

# Rugate 光学薄膜通带内反射次峰的抑制

战元龄 曲会忠 张铁群

(南开大学 物理系, 天津 300071)

## 提 要

本文探讨了抑制 Rugate 光学薄膜通带内反射次峰的各种方法。以五次函数匹配和正弦调制相结合的方法获得了在宽光谱范围内能很好抑制反射次峰并能保持其截止带反射率的 Rugate 膜系。

关键词: Rugate 光学薄膜, 次峰的抑制。

Rugate 光学薄膜由于其独特的优点<sup>[1]</sup>, 近年来受到人们的关注。Rugate 光学薄膜是指其折射率  $n$  随膜厚  $x$  呈正弦周期性变化的光学薄膜

$$n(x) = n_a + \frac{1}{2} n_p \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right), \quad (1)$$

式中  $n_a$  为光学薄膜的平均折射率,  $n_p$  为折射率变化的峰值,  $p$  为折射率变化的周期。(1)式决定了该膜系的截止带的性质。若以  $\lambda_0$  表示截止带中最高反射率的波长, 以  $\Delta\lambda$  表示其带宽, 对垂直入射的情形, 则有<sup>[2]</sup>

$$\lambda_0 = 2n_a p, \quad (2)$$

$$\Delta\lambda = (n_p \lambda_0 / 2n_a), \quad (3)$$

在这种膜结构上, 入射光发生类布喇格反射, 从而得一窄带的反射滤光片, 折射率变化的幅度越小, 带宽越窄。当然, 此时为达到高反射率, 则要求折射率正弦变化的周期数要大, 即膜层要厚。

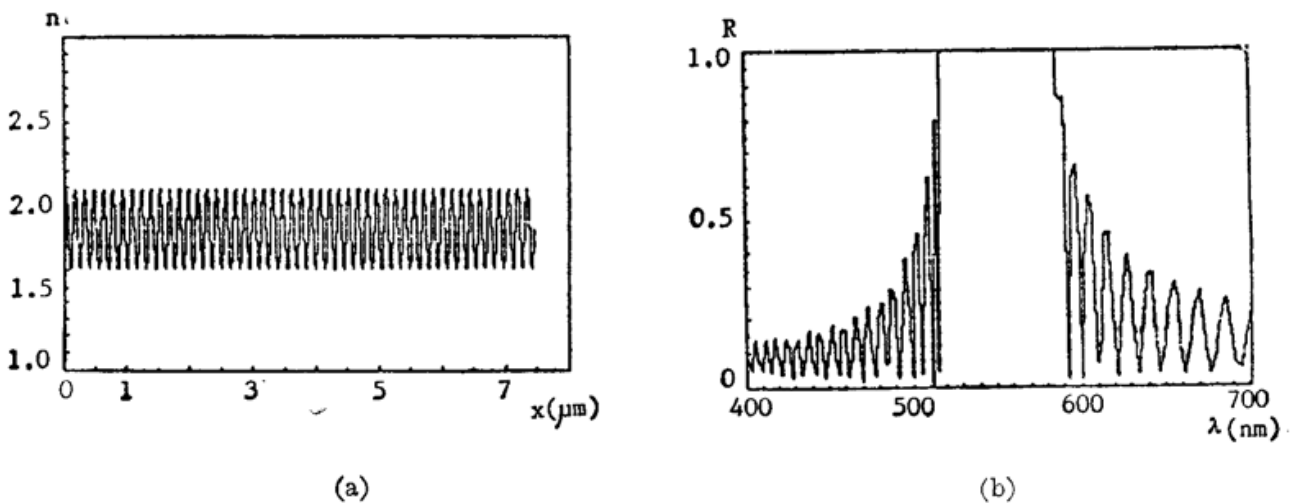


Fig. 1

- (a) Index profile for a fifty-cycle rugate.  $n_a=1.84$ ,  $n_p=0.46$ ,  $n_0=1.0$ ,  $n_s=1.53$ ;
- (b) Reflectance of the rugate

(1)式表示的光学薄膜,通常内有反射次峰存在(见图1(b)),从而降低了通带的特性,为此人们<sup>[3,4]</sup>进行压低次峰的研究,本文旨在探讨通过各种方法抑制反射次峰的可能性,计算结果表明,将五次函数匹配和正弦调制相结合可获得满意的结果。

为进行计算,我们取折射率变化周期数为50,将每周期划分为20层,用特征矩阵法对各种修正的Rugate光学薄膜计算了其在波长范围400~700 nm内的光谱特性,计算中其它各参数值分别为: $\lambda_0=550$  nm,  $n_a=1.84$ ,  $n_p=0.46$ , 入射介质折射率  $n_0=1$ , 基底折射率  $n_s=1.52$ 。计算结果如下:

### 1. (1)式所示的Rugate膜系

图1(a)和图1(b)分别表示出其折射率分布及其光谱特性。可见,截止带的反射特性良好,边缘变化也陡,但其两侧的通带区有显著的反射次峰存在。

### 2. 在膜层与基底之间加 $-\lambda/4$ 的匹配层,并使其折射率

$$n_m = \sqrt{n_s n_a}$$

所得结果如图2所示,可见,反射次峰有所降低,但仍很高。

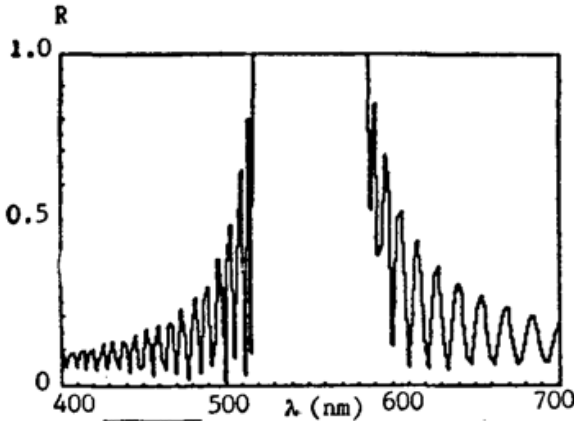


Fig. 2 Reflectance of the rugate with a quarterwave matching layer

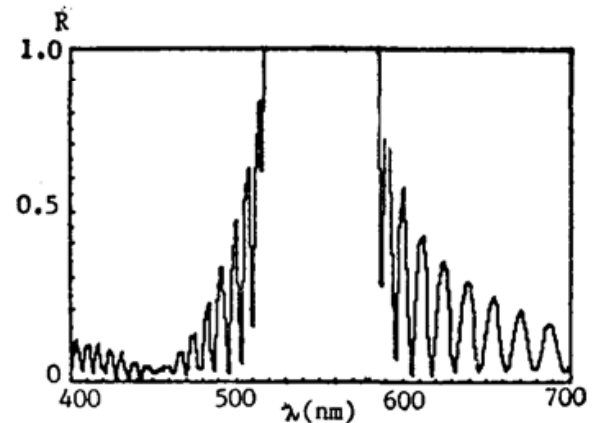


Fig. 3 Reflectance of the corresponding rugate

### 3. 五次函数匹配

在薄膜与空气及基底相邻的两侧各加折射率缓变的匹配层,匹配层各取三个周期。在空气一侧其折射率变化为

$$n(x) = 1.4 + 0.44 \left[ 10 \left( \frac{x}{3p} \right)^3 - 15 \left( \frac{x}{3p} \right)^4 + 6 \left( \frac{x}{3p} \right)^5 \right], \quad (0 \leq x \leq 3p) \quad (4)$$

在基底一侧其折射率变化为

$$n(x) = 1.52 + 0.32 \left[ 10 \left( \frac{D-x}{3p} \right)^3 - 15 \left( \frac{D-x}{3p} \right)^4 + 6 \left( \frac{D-x}{3p} \right)^5 \right], \quad p \leq x \leq D \quad (5)$$

其中  $D$  为薄膜的总厚度。图3给出其反射特性,可见,次峰得到进一步抑制,但仍不能令人满意。

### 4. 五次函数匹配和线性调制

在保持上述五次函数匹配的基础上对中间44个周期的膜层折射率分布作线性调制,即

$$n(x) = \begin{cases} 1.84 + 0.23 \sin \left( \frac{2\pi x}{p} \right) \frac{x-3p}{22p}, & (3p \leq x \leq 25p) \\ 1.84 + 0.23 \sin \left( \frac{2\pi x}{p} \right) \frac{47p-x}{22p}, & (25p \leq x \leq 47p) \end{cases} \quad (6)$$

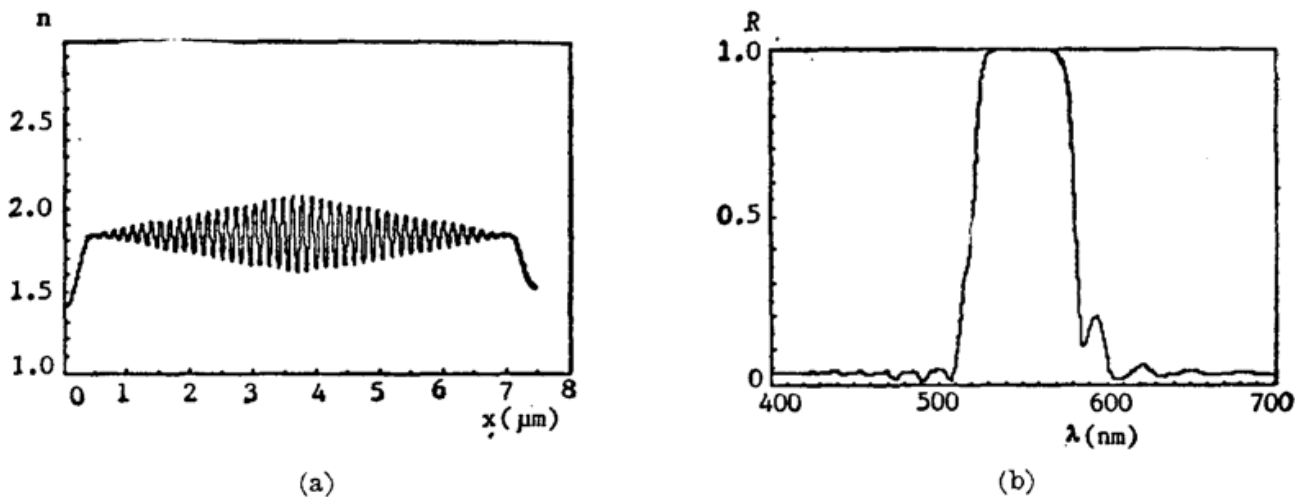


Fig. 4

(a) Rugate with three-cycle quintic matching layers on each side and with linear modulation;  
 (b) Reflectance of the corresponding rugate

图4(a)和(b)分别表示出此种情况下的折射率分布和反射特性。可见,次峰已被有效地抑制,带宽亦被压缩,但截止带边缘处反射率变化欠陡。

### 5. 五次函数匹配和正弦调制

现在仍保持上述五次函数匹配的基础上,对中间44个周期的膜层折射率分布作正弦调制,即

$$n(x) = 1.84 + 0.23 \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \sin\left[\frac{\pi(x-3p)}{44p}\right], \quad (3p \leq x \leq 47p) \quad (7)$$

图5给出此时的薄膜反射特性。可见,反射次峰已被有效地抑制,截止带较线性调制时稍宽,截止带边缘处反射率变化亦变得很陡,可以说这是一种令人满意的膜系。

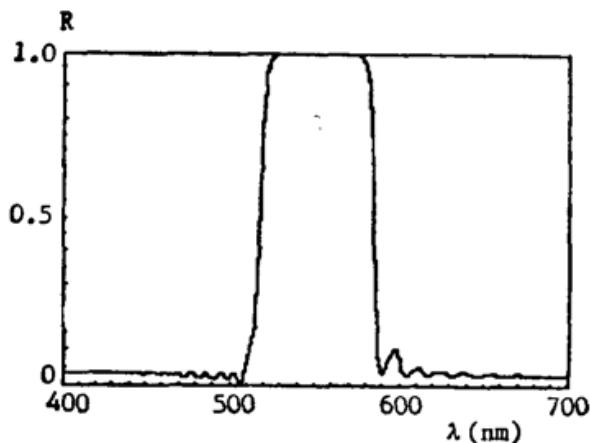


Fig. 5 Reflectance of the corresponding rugate

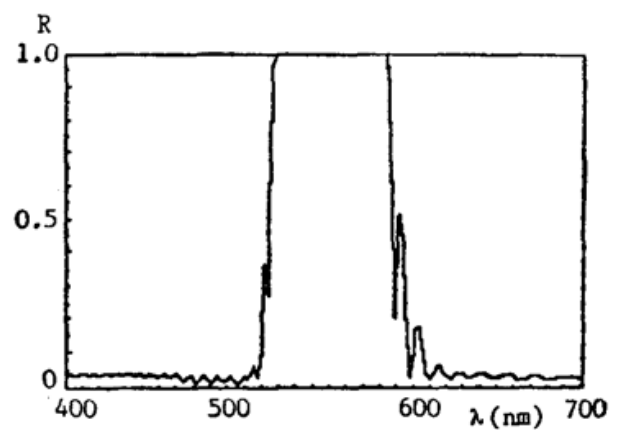


Fig. 6 Reflectance of the corresponding rugate

### 6. 五次函数匹配和部分正弦调制

在仍保持五次函数匹配的情况下,又计算了对中间膜域的两侧各10个周期作正弦调制时的反射特性,此时取

$$n(x) = \begin{cases} 1.84 + 0.23 \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \sin\left[\frac{\pi(x-3p)}{20p}\right], & (3p \leq x \leq 13p) \\ 1.84 + 0.23 \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right), & (13p \leq x \leq 37p) \\ 1.84 + 0.23 \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \sin\left[\frac{\pi(47p-x)}{20p}\right], & (37p \leq x \leq 47p) \end{cases} \quad (8)$$

图 6 给出此种情况下的薄膜反射特性。可见,通带内反射次峰的抑制比正弦调制时稍差,截止带变宽,截止带边缘处的反射率变化仍很陡,这也是一种有效的抑制次峰的方法。

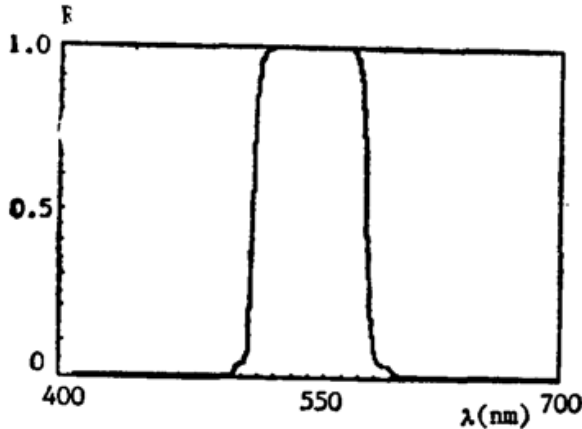


Fig. 7 Reflectance of the corresponding rugate

### 7. $n_0 = n_s$ 时的五次函数匹配和正弦调制

对  $n_0 = n_s = 1.52$  的情形,我们重复了第五项的计算。此时取

左侧:

$$n(x) = 1.52 + 0.32 \left[ 10 \left( \frac{x}{3p} \right)^3 - 15 \left( \frac{x}{3p} \right)^4 + 6 \left( \frac{x}{3p} \right)^5 \right] \quad (0 \leq x \leq 3p) \quad (9)$$

右侧:

$$n(x) = 1.52 + 0.32 \left[ 10 \left( \frac{D-x}{3p} \right)^3 - 15 \left( \frac{D-x}{3p} \right)^4 + 6 \left( \frac{D-x}{3p} \right)^5 \right] \quad (47p \leq x \leq D) \quad (10)$$

薄膜的反射特性如图 7 所示。可见,此时通带有极好的透过率特性。同样,此时采用部分正弦调制亦得类似的良好结果。

上述计算结果对要求其通带有优良透过率特性的 Rugate 光学薄膜提供了有意义的参考。

### 参 考 文 献

- [1] Muamer Zukic, Karl H. Guenther; in «Proc. SPIE», Vol. 895 (Los Angeles, California 1988), 271~27
- [2] W. H. Southwell; *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1988, 5, No. 9 (Sep.) 1558~1564.
- [3] W. H. Southwell, R. L. Hall; *Applied Optics*, 1989, 28, No. 14 (15 Jul), 2949~2951.
- [4] W. H. Southwell; *Applied Optics*, 1989, 28, No. 23 (1 Dec), 5091~5094.

## Suppression of rugate filter sidelobes

ZHAN YUANLING, QU HUIZHONG AND ZHANG TIEQUN  
(Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071)

(Received 6 August 1990)

### Abstract

In this paper some methods to suppress the rugate filter sidelobes have been discussed. It is found that rugate with good suppression of sidelobes over broad spectral regions and at the same time maintaining its stopband reflectance can be obtained by using quintic matching layers of each side and sinusoidal modulation of the remained layers.

**Key words:** rugate filter, suppression of sidelobes.