

光学薄膜的电场分布与光学损耗

顾培夫
(浙江大学光学仪器系)

提 要

本文采用菲涅尔系数矩阵法计算了光学薄膜的电场分布。基于电场分布,改进设计了常规的减反射膜、高反射膜和干涉滤光片。这些设计例子充分说明了薄膜的电场分布与光学损耗的关系。通过修改电场分布或减小膜层和界面上的缺陷,可以明显地抑制损耗,从而为设计低损耗的优质薄膜提供了有效的方法。

一、前 言

这里介绍一种根据电场强度分布来设计薄膜的方法。

光学薄膜中的电场分布,早期就有人作过研究^[1],但是,真正取得重大突破的还是七十年代后期。1976年 Apfel^[2]首先研究了光线倾斜入射到多层膜时的电场分布,设计了用于高能激光器的偏振分光镜。继而他又用减小峰值电场强度的方法设计了高破坏阈值的激光反射镜^[3]。此后, Arnon 等人^[4]提出用非均匀膜来减小反射镜外侧高、低折射率膜层界面上吸收分布的不连续性,以提高反射镜的激光破坏阈值。1976年 Spiller^[5]提出把强吸收材料置于驻波波节上,使用于 50~2000 Å 的远紫外反射镜得到了重大进展。与此同时,许多学者^[6~9]相继对减反射膜、高反射膜及干涉滤光片的电场分布和光学损耗作了比较深入的研究,并取得了很好的效果。

本文利用菲涅尔系数矩阵法分析计算了各类膜系的电场分布,根据计算结果,对某些膜系作了改进设计,从而降低了它们的光学损耗。

二、薄膜中电场强度的计算

当薄膜处在光场中时,各层膜内的电矢量是以矩阵方程式相联系的,因此用矩阵法不难求出各层膜内的电场分布。

图1表示两种折射率分别为 N_i 和 N_j 所构成的界面,考虑到界面上光流平衡,容易得到如下方程:

$$\begin{aligned} E_i^- &= r_{ij} E_i^+ + t_{ji} E_j^-, \\ E_j^+ &= t_{ij} E_i^+ + r_{ji} E_j^-, \end{aligned}$$

式中 r 和 t 分别为界面上的菲涅尔反射系数和透射系数。由于 $t_{ij} t_{ji} + r_{ij}^2 = 1$, $r_{ij} = -r_{ji}$, 故上

述方程可得到如下矩阵:

$$\begin{pmatrix} E_j^+ \\ E_j^- \end{pmatrix} = \frac{t_{ij}}{1-r_{ij}^2} \begin{pmatrix} 1 & -r_{ij} \\ -r_{ij} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{j+1}^+ \\ E_{j+1}^- \end{pmatrix}$$

而膜层的逆矩阵可表示为:

$$\begin{pmatrix} e^{-i\delta_j} & 0 \\ 0 & e^{i\delta_j} \end{pmatrix}$$

式中 δ_j 是光线穿过膜层的相位厚度。

依照上述思想, 可以得到多层膜中任意一个界面 j 上的正向场和反向场, 表示成矩阵为

$$\begin{pmatrix} E_j^+ \\ E_j^- \end{pmatrix} = \frac{t_1 t_2 \dots t_j}{(1-r_1^2)(1-r_2^2)\dots(1-r_j^2)} \begin{pmatrix} e^{-i\delta_{j-1}} & -r_j e^{-i\delta_{j-1}} \\ -r_j e^{-i\delta_{j-1}} & e^{i\delta_{j-1}} \end{pmatrix} \dots \begin{pmatrix} e^{-i\delta_1} & -r_2 e^{i\delta_1} \\ -r_2 e^{-i\delta_1} & e^{i\delta_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -r_1 \\ -r_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{pmatrix}$$

欲求任意界面 j 的电场强度, 只要分别求出正向和反向波的振幅与相移即可。

若令正向波

$$E_j^+ = E_{jR} + iE_{jI}$$

则振幅和相移可分别表示为:

$$|E_j^+| = [(E_{jR}^2 + (E_{jI}^2)^{\frac{1}{2}}],$$

$$\delta_j^+ = \tan^{-1}(E_{jI}^+ / E_{jR}^+)$$

同样可求出反向波 $|E_j^-|$ 和 δ_j^- , 最终得到电场强度

$$E_j^2 = |E_j^+|^2 + |E_j^-|^2 + 2|E_j^+||E_j^-|\cos(\delta_j^+ + \delta_j^-)$$

只要把这种计算继续到最后一个界面, 则就得到了整个膜系的场强分布。

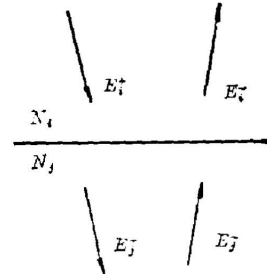


图 1 界面符号说明
Fig. 1 Diagram of a surface (illustrating notation)

三、电场强度的计算结果及应用举例

下面将阐明如何根据计算获得的场强分布来设计低损耗的优质膜系:

1. 减反射膜

对常规的减反射膜, 计算所得到的电场分布有三个明显的特点(如图 2 所示)。第一, 对中心波长, 膜系中央的场强要比两侧小, 内侧要比外侧小。第二, 由于减反射膜的反射率等于零, 所以入射媒质中的场强没有波腹和波节。第三, 电场分布的光谱敏感性很小。

在分析电场分布的基础上, 本文对 MgF_2 、 SiO_2 和 ZrO_2 等膜层进行了散射测量, 以便获得计算所需的近似表面粗糙度和体内不均匀性, 然后分别计算了表面散射和体内散射。基于损耗计算, 改进设计了用于 He-Ne 激光波长的双层减反射膜。表 1 列出了三种结构的损耗计算值和实验测量的散射率。从表可见, 随着设计的改进, 损耗逐渐

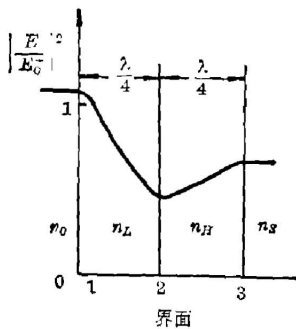


图 2 减反射膜电场分布的计算值
Fig. 2 The computed field distribution in an antireflection coating

表 1 三种减反射膜的损耗比较

Table 1 The comparison of the losses in three anti-reflection coatings

膜系	计算值 (%)		实测散射率 (%)
	吸收	散射	
$S \frac{\lambda}{4} \text{SiO}_2 - \frac{\lambda}{4} \text{MgF}_2 A$	0.040	0.137	0.13
$S \frac{\lambda}{4} \text{ZrO}_2 - \frac{\lambda}{4} \text{SiO}_2 A$	0.020	0.083	0.05
$S \text{ZrO}_2 (84.4 \text{ nm}) - \text{SiO}_2 (192 \text{ nm}) A$	0.013	0.023	0.04

降低。

2. 高反射膜

图 3 是典型高反射膜的电场分布。由图可见,驻波的波腹和波节均位于界面上;高折射

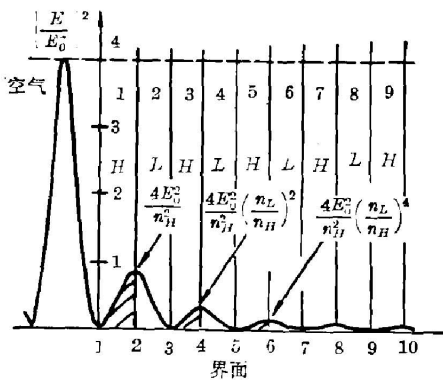


图 3 1/4 波堆计算的电场分布
 $n_H=2.15, n_L=1.46$

Fig. 3 The computed electric field distribution in quarterwave stack $n_H=2.15$ and $n_L=1.46$

率 n_H 越大,电场强度越低;比值 $(\frac{n_L}{n_H})$ 越小,场强衰减越快。这说明反射膜的场强主要集中在膜系外侧,越靠衬底的膜层,光流越小,场强趋近于零,从而导致空气中的场强呈极大,而衬底中的场强为零。这意味着减小最外几层膜的缺陷对抑制损耗是起决定性作用的。

考虑到高折射率膜层的消光系数通常要比低折射率材料大 1~2 个数量级,因此可以设想,如果适当减小反射膜中高折射率层的厚度,则可望降低吸收。为此目的,可以采用最佳膜对,即在已知反射率的膜系上,再镀上一对或二对低折射率膜层,通过调节厚度,使反射率达到极大。只要低折射率膜层的消光系数足够小,

层数足够多,吸收便显著减小。最佳膜对对减小吸收是有效的,但对抑制散射并无多大贡献,为此采用非均匀膜,由于非均匀膜使波腹所处的界面消失了,因而表面散射大大降低。

根据上述设计思想,我们对这两种改进的反射镜分别进行了计算和实际制备。图 4 是计算的电场分布,其中(a)是一对最佳膜对设计,最佳膜对为 1.43L0.7H; (b)是用一层非均匀膜取代一对 LH。计算的损耗列于表 2,由表可见,膜系 2 确实降低了吸收,但对散射是无足轻重的,虽然表面散射略有下降,但体内散射却因场强增加而稍有上升。膜系 3 对

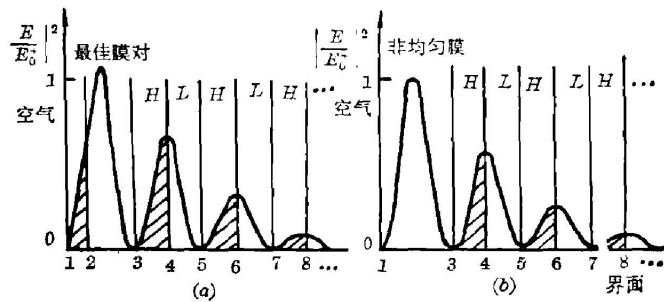


图 4 具有最佳膜对和非均匀膜的反射镜
Fig. 4 The mirrors with optimum pair and inhomogeneous layer

抑制表面散射的效果是非常显著的,但对减小吸收却无济于事,甚至还可能增加,这是因为它的场强比 $\frac{1}{4}$ 波堆稍大之故。

表 2 高反射膜的损耗比较

Table 2 The comparison of the losses in the high reflection coatings in the high reflection coatings

序 号	膜 系	吸 收 (%)	表面散射 (%)	体内散射 (%)
1	$S (HL)^{14}H A$	0.094	0.057	0.049
2	$S (HL)^{14}H1.43L0.7H A$	0.076	0.046	0.055
3	$S (HL)^{14}H(\text{非均匀膜}) A$	0.058	0.026	

$N_H=2.15-i3.6 \times 10^{-4}$, $N_L=1.46-i1.2 \times 10^{-5}$, $\sigma_{\text{射}}=10 \text{ \AA}$
 $\sigma_{\text{非}}=20 \text{ \AA}$, 体内不均匀性高、低折射率膜各为 10 \AA 和 1 \AA

表 3 $\frac{1}{4}$ 波堆与非均匀膜反射镜的散射测量值比较

Table 3 The comparison of the measured scattering between quarter wave stack and mirrors with inhomogenous film

样 品	散射测平均值 (%)	实测反射率增 (%)
I	$\frac{1}{4}$ 波堆反射镜	~0.03
	最外层为非均匀膜的反射镜	
II	$\frac{1}{4}$ 波堆反射镜	~0.05
	最外层为非均匀膜的反射镜	

实际制备最佳膜对时,因为最终的相位厚度是 π ,加上它们又有较大的厚度容差,所以通过简单的格值换算便可控制。制备非均匀膜时,关键是掌握折射率的递度。非均匀膜的初始淀积阶段折射率递增不宜太快,否则吸收增大。非均匀膜的蒸发是通过在坩埚中分层

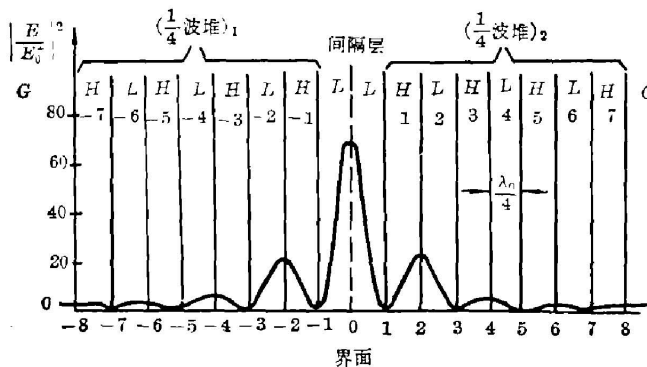


图 5 F-P 干涉滤光片计算的电场分布,
 $n_H=2.3$, $n_L=1.35$ 玻璃胶合

Fig. 5 The computed field distribution in a Fabry-perot interference filter, $n_H=2.3$, $n_L=1.35$ glass to glass

放置高、低折射率材料然后旋转坩埚实现的,只要适当保持蒸发速率和坩埚转角之间的关系,蒸发一般是不会失败的。表 3 是 $\frac{1}{4}$ 波堆和外层为非均匀膜的两种反射镜的测量结果比较。测量表明,理论预示和实验结果有很好的—致性。采用一层非均匀膜,理论计算的非相关表面散射降低了 54%,实际测量大约降低了 40% 左右。

在采用上述反射膜设计的基

基础上, 我们制备得到了反射率为 99.9%、损耗大约 0.1% 的优质高反射膜。

3. 干涉滤光片

图 5 是以 $2L$ 为间隔层的全介质 F-P 干涉滤光片的场强分布, 它在间隔层中间产生最大场强, 两侧逐渐降低。如果是 $2H$ 作间隔层, 则产生两个最大峰, 分别位于间隔层和 L 的两个交界面上。对 $4L$ 和 $4H$ 间隔层, 最大场强峰分别为二个和三个, 只要层数相同, 峰值大小使与 $2L$ 和 $2H$ 间隔层相同, 而且总是对称地分布。此外, 两种材料的折射率差越大, 场强升降越快, 层数愈多, 最大场强也愈大。

基于滤光片的电场分布, 我们可以应用反射膜中最佳膜对的设计思想, 在间隔层两侧适当配置最佳膜对, 使损耗减小。现以膜系

$$S|(HL)^3H2LH(LH)^3|S \quad \lambda_0=0.64 \mu\text{m}, N_H=2.3-i4 \times 10^{-4}, N_L=1.35$$

为例, 该滤光片及其改进滤光片的吸收和散射的理论计算值列于表 4。表中, 采用一对或二对最佳膜对后, 无论吸收还是散射都显著下降。但是最佳膜对使同样层数的反射堆反射率下降, 故滤光片的半宽度增加。

表 4 F-P 滤光片的损耗和性能比较

Table 4 The comparison of the losses and the performance for Fabry-perot filters

膜系	吸收 (%)	散射 (%)	半宽度 (Å)	透射率 (%)
$S (HL)^3H2LH(LH)^3 S$	3.0	10.4	52	86.6
$S (HL)^2H1.54L0.586H2L0.586H1.54LH(LH)^2 S$	1.3	4.8	64	93.9
$S HLH1.54L0.586H1.69L0.46H2L0.46H1.69L0.586H1.54LHLH S$	0.6	1.5	106	97.9

由于 F-P 滤光片在中心波长产生最大场强, 所以损耗对透射率的影响呈现非常敏感的特性, 即使是很小的损耗参数, 也可导致滤光片透射峰的大幅度下降, 可见在滤光片中这种设计方法同样是重要的。

诱增透滤光片是大家所熟知的。由于设计过程中我们将 Ag 层两侧的间隔层组合成实数导纳, 然后再设计适当的减反射膜匹配, 因此, 中心波长的反射率几乎为零, 透射率为极大值 $1-A$ 。从场强的角度看, 因为 Ag 层恰好位于驻波波节, 所以尽管 Ag 膜有较大的消光系数, 但吸收依然不太大。要想进一步减小 Ag 层的吸收, 可在 Ag 层上镀上两个 $\frac{\lambda}{4}$ 层, 紧贴

表 5 诱增透滤光片的吸收和性能比较

Table 5 The comparison of the absorption and the performance for the induced transmission filters

$n_H=2.35, n_L=1.38, N_{Ag}=0.055-i3.32, \lambda_0=550 \text{ nm}$				
膜系	吸收 (%)	半宽度 (Å)	透射率 (%)	
$S (HL)^2H1.749L Ag 1.749LH(LH)^2 S$ 700 Å	19.1	145	80.9	
$S (HL)^2H2LH0.749L Ag 0.749LH2LH(LH)^2 S$ 500 Å	10.3	90	86.3	
$S (HL)^2H2LH0.749L Ag 0.749LH2LH(LH)^3 S$ 600 Å	12.5	50	82.2	

Ag 层的是低折射率层,接着是高折射率层,然后再镀上间隔层和适当的介质膜堆。表 5 是它们的吸收与光学特性的计算值,可见改进后性能得到了改善。

四、结 论

上述例子足以说明,根据电场分布设计低损耗薄膜的重要性。这种设计方法之所以引起人们的关注,是因为通过电场分布,可以帮助我们了解薄膜内部的吸收分布和散射分布,从而有的放矢地抑制损耗。尤其是大功率激光器中,即使是小于 1cm^{-1} 的微量吸收,仍高得足以引起薄膜元件的损耗,可见,尽管是排除微不足道的吸收,但是对提高激光阈值却有重要的意义。已经发现,激光损伤常常首先发生在高场强的薄膜缺陷处,例如,减反射膜的损伤多是从膜/衬底界面开始的,高反射膜则常出现在最外层高折射率膜和波腹界面。如果我们重新安排膜内的场强分布,使各层膜或各界面均匀承担,或者尽量减小高场强部位的薄膜缺陷,那末提高损伤阈值是可望的。

这种设计方法不仅可以用于可见区,更重要的是紫外区和红外区的应用,因为这些波段上可供使用的性能优良的薄膜材料更少,例如,在 $\lambda=1000\sim 2000\text{\AA}$ 的紫外区,尚可找到为数不多的几种低吸收的低折射率材料,然而在 1000\AA 以下所有材料都是严重吸收的。显然,经典的 $\frac{1}{4}$ 波堆是不能用作这些波段的反射膜的。但是依据电场分布,我们把强吸收膜安置在波节上,最终仍可设计出实用的紫外反射镜。

基于电场分布的设计方法不仅对弱吸收的介质膜而且对强吸收的金属膜都是适用的。在金属膜中,应用势透射率概念的设计方法是大家熟悉的,今天我们可以把它与场强设计方法联系起来,从而使吸收膜的设计方法更加完备。

本工作曾得到本室唐晋发同志的指教,在此谨表感谢。

参 考 文 献

- [1] L. Young; *J. Opt. Soc. Am.*, 1962, **52**, No. 7 (Jul), 751.
- [2] J. H. Apfel; *Appl. Opt.*, 1976, **15**, No. 10 (Oct), 2339.
- [3] J. H. Apfel; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 7 (Jul), 1880.
- [4] O. Arnon, P. Baumester; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 11 (Jun), 1853.
- [5] E. Spiller; *Appl. Opt.*, 1976, **15**, No. 10 (Oct), 2333.
- [6] O. Arnon; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 8 (Aug), 2147.
- [7] C. K. Carniglia, J. H. Apfel; *J. Opt. Soc. Am.*, 1980, **70**, No. 5 (May), 523.
- [8] H. E. Bennett, D. K. Burge; *J. Opt. Soc. Am.*, 1980, **70**, No. 3 (Mar), 268.
- [9] P. H. Lissberger; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 1 (Jan), 95.
P. H. Lissberger; *Optica Acta*, 1981, **28**, No. 2 (Feb), 187.

Electric field distribution and optical losses in optical coatings

GU PEIFU

(Zhejiang University, Department of Optical Instrument, Hangzhou)

(Received 1 September 1982, revised 28 March 1983)

Abstract

In this paper the electric field distribution in optical coating is calculated by Fresnel coefficient matrix method. On the bases of the distribution of fields, the design for a conventional antireflection coating, high reflective coating and an interference filter have been improved. These examples show the relationship between field distribution and optical losses in thin films. With the distribution of the fields modified or the defect reduced in the layers and the interfaces, optical losses can be restricted. Thus, the successful method is provided for designing excellent optical coatings with lower losses.

~~~~~  
(上接第 827 页)

激光物理方面的主要内容大致包括:非线性光学、超短脉冲(<ps 量级)、激光光谱、激光表面物理以及激光物理现象(如多光束共振光压作用下钠原子束的偏转等)。

激光器件方面包括气体、准分子、固体、色心、染料、半导体、化学等激光器。这类论文有四个方面引人注目:(1)微微秒或更短时脉冲激光器;(2)紫外或真空紫外激光器;(3)可调谐红外激光器(其中包括特邀的一篇论文,美国麻省理工学院林肯实验室 A. Mooradian 教授的“可调谐红外激光器的光谱特性”);以及(4)二维平面激光。

激光等离子体物理方面有两篇特邀报告,一篇是'83 国际激光会议主席团成员、秘书长、中国光学学会激光专业委员会主任邓锡铭教授作的。他论述了我国在激光等离子体物理研究中运用高功率激光系统的发展过程以及其特点和性能,有一些技术还是我国首创的,反映了我国高功率激光器走独立自主、自力更生道路的经验。另一篇是日本山中千代卫教授的“激光核聚变研究的有关问题”,涉及惯性约束聚变用靶球设计的最佳方案的各项数据要求,以及评述了靶球直接的或间接的、消蚀的或非消蚀的各种聚爆方法。

激光材料方面,罗马尼亚代表介绍了他们研制的晶体激光材料情况。我国有两篇文章介绍了我国首次研制成功的激光材料:新型紫外倍频晶体  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 及 L-精氨酸磷酸盐晶体的生长和光学性能。此外,我国“ $\text{Ln}_2\text{RE}_{1-x}\text{P}_3\text{O}_{14}$ (LRPP) 晶体生长、结构和光谱”工作,引起与会代表们极大的兴趣。美国马里兰州李齐相教授的“钻石光-电开关”和“基于复光电导的微微秒光电子学”两文,内容新颖,水平较高,吸引了许多代表。

激光应用方面,也有两篇特邀报告,其一是'83 国际激光会议中国及其他地区的区节目委员会主席、中国光学学会副理事长王之江教授作的。他介绍了我国激光应用的概况,列举了获得经济效益的激光应用项目。另一篇报告是我国上海第二医学院秦家楠教授作的“中国激光医学概况”。国外代表对此两文特感兴趣,两个会场席无虚设,可见国外激光界人士,对我国激光技术,特别是激光应用,十分关注。苏联

(下转第 849 页)