

非线性光学反射膜系的设计与研究

莫 卫 东

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘 要: 通过对激光反射膜系中的光学损耗的分析,提出并设计了应用非线性膜层 (Ta_2O_5/SiO_2) 附加在常用的 $\lambda/4$ 膜层 (ZnS/MgF_2) 上面的新型膜系。旨在减小反射膜系的散射损耗,最大限度地提高激光反射镜的反射率。设计结果表明,在相同的条件下,用非线性膜层 Ta_2O_5 和 SiO_2 构成的新的组合膜系的激光反射镜与常用的 ZnS/MgF_2 膜系的激光反射镜比较,表面散射损耗达到了设计的要求,体积散射损耗减小的更多,其它的性能也得到了改善。利用本设计制备的超低散射损耗的高反射率激光反射镜,对激光技术的应用与发展有着重要的意义。

关键词: 反射镜;非线性光学膜系;散射损耗

中图分类号: O437 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2000)04-0063-05

根据光学薄膜干涉理论,光学反射膜系由两种不同材料的膜层构成,如 ZnS/MgF_2 膜系与 Ta_2O_5/SiO_2 膜系等。设计要求这两种材料的折射率相差应比较大,以利于最大限度地提高反射率。此外,反射膜系总的层数为奇数(19层或 21层等),两种材料膜层的厚度产不相等,分别等于反射光波长的 $1/4n$ (n 为膜层材料的折射率)。因此,把这种膜系的结构称为 $\lambda/4$ 波堆,这就是所谓的线性反射膜系。而如果使反射膜系的每层厚度随着层次变化,就构成了非线性光学反射膜系。

使用光学反射膜系制成的高反射率的反射镜主要用于激光器的制造中。激光器在原理上不仅要求所使用的反射镜必须具有很高的反射率,而且要求激光器的反射镜具有最小的光学损耗。需要特别注意的是,在各类激光器反射镜中的光学损耗里,散射损耗比吸收损耗大 5~10 倍^[1],关键的问题是激光中的散射对许多高精度的测量与应用的精度影响尤甚,如激光陀螺。因此,利用非线性膜系的特点设计一种旨在减小散射损耗的高质量激光反射镜是本设计所追求的主要目标。

1 膜层光学损耗的分析

1.1 膜层中的光学损耗

在膜层光学损耗中,吸收损耗来源于膜层材料对光能量的吸收,且吸收损耗主要决定于膜层的厚度,与工艺的关系不大。在精密激光测量与应用中,吸收损耗对仪器的性能甚微,它远小于散射损耗。散射损耗不仅决定于材料的内部结构,而且与工艺等其它条件密切相关,它是由多种因素相互交叉构成了一个相当复杂的光学损耗形式。

1.2 散射损耗模型

光在膜层中的散射归结为两大类:体积散射和表面散射,故散射损耗分为体积散射损耗(VSL)和表面散射损耗(SSL)两种。

体积散射损耗是膜层内结构不完善所引起的损耗。由于体积散射消光系数和吸收消光系数具有完全相同的性质,它们都使光的透射率按指数规律衰减,所以通常都将吸收损耗(AL)和体积散射损耗(VSL)合在一起计算,二者之和称为体积损耗(VL)。多层膜的体积损耗分布的表达式为^[2]。

* 收稿日期: 2000-01-15

基金项目: 国家 863 研究项目“激光陀螺研制”课题资助

作者简介: 莫卫东(1959-),男,广西合浦人,副教授,主要从事应用光学研究。

$$\text{体积散射损耗} = \frac{2\pi n_0}{n_H^2} (k_H + k_L)_{\text{eff}} \left[1 + \left(\frac{n_L}{n_H}\right)^2 + \left(\frac{n_L}{n_H}\right)^4 + \dots + \left(\frac{n_L}{n_H}\right)^{k-1} \right] \quad (1)$$

采用驻波分析方法可得到简化的多层膜反射膜系表面散射损耗的解析表达式^[3]:

$$\text{表面散射损耗} = 32\pi n_0 n_1 (n_H - n_L)^2 \left(\frac{e}{\lambda}\right)^2 \left[1 + \left(\frac{n_L}{n_H}\right)^2 + \left(\frac{n_L}{n_H}\right)^4 + \dots + \left(\frac{n_L}{n_H}\right)^{k-1} \right] \quad (2)$$

式中: n_0 为入射介质的折射率; n_1 为膜层基片介质的折射率; n_H 为高折射率膜层材料的折射率; n_L 为低折射率膜层材料的折射率; k_H 为高折射率膜层材料的消光系数; k_L 为低折射率膜层材料的消光系数; e 为膜层均方根表面粗糙度。反射膜层总的光学损耗为 VSL 与 SSL 之和

根据式 (1) 和 (2) 所表明关系, 关于激光反射镜中的光学损耗可得出以下结论:

(1) 在多层反射膜层中, 随着层数增加, 光学损耗迅速达到极限。这是因为一般反射膜系的高折射率材料与低折射率材料的折射率相差一倍, 即 $n_L/n_H \approx 0.5$, 所以相邻膜层的体积损耗和表面散射损耗都是以因子 (n_L/n_H) 几何级数递减的。

(2) 多层反射膜系的主要光学损耗都集中在最外面几层里。以氦氖激光器最常用的 ZnS/MgF₂ 反射膜系为例, 整个反射镜的吸收损耗为 0.072%, 其中靠近空气一侧的前 8 层中损耗就占了 0.070%, 最外的前 4 层膜中占了 0.060%。可见, 反射镜的光学损耗主要在最外几层。实际上, 光学薄膜的其它一些重要性质也取决于最外的若干层。

(3) 根据式 (1), 通过选择消光系数较小的材料, 或加大高与低折射率材料的折射率差值可减小 VSL。而根据式 (2), 加大高与低折射率材料的折射率差值却不利于减小 SSL。因此, 在选择膜层材料时应在注重减小 SSL 还是减小 VSL 做出折衷。

不过, 在实际应用中倾向于选择 n_H/n_L 差值较大的材料用于反射膜层。因为 n_H/n_L 差值若比较小, 意味着将要镀更多的膜层以保证足够高的反射率。而膜层的增加必然加大整个膜层的粗糙度 e 。由于 SSL 对 e 非常敏感, 从而导致 SSL 可能不减反增。所以, 综合各种因素, 选择 n_H/n_L 差值比较大的材料更有利于反射膜层光学损耗的减小。

本设计的中心思想和所追求的目标就是在减小表面散射损耗的同时, 不增加整个膜系的层数, 最大限度地减小膜导层的表面散射损耗, 最终降低表面散射损耗对激光精密仪器性能的影响。

2 非线性光学反射膜系的设计思想

2.1 理论基础

无论是吸收损耗还是散射损耗的大小, 虽然直接与材料的吸收系数和粗糙度相关, 但损耗的绝对大小与光波在膜层中的强度关系更大。然而反射膜系都是 $\lambda/4$ 膜系, 入射光波和反射光波在膜层中恰好满足驻波条件。图 1 显示了 $\lambda/4$ 膜系中光波电场强度的分布情况。从图上可以看出奇数层到偶数层的界面上出现的是波腹, 在偶数层到奇数层的界面上出现的是波节。

一般说来, 电场强度越大的界面或膜层, 其吸收和散射也越大。因此, 为了减小膜层的表面散射损耗, 就要力图有意识地降低膜层界面处的电场强度。这是本设计的一个关键环节!

要降低光波在膜层中特别是奇数层到偶数层的界面处的电场强度, 有两种途径可采用:

其一, 空气侧第一层膜的折射率应当选得尽可能高, 这样可以有效降低反射膜层中电场的的第一驻波波腹。

其二, 由于膜层中电场相邻波腹以因子几何递减, 所以两种材料的折射率之差应适当选大一些。

但为了减小各种散射损耗, 以上两个因素的选择要与其它要求综合考虑平衡。

2.2 非线性膜层设计的基本原理

一般高折射率材料的消光系数要比低折射率材料的消系数大 1~2 个数量级。可以设想, 如果适当减小

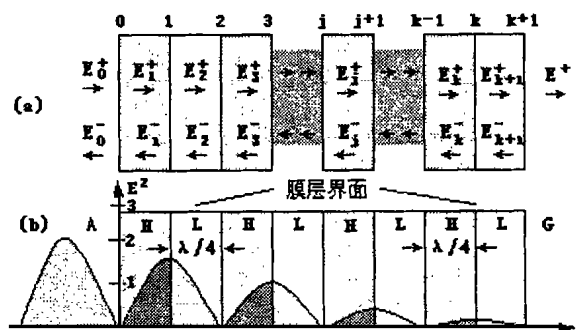


图 1 光波电场强度在膜层中的分布

高折射率膜层的厚度,相应地增加低折射率材料膜层的厚度,同时保证二者相位厚度之和为 π ,可望使膜层的
光学损耗有效地降低。下面以减小吸收损耗为例说明这种非线性膜层设计的基本原理

(1)首先,设高折射率膜层的复折射率为 $N_H = n_H - iK_H$,而低折射率膜层的吸收小到可以忽略的程度。
并设定的高折射率膜层的相位厚度为 W_H ,一旦 W_H 给定,因为高、低折射率两层膜的合成相位必须等于 π ,所
以不准求出低折射率膜层的相位厚度为

$$W_H = \pi - \theta \tag{3}$$

式中 $\theta = \arctan(C \tan W_H)$, $C = n_L / n_H$

(2)确定反射镜的吸收率 A 假定层数足够多,透射率便接近于零,故有

$$A = 1 - R_{\text{lim}} = \frac{4C\Gamma_H}{1 - \Gamma_H} \cdot \frac{2W_H - \sin^2 W_H}{1 - \cos^2 W_H}, \quad \text{其中 } \Gamma_H = \frac{k_H}{n_H} = \frac{W}{W} \tag{4}$$

由上式可见,只要高折射率膜层足够薄,则反射膜的吸收可以近似于零。但是,减小后对提高反射率的贡献相应地也要减小,从而导致为得到足够高的反射率,不得
不增加更多层数。图 2 为这种设计的驻波示意图

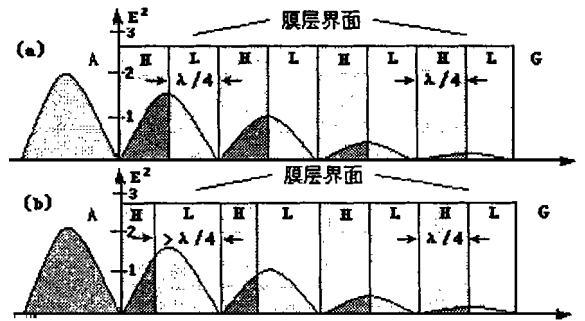


图 2 非线性光学反射膜系中场强驻波示意图

(3)根据前面的分析可知光学损耗集中在最上面的
几层内,而且光波的电场强度在最靠近空气的外面
几层中比内层要大得多。为了在减小高折射材料的
厚度时不增加更多的层数,只需要对最外面的几层进
行非线性处理就足够了,而其它膜层保持传统的 $\lambda/4$
波堆。这样既可以达到降低损耗的目的,又可避免过
多的层数

2.3 非线性膜层设计的具体方法

非线性膜层的设计无非是要确定高、低折射率材料膜层的厚度。虽然反射膜系的最外层是高折射率材
料,但设计时首先计算确定的是低折射率材料的厚度,具体方法如下:

(1)确定非线性反射膜层的低折射率材料膜层的厚度

利用相邻界面上电场强度矢量切向分量的递推公式,采用图 3 中所定义的参数,可以得到非线性膜层的低折射率材
料膜层的位相厚度 θ 为

$$\cos 2\theta = [r(1 - d)^2 + (1 - rd)(d - r) \cos 2W] / d(1 - r)^2 \tag{5}$$

式中, $r = (n_L + n_H) / (n_L - n_H)$; ρ 为图 3 中所示振幅反射
系数,如果 $\lambda/4$ 波堆较多,则 ρ 近似取为 -1 ; δ 为非线性膜层
的高折射率膜层的位相厚度; θ 为非线性膜层的低折射率膜
层的位相厚度; (5)表明,非线性低折射率膜层位相厚度应该
 $\pi/2 < \theta < \pi$,即厚度超过一个 $\lambda/4$ 波长所对应的位相厚度。

(2)确定非线性反射膜系的高折射率材料膜层的厚度

要确定非线性反射膜系的高折射率材料膜层的厚度,先要计算低折射率膜层以后整个膜系的反射系数,
近似公式为

$$d \exp(-2\theta) = u + iv \tag{6}$$

其中 $u = d \cos 2\theta$, $v = d \sin 2\theta$

然后,借助于导纳圆的几何关系,可求得满足 π 相移所需的高折射率膜层的位相厚度 W 为:

$$\tan 2W = v(1 - r^2) / [u(1 + r^2) - r(1 + u^2 + v^2)] \tag{7}$$

(3)确定非线性反射膜系的所有膜层的厚度

把由式 (7) 计算得到的 W 代入计算 θ 的式 (5) 中,这样连环重复计算便可求出各个非线性膜层的厚度。
利用以上设计后,光波电场强度在膜层中的驻波图如图 2 所示。

(4)非线性膜系反射系数的计算

在得到了非线性膜层的高和低折射率膜层的位相厚度 θ 与 W 之后,非线性膜系反射系数的计算方法一
般均是采用多层介质膜反射率计算的矩阵方法。其具体做法见文献 [4]

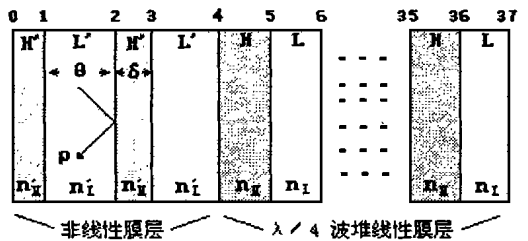


图 3 非线性膜层相位计算示意图

3 设计的结果与分析

根据上述设计的要求, $\lambda/4$ 波堆选择目前最常用的 ZnS/MgF_2 组合。该膜系的高低折射率之差较大,很适合作为整个反射膜系的基本 $\lambda/4$ 膜系,以保证足够的反射率要求。而附加在 $\lambda/4$ 膜系上的非线性膜层采用 Ta_2O_5/SiO_2 组合,其理由是:

(1) Ta_2O_5 和 SiO_2 的折射率之差相比 ZnS 和 MgF_2 的折射率之差要小,从而有利于减小表面散射损耗。

(2) Ta_2O_5 和 SiO_2 的消光系数分别都比 ZnS 和 MgF_2 的消光系数小,因而又有利于减小体积散射损耗。

(3)由于 MgF_2 膜层的散射会明显地随膜层厚度的增加而加大^[2],这是因为随着厚度增加膜层内部的裂纹增多的原因。而 Ta_2O_5 和 SiO_2 的成膜结构非常致密,填充密度大都接近于1。因此, Ta_2O_5 和 SiO_2 膜层的粗糙度 σ 相对比较小,同时机械性能与防潮性能都比较好。可见,采用 Ta_2O_5/SiO_2 组合作为非线性膜层附加在反射膜系的最外几层,对减小整个膜系的光学损耗是十分有利的,可谓一举三得。基于以上的所有分析和设计,最终计算的结果见表1。

表1 膜系散射损耗对比率

膜系	%				
	R	VL	SSL	VL	SSL
19层标准 $\lambda/4$ 波堆 ZnS/MgF_2 膜系: $A(HL)^9HG$	99.996	0.072	0.362		
19层 Ta_2O_5/SiO_2 和 ZnS/MgF_2 的 $\lambda/4$ 波堆组合膜系: $A0.54H1.69L0.58H1.59L(HL)^9HG$	99.971	0.013	0.278	81.9	23.2
19层 ZnS/MgF_2 非线性膜层与 $\lambda/4$ 波堆组合膜系: $A0.54H1.69L0.58H1.59(HL)^9HG$	99.967	0.060	0.286	16.7	20.9
19层 Ta_2O_5/SiO_2 非线性膜层与 ZnS/MgF_2 的 $\lambda/4$ 波堆组合膜系: $A0.52H1.65L0.58H1.57L(HL)^7HG$	99.956	0.022	0.220	69.4	39.2
21层 Ta_2O_5/SiO_2 非线性膜层与 ZnS/MgF_2 的 $\lambda/4$ 波堆组合膜系: $A0.52H1.65L0.58H1.57L(HL)^8HG$	99.985	0.022	0.220	69.4	39.2

注:①表中所用膜层材料的复折射率分别为: $H_{ZnS} = 2.3 - i \times 10^{-4}$, $L_{MgF_2} = 1.38 - i \times 10^{-5}$, $H_{Ta_2O_5} = 2.2 - i \times 10^{-6}$ 和 $L_{SiO_2} = 1.45 - i \times 10^{-5}$; A-空气, G-玻璃基片。

②在计算 SSL时,认为各个膜层表面粗糙度近似相等。此外,由于无法得到本设计所使用的值与膜层数的确切关系,为说明问题,根据一般普遍认为的 SSL比 VL大 5~10倍,反推得到 σ 后代入 SSL计算公式中。

③表中关于 VL和 SSL的减小量是相对于“19层标准 $\lambda/4$ 波堆膜系”减小的百分比。

4 结论

由设计的结果中可以看出,在相同条件下,用非线性 Ta_2O_5/SiO_2 膜层和 ZnS/MgF_2 的 $\lambda/4$ 波堆设计出的组合膜系反射镜的各项光学损耗指标,都要优于常用膜系的反射镜。具体表现在以下几个方面:

(1)反射镜的 SSL减小达到设计要求,因为 SSL对高精度激光测量仪的精度影响最大,同时 VL也减小了许多。如都是 19层反射镜膜系,具有非线性附加膜层的组合膜系比标准的 $\lambda/4$ 膜系 SSL减小了 39.2%, VL减小了 69.4%。

(2)本设计还有一个最大的优点在于,在选择好非线性膜层的材料并设计了它们的厚度时,增加或减小基本的 $\lambda/4$ 波堆将不会影响对非线性层的设计。但是,由于膜层的增加,势必加大整个膜系的粗糙度,对实际的结果应该有一定的影响。实验表明,若只少量增加几层,对最终的结果影响不大。

(3)在本设计的计算中,近似地认为各个膜层的粗糙度 σ 相等。实际上, Ta_2O_5/SiO_2 膜系的成膜结构致密于 ZnS/MgF_2 膜系,其粗糙度 σ 自然比后者小。

(4)由于本设计是在常用 $\lambda/4$ 的 ZnS/MgF_2 膜层附加了非线性膜层,在膜层界面上的电场强度将因此降低许多,从而有利于减小其它各种光学损耗。

总之,应用非线性膜层减小光学损耗原理设计的 Ta_2O_5/SiO_2 与 ZnS/MgF_2 的组合膜系,为制备超低散射损耗的激光反射镜提供了一个新的研究方向。可望使用该新设计的反射膜系较轻易地达到了总的光学损耗在 0.1%以下,从而制备出反射率在 99.9%以上的高质量低散射损耗的激光反射镜。如果采用目前推崇

的混合镀膜材料作为非线性附加膜层,其效果将一定更佳。

参考文献:

- [1] 顾培夫,唐晋发.激光反射镜中的光学损耗[J].浙江大学学报,1980,(2):33-47.
- [2] Ebert J, Pannhorst H, Kuster H, et al. Scatter losses of broadband interference coatings[J]. Appl Opt, 1979, 18(6): 818-822.
- [3] Arnon O. Loss mechanisms in dielectric optical interference devices[J]. Appl Opt, 1977, 16(8): 2147-2151.
- [4] 唐晋发,郑权.应用薄膜光学[M].上海科学技术出版社,1984.

Design and Research of Nonlinear Optical Reflection Film

MO Wei-dong

(The Engineering Institute, AFEU., Xi'an 710077, China)

Abstract A new kind of optical films has been designed by adding the Non-linear optical films (Ta_2O_5/SiO_2) on the Common $\lambda/4$ films (ZnS/MgF_2) on the basis of optical loss analysis in the reflector in order to reduce the scattering loss and raise the reflectivity. Compared with the common reflector the new Non-linear structure optical films have the less loss of SSL, VL that is another main loss of the reflector is reduced more than SSL, and the improvement of other properties of reflector is obtained. If the new design is adopted there will be an expectation to produce smaller excellent SSL laser reflectors, which is important for the development and application of laser technique.

Key words reflector; Non-linear optical films; scattering loss