

硒化锌基底 3 ~ 12 μm 渐变折射率红外增透膜的设计

鄢秋荣^{1,2}, 黄伟¹, 张云洞¹

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:叙述了傅里叶合成方法的原理和该方法用于 ZnSe 基底 3 ~ 12 μm 红外增透膜的设计。通过反傅里叶变换期望的光谱特性曲线得到渐变折射率膜层。用薄膜特征矩阵的方法计算分成很薄的多层均匀膜层的光谱透过率曲线,构造了新的 Q 函数和用逐次近似的方法修正膜层的折射率轮廓图,能有效地减小与期望透射率曲线的偏差。再给膜层加上五次方多项式匹配层与空气和基底两侧界面相匹配。所得渐变折射率增透膜在设计波段平均透射率达到 95%。

关键词:红外增透膜;渐变折射率薄膜;傅里叶合成法

中图分类号:O484

文献标识码:B

The Gradient-index Thin Film Design of Infrared Films on ZnSe Substrate for 3 ~ 12 μm

YAN Qiu-rong^{1,2}, HUANG Wei¹, ZHANG Yun-dong¹

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu 610209, China;

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

Abstract: In the paper, Fourier-transform method was introduced and was used for the design of infrared films on ZnSe substrate for 3 ~ 12 μm . The refractive-index profile of Gradient-index film was obtained by inverse Fourier transformation of the desired spectral transmission curve and the corresponding spectral transmission curve was evaluated by using conventional matrix multiplication. The curve was refined through successive approximation and restructured new Q function to reduce the deviations from desired transmission curve. The quintic matching layers were overlaid at both interface of air and substrate. The average transmission of the Gradient-index film in the design wavelength range is 95%.

Key words: infrared antireflection film; gradient-index thin film; Fourier-transform method

1 引言

渐变折射率薄膜,其特征是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],渐变折射率光学薄膜较传统多层均匀膜有许多优势,而随着各种镀膜方式的进步,如电子束共蒸镀、直流或交流磁控共溅镀、离子束共溅镀等技术^[2-3]的出现,膜层的折射率、厚度及薄膜的机械性能控制更为稳定,使渐变折射率光学薄膜的设计能更精确地实现,因此渐变折射率薄

膜的设计越来越受到科研工作者的重视。

传统光学薄膜设计需根据设计波段和期望光谱特性曲线,选定若干种高折射率、低折射率材料和膜层的初始结构,用商用膜系设计软件进行优化,找到最佳设计。而渐变折射率薄膜还没有商业软件,从

作者简介:鄢秋荣(1982-),男,硕士生,主要从事渐变折射率光学薄膜的研究。E-mail:yanqiuorong953@sohu.com

收稿日期:2007-08-15

文献报道主要利用傅里叶合成法设计^[4-7],不需要事先知道膜层的初始结构,对设计波段也没有限制,而且红外薄膜所使用的材料有折射率范围大的特点,红外波段易于控制厚度,所以傅里叶合成方法较适合设计红外增透膜。本文用该方法设计 ZnSe 基底 3 ~ 12 μm 红外增透渐变折射率薄膜。

2 傅里叶合成方法原理

L. Sossi 证明渐变折射率膜层的光谱透射率和折射率轮廓相联系的表达式^[4]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dn}{dx} \frac{1}{2n} \exp(ikx) dx = Q(k) \exp[i\phi(k)] = f(k) \quad (1)$$

式中, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波矢; $x = 2 \int_0^z n(u) du$ 是二倍的光程; z 是膜层的几何厚度坐标; $Q(k)$ 是期望透射率 $T(k)$ 的函数,文献[5-6]中 $Q(k)$ 都是考虑了无限多层膜干涉的近似表达式。主要有以下几种 $Q(k)$ 的表达式:

$$Q(k) = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{T(k)} - T(k) \right)} \quad (2)$$

$$Q(k) = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{T(k)} - T(k)}} \quad (3)$$

$$Q(k) = \sqrt{-\ln T(k)} \quad (4)$$

$\phi(k)$ 是相位因子,为了保证 $n(x)$ 为实数, $\phi(k)$ 应为奇函数。式(1)其实是一个傅里叶反变换式,对它进行傅里叶变换可得:

$$\frac{1}{2n} \frac{dn}{dx} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} Q(k) \exp[i\phi(k)] \exp(-ikx) dk \quad (5)$$

并解微分方程可得:

$$n(x) = \exp \left\{ \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{Q(k)}{k} \sin(\phi(k) - kx) dk \right\} \quad (6)$$

选定膜层的光学厚度,对式(6)进行数值积分可以得到膜层的折射率轮廓图 $n(x)$ 。

3 设计 3 ~ 12 μm 红外增透膜

3 ~ 12 μm 是红外光学系统常用的工作波段,图 1 是期望的光谱透射率函数。在 ZnSe 基底上设计渐变折射率增透膜,可选择 Ge 和 YF₃ 做增透材料,因为这两种材料的折射率相差比较大,适用于傅里叶合成法设计所得折射率变化范围比较大的特点。

在选择 $Q(k)$ 的表达式进行设计时,发现式(2)和式(3)在 $T(k)$ 很接近零处,计算出的膜层光谱特

性曲线与期望透射率曲线相差比较大。而本设计要求宽波带,且要求在波带内透射率越高越好,直接用式(2)或式(3),在透射带两端引起比较大的变形,表达式(4)所得膜层对期望光谱特性曲线的突变不敏感,用在宽波段内,所得光谱透射率曲线的两端会倾斜地上升到透射带,因此这两种表达式能够在一定程度上互补,通过构造的 $Q(k)$ 表达式(7)能使所得膜层光谱特性曲线更接近期望透射率曲线。

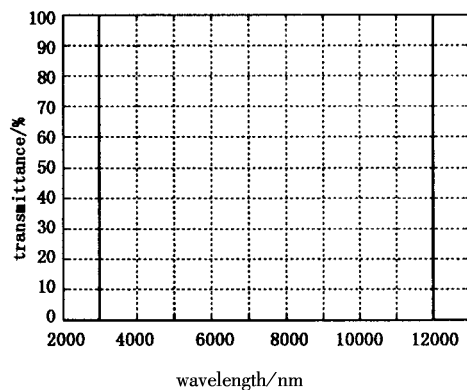


图 1 期望透射率函数图

Fig.1 desired transmission curve

$$Q(k) = \omega \times \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{T(k)} - T(k) \right)} + (1 - \omega) \times \sqrt{-\ln T(k)} \quad (7)$$

其中, $0 \leq \omega \leq 1$ 内细分为一个矩阵做循环控制,当所得透射率曲线与期望透射率偏差最小时, ω 的值为所求值,这时所得的结果也是代入式(8)运用数值积分法所求出折射率轮廓图的光谱特性曲线:

$$n(x) = \left(\frac{1.35 \times 4.0}{n_{\max} n_{\min}} \right)^{1/2} \exp \left\{ \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{Q(k)}{k} \sin[\phi(k) - kx] dk \right\} \quad (8)$$

这里, n_{\max} 和 n_{\min} 分别是由式(5)计算得到的最大和最小折射率,用这样一个标准化过程可以使折射率轮廓图在可获得薄膜材料的折射率范围内,而又不影响折射率轮廓图的光谱透过率特性曲线。

$\phi(k)$ 等于零是可行的。给相位因子 $\phi(k)$ 赋值或构造表达式,可以调节计算所得膜层折射率范围,使折射率轮廓图在可获得的薄膜材料范围内,在本设计中用下面的 $\phi(k)$ 的表达式^[7]能使折射率在较宽的范围内实现, N 是 1 ~ 5 的实数, k_{\min} 和 k_{\max} 分别是期望光谱曲线决定的范围。

$$\phi(k) = \frac{\pi k}{k_{\min} + k_{\max}} - \frac{\pi}{2} \sin \left(N\pi \frac{k - k_{\min}}{k_{\max} - k_{\min}} \right) \quad (10)$$

计算结果如图 2,膜层总光学厚度 20μm,折射率范围在 1.35~4.0 之间,在红外波段是可以实现的。

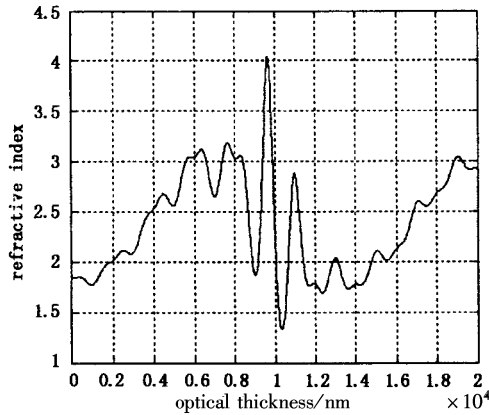


图 2 以图 1 为期望透射率函数,用傅里叶合成法计算得到的折射率轮廓图

Fig.2 refractive-index profile obtained from calculations of the curve in Fig. 1. by fourier-transform method

4 计算膜层透射率

为检验设计结果,专门镀制渐变折射率薄膜,然后进行光谱特性透过率测试比较复杂。而将折射率轮廓图分割成许多很薄等光学厚度的均匀的折射率薄膜,利用薄膜特征矩阵法^[8]计算实际的光谱特性曲线,所得解精确,而且容易用程序实现模拟,节省了实验时间。图 3 为将图 2 中的折射率轮廓图细分成 1000 层计算所得透过率曲线。由于设计的波段很宽,整个波段都用等光学厚度计算,相对于长波段,膜层还细分得不够薄,所以在长波段的透射率曲线抖动的幅度变大,周期变长。

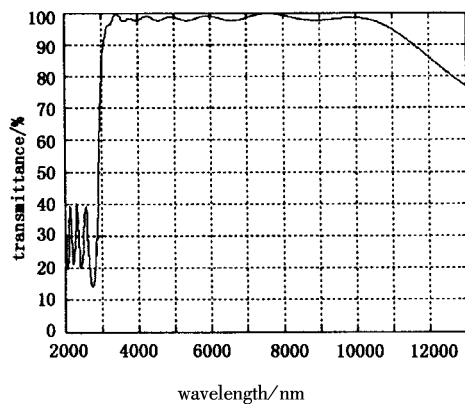


图 3 用薄膜特征矩阵法计算图 2 中的渐变折射率膜层所得的透射率曲线
Fig.3 the transmission curve corresponding to therefractive-index profile in Fig. 2. evaluated by using conventional matrix multiplication

5 逐次近似修正

从图 3 可以看到,期望的透射率曲线和计算出的透射率曲线存在偏差,这种偏差是由于 $Q(k)$ 的表达式的精确性和积分区间的有限性。如果增大积分区间,将导致膜层过厚,给膜层的镀制带来困难。可以用 $Q(k)$ 连续近似的方法,减小这种偏差,根据期望的透射率曲线,算出 $Q(k)$ 的值为 $Q_0(k)$,把 $Q_0(k)$ 代入到式(6)可以得到折射率轮廓图。用多层膜特征矩阵法可以计算出它的透射率曲线,计算 $Q(k)$ 的值为 $Q_a(k)$,新的 $Q(k)$ 可由下面的递推公式得到:

$$Q(k)_j = Q(k)_{j-1} + [Q_0(k) - Q_a(k)] \quad (11)$$

代入到式(6)计算出修正后的期望透射率曲线, j 为修正循环次数。不断循环修正,直到满足: $Q(k)_j < 0$,这时取 $Q(k)_j = 0$,得到与期望光谱透射率曲线更吻合的曲线。图 4 为经过 4 次连续近似后得到的光谱特性曲线,与图 3 比较,特别是在长波段,更接近期望透射率曲线。

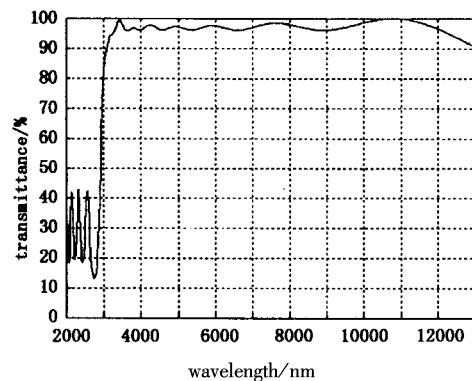


图 4 经过 4 次连续近似,所得的光谱透过率曲线

Fig. 4 the transmission curve obtained after four successive approximations

6 界面匹配

当将傅里叶合成法设计的渐变折射率膜的两侧连接到空气和基底 ZnSe 时,由于两侧有界面的存在,将在光谱透射率曲线的通带两侧引入波纹,虽然通过进一步的逐次近似修正,有时可以去除波纹,但效果并不理想。

Southwell 在研究 rugate 膜时,提出了一种有效地方法,即在界面两侧加入渐变折射率的匹配层,能有效的去除 rugate 膜截止带两侧的边带波纹。这种方法用在傅里叶合成的渐变折射率膜的匹配同样有效。Southwell 证明^[9]加上折射率变化呈五次方多

项式的匹配层,即折射率在两界面间连续过渡,并使过渡的折射率曲线的二次方导数处处为零,能有效的去除截止带波纹。加入匹配层后,修正折射率分布为:

$$n(x) = n_s + [(n(x) - n_s)(6t^5 - 15t^4 + 10t^3)] \quad (12)$$

式中, n_s 为基板或空气的折射率; $t = (x_{\max} - x)/T$, T 为匹配层的总光学厚度,匹配层的光学厚度要适当,太小影响去波纹的效果,太大影响光谱透过率曲线的精确性,增加膜层厚度。

在设计3~12 μm 的红外增透时,在膜层的空气一侧,不可能匹配到折射率1.0。只能匹配到增透材料的最小折射率1.35,如图5所示,整个膜层20 μm ,其中左右各2 μm 的匹配层。图6为加上匹配层后的光谱透过率曲线。与图4相比较,截止带波纹有所抑制。在设计波段3~12 μm 的平均透射率达到95%。

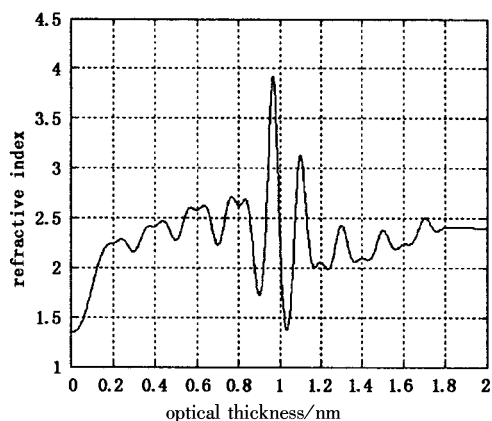


图5 带有五次多项式匹配层的折射率轮廓图

Fig. 5 refractive-index profile with quintic matching layers

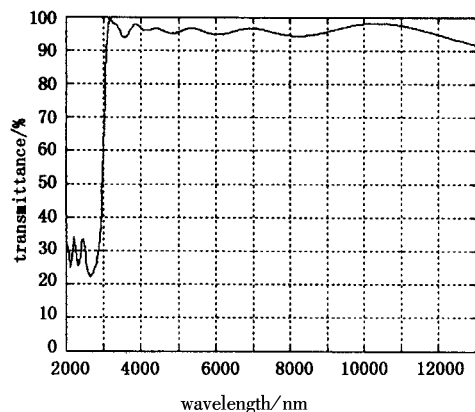


图6 加上五次多项式匹配层后的光谱特性曲线

Fig. 6 transmission curve with quintic matching layers

7 结论

文中设计全部在作者自行编制的程序上实现,期望的透射率曲线是在3~12 μm 透射率为1的矩形函数,设计波段3~12 μm 的平均透射率达到95%,膜层厚度为20 μm 渐变折射率薄膜。虽然设计结果膜厚比较厚,设计波段的透射率有待进一步提高,但傅里叶合成法作为设计渐变折射率薄膜的精确方法,可以设计任意波段,任意波形的光谱透过率曲线的渐变折射率膜层,而且通过构造合适的 Q 函数和新的优化方法,可以进一步提高设计结果。随着制备方法和工艺的提高,渐变折射率薄膜的设计将更容易实现。

参考文献:

- [1] 林永昌,卢维强. 光学薄膜原理[M]. 北京:国防工业出版社,1990:139-141.
- [2] M Cevro. Ion-beam sputtering of $(\text{Ta}_2\text{O}_5)_{1-x}(\text{SiO}_2)_x$ composite thin film[J]. Thin Solid Film, 1995, 258: 91-103.
- [3] Tae Uk Ryu, Sok Won Kim, Eui Jung Kim. Optical mechanical and thermal properties of $\text{MgF}_2 - \text{ZnS}$ and $\text{MgF}_2 - \text{Ta}_2\text{O}_5$ composite thin films deposited by co-evaporation[J]. Opt. Eng., 2000, 39(12): 3207-3213.
- [4] L Sossi. A method for the synthesis of multilayer dielectric interference coatings[J]. Eesti NSV Tead. Akad Toim. Fuus, 1974, 23: 229-237.
- [5] J A Dobrowolski, D Lowe. Optical thin film synthesis program based on the use of Fourier transforms[J]. App. Opt. 1978, 17: 3039-3050.
- [6] Pavel V Bulkin, Pieter L Swart, Beatrys M lacquet. Fourier-transform design and electron cyclotron resonance plasma-enhanced deposition of lossy graded-index optical coatings[J]. App. Opt. 1996, 35: 4413-4419.
- [7] Henrik Fabricius. Gradient-index filters: designing filters with steep skirts, high reflection, and quintic matching layers[J]. Appl. Opt., 1992, 31: 5191-5196.
- [8] 唐晋发,郑权. 应用薄膜光学[M]. 上海:上海科学技术出版社出版,1984:42-46.
- [9] W H SouthWell, R L Hall. Rugate filter sidelobe Suppression using quintic and rugated quintic matching layers[J]. Appl. Opt., 1989, 28: 2949-2951.