

合成光学膜系的一种新方法 (摘译)

本文介绍合成光学膜系的一种方法,其目的在于简便性和通用性。在计算机程序中应用这种方法,可以使设计者通过相继迭加特殊的四层膜组,反复构成一个多层膜系。每迭加一个膜组,在复数反射系数平面上就完成了对一个波长从起始点到要求目标点的严格变换。计算机语言对于小型计算机也是实用的,甚至无需初始设计就可得到好的结果。

一、引 言

在过去,关于多层膜系的一系列数字合成方法,从逐次修正[1,2],到全自动合成[3,4],已经被描述了。基本任务是寻找膜系的结构参数值(折射率和厚度),它们使得被计算的光学特性,在所关注的波段内,紧密接近目标规格。一般说,“修正”是最简单的方法,但问题在于要提出一个初始多层膜系,其特性至少是希望目标的一级近似。在自动合成方法中,通过考察大量的不同的多层膜结构,初始设计的要求是不必要的。搜索步序常常是广阔的,并包含大量的试探结构,后者被证明远远不是令人关注的解答。虽然计算时间来说,数字搜索合成法是低效率的,但是它已经产生了用于多种光学目的的薄膜设计。

本文试图把合成方法的简便性与完备性之间的“鸿沟”桥接起来。那就是,文中所引入的计算机语言也实用于小型计算机,甚至没有初始设计也能产生好的结果。基本方法同Dobrowolski 1965年所描述的“渐进型合成法”[3],是并驾齐驱的。相继迭加几层膜到一个现成的设计结构,然后仅仅寻求这几层膜的最佳厚度和折射率值,便构建起一个多层膜。本文中这种“相继迭加”系由特殊的四层膜组合构成,每一膜组旨在满足中间目标的要求。

压缩计算容量的显著特点是这一概念:对于一个给定的四层膜组,只需提供两层膜的厚度值网络,其余两层膜的厚度值可由严格的解析公式算得。搜索时间的节省,足以使小型计算机可以进行有效编程。本文将阐述这些步骤,并说明几个设计实例。

首先介绍有关本文的数字梗概,接着叙述合成方法。由于本理论是从最基本点展开,所以假定光束垂直入射,使表述大为简化。对于非垂直入射情形的必要补充,被移到附录中去。

二、理 论

试考虑这样的问题:波长为 λ 的单色光,投射到多层膜上。膜系由 $N-1$ 层膜构成,如图1所示。用 Y_{N-1} 表示真空-多层膜界面处在真空一侧的电矢量复数反射系数;类似地,

用 t_{N-1} 表示最后边界在输出媒质一侧的透射系数。现在将一层具有复数折射率 $\dot{n}_N = n_N + ik_N$ 并且厚度为 d_N 的薄膜，迭加到现成的膜系上去，但开始时保持一段小的距离。这一想法是为了通过考虑迭加膜料、真空间隙和多层膜所形成的层次，来分别计算新的反射系数 r_N 和透射系数 t_N 。这可用许多标准方法，诸如矩阵法来完成，并且在演算的最后，让间隙宽度等于零。将 N 层膜系的有关系数同 $(N-1)$ 层膜系的有关系数联系起来的最后公式是

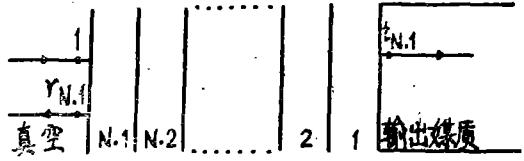


图1 说明反射系数和透射系数用法的 $(N-1)$ 层膜结构

$$r_N = \frac{-f_N(1 - \epsilon_N^2) + (\epsilon_N^2 - f_N^2)r_{N-1}}{(1 - f_N^2\epsilon_N^2) + f_N(1 - \epsilon_N^2)r_{N-1}} \quad (1)$$

$$t_N = \frac{\dot{n}_N \tau_N^2 \epsilon_N}{(1 - f_N^2 \epsilon_N^2) + f_N(1 - \epsilon_N^2) r_{N-1}} \quad (2)$$

式中，

$$f_N = (\dot{n}_N - 1) / (\dot{n}_N + 1), \quad \tau_N = 2 / (\dot{n}_N + 1) \quad (3)$$

$$\epsilon_N = \exp(i2\pi \dot{n}_N d_N / \lambda) \quad (4)$$

注意，菲涅耳系数 f_N 和 τ_N 是相应于折射率为 \dot{n}_N 的膜料和真空之间的边界的。因子 ϵ_N 既计入了光波传播的相移，又计入了光波传播的幅度衰减。

尽管方程 (1) 和 (2) 提供了计算任何多层的振幅反射系数和透射系数的全部方法，但是为了下面推演的方便，引进第二套复数变量是有益的，

$$p_N = (f_N + r_{N-1}) / (1 + f_N r_{N-1}) \quad (5)$$

$$q_N = \dot{n}_N \tau_N t_{N-1} / (1 + f_N r_{N-1}) \quad (6)$$

重写方程 (1) 和 (2)：

$$r_N = (-f_N + z_N) / (1 - f_N z_N) \quad (7)$$

$$t_N = \tau_N \epsilon_N q_N / (1 - f_N z_N) \quad (8)$$

式中， $z_N = \epsilon_N^2 p_N$ 。

图2用以说明这些新变量的定义。步骤1表示最初的 $(N-1)$ 层膜系。在步骤2中，输入媒质的折射率已从1变到 \dot{n}_N 。相应地，反射系数从 r_{N-1} 变到 p_N ，透射系数从 t_{N-1} 变到 q_N 。方程 (5) 和 (6) 描述了这种中间变换。步骤3表示一个想象的边界，它把作为输入媒质的新材料和作为厚度 d_N 的膜层的同种材料分割开来。 z_N 是这个边界的波幅反射比，它同 p_N 的差别在于一个与光波渡越距离 $2d_N$ 有关的因子，即 ϵ_N^2 。同时，新的输入边界的透射系数现在是在 $\epsilon_N q_N$ 。

最后的步骤是输入媒质的折射率从 \dot{n}_N 再变换1， z_N 变为 r_N ， q_N 变为 t_N 。注意，步骤3到步骤4恰是步骤1到步骤2的逆运算。这一规则使方程 (7) 和 (8) 的推导变得简单明了，只消从变量的简单变换开始，例如在方程 (5) 中用 z_N 代替 p_N ，用 r_N 代替 r_{N-1} 。

现在找出系数 t 和 z 的循环公式，不必依赖中间步骤。将方程 (7) 写成 r_{N-1} ，代入方程

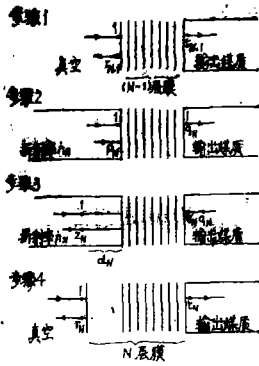


图2 一层膜迭加到(N-1)层膜系的四个步骤

(5) 便得到z的循环公式。其结果是

$$p_N = (\alpha_N + z_{N-1}) / (1 + \alpha_N z_{N-1}) \quad (9)$$

式中，相邻膜层的菲涅耳系数组合为

$$\alpha_N = (f_N - f_{N-1}) / (1 - f_N f_{N-1}) \quad (10)$$

并且再一次有关系

$$z_N = \epsilon_N^2 p_N \quad (11)$$

系数t的循环公式则来自方程(6)和(8)联合，并借助 p_N 消去 r_{N-1} ：

$$t_N = \epsilon_N (1 - f_N p_N) t_{N-1} / (1 - f_N z_N) \quad (12)$$

上述变换公式提供了多层膜光学特性的快速计算。更重要的是，有了求解特殊合成问题的解析基础。图3提出了这样的问题。靠外的两层无吸收薄膜，迭加到一个 $(N'+2)$ 层的反射系数为 $r_{N'+2}$ 的膜系上。记住，在以下的合成运算中，迭加的膜组均由四层膜组成，要求计算膜层厚度 $d_{N'+3}$ 和 $d_{N'+4}$ ，使得 $r_{N'+2}$ 变换为 $r_{N'+4}$ 。为了简单起见，标号 N' 现在可以略去。

由方程(5)计算复数 p_3 ，整个计算由此开始。本文将一般的复数q的实部和虚部分别表示为 $q = x_q + i r_q$ 。将 p_3 写成 r_3 的显函形式

$$p_3 = (f_3 + r_3) / (1 + f_3 r_3) \quad (13)$$

$$|p_3|^2 = (x_{p_3})^2 + (y_{p_3})^2 \quad (14)$$

现在如果 r_3 也是一个已知的复数量，那么 z_4 可以从方程(7)算出

$$z_4 = (f_4 + r_4) / (1 + f_4 r_4) \quad (15)$$

$$|z_4|^2 = (x_{z_4})^2 + (y_{z_4})^2 \quad (16)$$

其次利用方程(9)和无吸收膜的 $|\epsilon_4|^2 = 1 (k=0)$ ， z_3 便与 $|z_4|$ 关联起来

$$|z_4| = |p_4| = |(\alpha_4 + z_3) / (1 + \alpha_4 z_3)| \quad (17)$$

由于 α_4 是实数，方程(17)的右边仅仅与 z_3 的模及实部有关。 z_3 的模为 $|z_3| = |p_3|$ ，其实数部分被给定为

$$x_{z_3} = \frac{|z_4|^2 - |p_3|^2 - \alpha_4^2 (1 - |z_4|^2 |p_3|^2)}{2\alpha_4 (1 - |z_4|^2)} \quad (18)$$

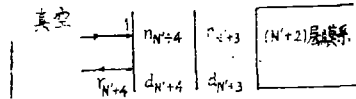


图3 两层无吸收薄膜迭加到 $(N'+2)$ 层膜系反射系数 $r_{N'+2}$ 变换为 $r_{N'+4}$

现在 z_3 的虚数部分除了符号外可以确定, 即

$$y_{z_3} = \pm [|p_3|^2 - (xz_3)^2]^{1/2} \quad (19)$$

当固定 y_{z_3} 的符号并求出 z_3 后, 再次应用方程(9), 便得到 p_4

$$p_4 = (\alpha_4 + z_3) / (1 + \alpha_4 z_3) \quad (20)$$

最后, 从总相移因子计算膜厚 d_3 和 d_4

$$\varepsilon_j^2 = z_j / p_j = z_j p_j^* / |p_j|^2 \quad (21)$$

详细写出

$$\cos(4\pi n_j d_j / \lambda) = [(x_{z_j})(x_{p_j}) + (y_{z_j})(y_{p_j})] / |p_j|^2 \quad (22)$$

$$\sin(4\pi n_j d_j / \lambda) = [(y_{z_j})(x_{p_j}) - (x_{z_j})(y_{p_j})] / |p_j|^2 \quad (23)$$

$$j = 3, 4$$

方程(19)中 y_{z_3} 有两种可能的符号, 这确定了两条不同的求解途径。不过, 如果 $|p_3|^2 < (xz_3)^2$, 那么没有一条途径可行。

最后注意到, 对于 $n_j d_j$ 改变 $\lambda/2$, 方程(22)和(23)保持不变。本文仅仅考虑区域 $0 \leq 4\pi n_j d_j / \lambda \leq 2\pi$, 这导出两对 d_3 和 d_4 的值。若加上一个 $\lambda/2$ 周期, 则试探结构的数目和计算时间将增加4倍。

三、合成方法的描述

如一节所述, 本文所述合成方法依赖于迭加特殊的四层膜组。每一膜组允许对一个波长的反射系数幅度从初始值严格变换到设计者规定的值。对于一个指定的膜组, 这种变换确定了靠外边的两层膜的厚度。其余两层膜的厚度则通过下述的穷举搜索程序来选取。在现时的程序类型中, 一次最多可以迭加4层不同的薄膜。这一数目也表示了小型计算机的计算时间和优良结果之间的实际折衷。由于同样原因, 仅仅改变膜层的厚度以产生要求的光学结果。当开始迭加一个新的膜组时, 所有膜层的折射率都由设计者选择, 并固定下来, 用于继后的计算。

一项合成开始时, 下列数据被输入计算机:

- (1) 合成波长 λ_0 , 其用途见后面的说明;
- (2) 波段参数, 包括最小波长值 λ_{min} , 最大波长值 λ_{max} , 以及被计算的波长数目 N_λ ;
- (3) 输入媒质的复折射率 n_0 。

在合成的每一阶段, 设计者都为附加数据所推动, 一个新膜组开始合成, 要求这样一些数据:

- (4) 构成膜组的各层膜的实数折射率 $n(j)$, $j = 1 \sim 4$, 以及输入媒质的折射率;
- (5) 头两层膜的消光系数 $k(j)$, $j = 1, 2$;
- (6) 头两层膜的厚度参量, 包括最小厚度值 $d_{min}(j)$ 和最大厚度值 $d_{max}(j)$, 以及 $d_{min}(j)$ 和 $d_{max}(j)$ 之间所涉及的厚度值数目 M_j , $j = 1, 2$;

(7) 振幅反射系数在波长 λ_0 的目标规格 $r_T(\lambda_0) = x_T(\lambda_0) + iy_T(\lambda_0)$;

(8) 在指定波段所要求的光学特性。这一规格可以是 $r_T(\lambda)$, 或者是 $R_T(\lambda) = |r_T(\lambda)|^2$ 。

图4说明了设计步序。或者一个新的合成问题, 或者一个预先的设计结构, 引出振幅反射函数 $r_0(\lambda)$ 。两层膜被迭加到这一现成结构, 其厚度 d_1 和 d_2 从网格值 $M_1 \times M_2$ 选取。这种迭加导致新的反射振幅 $r_2(\lambda)$, 但是只对合成波长 $\lambda = \lambda_0$ 这一点进行了计算。紧接着迭加两层膜, 将把 $r_2(\lambda)$ 变换为 $r_4(\lambda)$ 。为了满足合成条件 $r_4(\lambda_0) = r_T(\lambda_0)$, 公式(13)~(23)被用

用作激光闪光灯的乙二醇激光冷却剂的 紫外光氧化作用

当乙二醇激光冷却剂受到来自充氦气并掺入Ti或Ce的石英外壳闪光灯的紫外光照射时,热加速了乙二醇的光氧化作用而生成乙二醇酸及其它氧化产物。由所采集的数据表明激光冷却剂的酸度取决于闪光灯外壳的掺杂类型。经测量表明掺Ce浓度高的闪光灯壳不仅对激光冷却剂起到紫外线的作用,而且由于Ce的荧光效应使激光输出能量有所增加。

一、前言

通常采用体积比为50%的乙二醇水溶液作为Nd:YAG激光器泵浦腔的冷却剂。用乙二醇

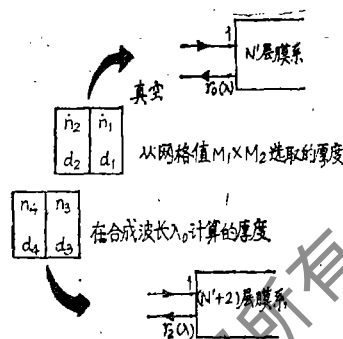


图4 4层膜组的合成,首先迭加两层膜,其膜料可以是吸收的

来求解外边两层膜的厚度 d_3 和 d_4 。或者不存在解答,这时便取 d_1 和 d_2 的下一迭代;或者找到两组解。

最后的步序是计算每一膜系结构跨越全波段的光学特性,并与要求的性能相比较。为了比较,采用两种简单的评价函数:

$$MF = \sum_{\lambda} |r_s(\lambda) - r_T(\lambda)|^2 \quad (24)$$

$$MF = \sum_{\lambda} |R_s(\lambda) - R_T(\lambda)|^2 \quad (25)$$

波长总和按步长 $\Delta\lambda$ 进行,从 λ_{min} 开始,并包括 λ_{max} :

$$\Delta\lambda = (\lambda_{max} - \lambda_{min}) / (N\lambda - 1) \quad (26)$$

如果 $r_T(\lambda) = 0$,那么波段内的每一点处,式(24)和(25)都是相同的。

利用方程(9)~(11)计算每一波长的光学特性。这些计算从 $p_1(\lambda)$ 开始,一直进行到 $z_1(\lambda)$ 。初始反射系数 $r_0(\lambda)$ 被用以通过方程(5)计算 p_1 ,并且方程(7)将 z_1 变换为 $r_s(\lambda)$ 。对于第一个膜组,即直接迭加到输出媒质的膜组, $r_0 = -f_0$;否则,在迭加 N' 层后, $r_0 = r_{N'}(\lambda)$ 。

摘译自App1.Opt., 1983, vol.22, P.4111~4114.

高 峨 摘译 张承铨 校