:

- [1] 林永昌,卢维强.光学薄膜原理[M].北京:科学出版社,1990.139.(Lin Y C,Lu W Q. The principle of optical coatings. Beijing: Science Press, 1990. 139)
- [2] Sankur H, Southwell W H. Broadband gradient-index antireflection coating for ZnSe[J]. *Appl Opt*, 1984, **23**(16):2770—2773.
- [3] Szipocs R, Kohár Kis A. Theory and design of chirped dielectric laser mirrors[J]. *Appl Phys B*, 1997, **65**(2):115—135.
- [4] Linkens D A, Abbod M F, Metcalfe J, et al. Modeling and fabrication of optical interference rugate filters[J]. *ISA Transactions*, 2001, **40**: 3—16.
- [5] Bertrand G B. Rugate filter theory: an overview[J]. *Appl Opt*, 1993, **32**(28):5427—5442.
- [6] 尹树百.光学薄膜-理论与设计[M].北京:科学出版社,1987.279.(Yin S B. Theory and design of optical films. Beijing: Science Press, 1987. 279)
- [7] 沈自才,王英剑,范正修,等.线性共蒸法制备非均匀膜的光学特性分析[J].中国激光,2005, **32**(6):829—834.(Shen Z C, Wang Y J, Fan Z X, et al. Analysis of optical characteristics of gradient index coatings prepared by linear co-evaporation. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(6):829—834)

Simulation analysis of error characteristic of inhomogeneous coatings prepared by linear co-evaporation

SHEN Zi-cai^{1,2}, KONG Wei-jin^{1,2}, SHAO Jian-da¹, FAN Zheng-xiu¹

(1. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,

P. O. Box 800-211, Shanghai 201800, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The optical properties of inhomogeneous coatings which were prepared by double-source linear co-evaporation, were discussed and compared with that of homogeneous coatings. The influences of the refractive index distributions, maximum index-departure and coating thickness-deviation on the optical characteristics of coatings were discussed respectively. Analysis results show that the refractive-index distribution regularity error has important influence on the wavelength application range of the coatings, and the thickness error or index-departure has vital influence on the optical properties of inhomogeneous coatings.

Key words: Optical film; Inhomogeneous; Graded index; Co-evaporation