

双反射薄膜的设计和实现

毛文伟¹, 林德教¹, 殷纯永¹, 霍玉晶²

(1 清华大学 精密仪器与机械学系, 2 清华大学 电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 弹光效应双反射膜是一种各向异性的高反射膜。在预加了应力的基片上镀制高反射膜, 然后撤去基片上的预加应力, 则基片上因弹性变形而产生的应变便转移到了膜系上。由于弹光效应使膜系成为各向异性的, 从而使垂直入射光束的两个正交偏振反射分量有了一定的相对相位延迟。理论分析和实验证明, 选择好膜系结构, 确定好中心波长, 并经过优化, 在工作波长处可以得到较大的相位色散, 施加 100 N 的力就能在正交方向获得 1.8 的相位差而反射率保持不变; 此膜系用于氦氖激光器, 可制出频差为 5 MHz 量级的双频激光器。文中给出了一个弹光效应的双反射膜的结构参数和数值计算结果。

关键词: 光学薄膜; 相位色散; 双反射膜; 弹光效应; 双频激光器

中图分类号: TH 744.2

文章编号: 1000-0054(2001)11-0077-03 文献标识码: A

Design and implementation of bireflectance film

MAO Wenwei¹, LIN Dejiao¹, YIN Chunyong¹, HUO Yujing²

(1 Department of Precision Instruments and Mechanology,

2 Department of Electronic Engineering,

Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Bireflectance film based on the photoelastic effect is a kind of anisotropic high reflection coating. Coating high reflectance film on the substrate pre-applied stress and then remove the stress, the strain of the substrate caused by elastic deformation can be transferred to the film series. The film series becomes anisotropic due to the photoelastic effect, therefore a relative phase delay is brought out between the two orthogonal polarized reflective components of the normal incident light. Theoretical analysis and experiments have proved that selecting suitable film series structure, determining appropriate center wavelength and being optimized can get large phase dispersion at working wavelength. Furthermore, orthogonal phase difference of 1.8° can be obtained by applying a force of 100 N while reflective index is almost not varied. If this film series is used in He-Ne laser, the dual-frequency laser with 5 MHz beat will be produced. The structural parameters and numerical calculation results of a bireflectance film of the photoelastic effect are presented.

Key words: optical film; phase dispersion; bireflectance film; photoelastic effect; dual-frequency laser

在激光谐振腔中引入弹光效应产生的双折射, 使得激光输出的频率发生变化, 进而做成双频激光器、加速度传感器和力传感器, 已有多篇文献报导^[1~3]。目前, 基于双折射频率分裂原理的激光器在工艺上存在一定困难, 难于保证频差和偏振方向的稳定性, 因此需要寻求一种简洁的解决办法。如果能在氦氖激光器的窗片上镀制弹光效应双反射膜, 得到较高频差的双频激光输出, 是十分有吸引力的, 它可以使激光器的性能和寿命都有很大的提高, 而且工艺性能也得到根本的改善, 以适应高速外差测量的需求。

弹光效应双反射膜是一种各向异性的高反射膜。在预加了应力的基片上镀制高反射膜, 镀制方法与普通激光器窗片上的高反射膜系的镀制一样。镀膜完成后, 再撤去基片上预加的应力, 这样就将基片上由于弹性变形而产生的应变转移到了膜系上, 进而由于弹光效应使所镀制的高反膜系成为了各向异性的膜系。

一般说来, 由于是在弹性形变的范畴内讨论问题, 所以在基片上施加的力、应力、应变以及转移到膜系材料上的双折射都是很小的。通常在光学薄膜的光学性质研究中, 光强信息考虑得较多, 而相位信息考虑得相对较少^[4, 5], 加之一般的激光反射镜多采取 $\lambda/4$ 膜系, 而 $\lambda/4$ 膜系在中心波长两边的一段区域内相位变化又比较平坦, 对两个正交反射分量来说, 似乎难以得到较大的相位差, 相关的数值计算

收稿日期: 2000-08-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59735120); 清华大学基础研究基金项目 (JC1999013)

作者简介: 毛文伟(1946-), 男(汉), 青海, 教授。

结果也证明了这一点。或许这就是目前双反射膜的研究没有得到足够重视的原因。

然而在有的宽带高反射膜系中, 离开中心波长较远处, 光程随波长的变化较陡, 位相色散大, 而反射率基本保持不变^[5], 这使双反射膜的设计成为可能。

文中给出了双反射膜设计计算过程和一个可行的设计结果。

1 基本原理

根据双反射双频激光器的需要, 要形成 $\Delta\nu=5\text{ MHz}$ 的频差, 需要的两个正交偏振分量的反射相位差为

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi l \Delta\nu}{c} = 1.8^\circ \quad (1)$$

式中: $l=150\text{ mm}$, 为激光器的腔长; c 为光速。

假定沿基片的径向施加力 F , 由于激光光束直径与基片直径相比约小一个量级, 且光束的工作区域位于基片中心, 故可近似地认为基片上光束工作区域内所受的应力是均匀的, 其关系为^[1]

$$\sigma = \frac{1}{\phi_t} k_s F, \quad (2)$$

式中: ϕ 是基片的直径, t 是基片的厚度, k_s 是形状因子, σ 是基片光束工作区域中所受的应力。

根据 Hooke 定律, 在基片光束工作区域处产生的应变 u 为

$$u = \frac{\sigma}{E}, \quad (3)$$

式中 E 为弹性模量。

在预加了应力的基片上镀制适当的高反射膜系, 镀膜完毕后, 再撤去预加在基片上的应力, 基片上的应变便转移到膜系上。原本各向同性的膜系就有了单轴晶体膜系的特征, 而且光轴就沿着原先基片上应力的方向, 主折射率分别为:

$$\begin{cases} n_o = n - \frac{n^3}{2} p_{12} u, \\ n_e = n - \frac{n^3}{2} p_{11} u, \end{cases} \quad (4)$$

式中: p_{11} , p_{12} 为应变弹光系数; n 为材料折射率, n_o , n_e 分别为 o 光和 e 光的折射率。

由式(2), (3)可得到加力 F 后基片的应变, 将其值连同 n_{SD_2} , p_{11} 和 p_{12} 代入式(4)即可得到后弹光效应情况下 SD_2 薄膜层的两个主折射率 n_{Lo} 和 n_{Le} ; 同样可得到 TD_2 薄膜层的两个主折射率 n_{Ho} 和 n_{He} 。

对于一个选定的膜系结构, 用 n_{Lo} 和 n_{Ho} 分别取代低折射率层的折射率 n_{L} 和高折射率层的折射率

n_{H} 进行数值计算可得到工作波长处的反射相位 φ_{L} , 而用 n_{Le} 和 n_{He} 分别取代 n_{L} 和 n_{H} 可以计算出反射相位 φ_{e} 。二者的差 $\Delta\varphi = \varphi_{\text{e}} - \varphi_{\text{L}}$ 即为双反射膜相对相位延迟。

$\Delta\varphi_{\text{L}}$ 和 $\Delta\varphi_{\text{e}}$ 分别为谐振腔两端两双反射膜的相对位相延迟, 由此造成的双频激光的频差为^[1]

$$\Delta\nu = \frac{c}{2\pi l} \cdot \frac{\Delta\varphi_{\text{L}} + \Delta\varphi_{\text{e}}}{2}, \quad (5)$$

式中: $\Delta\varphi_{\text{L}}$ 和 $\Delta\varphi_{\text{e}}$ 是以弧度为单位的。

2 双反射膜的设计

2.1 双反射膜的设计判据

对双反射膜的基本要求是在工作波长所在的一段范围内, 反射率很高且随着波长的变化十分平坦, 而反射相位随波长的变化却要十分陡峭。即对光学薄膜的两个信息, 强度和相位都提出了具体的要求。

此外, 实际操作中不能施加太大的应力, 于是要求 $\Delta\varphi/F$ 值要大, 而由式(1)~(4)可知, $\Delta\nu$ 和 $\Delta\varphi$, Δn 和 F 分别呈线性关系, 所以也就希望 $\Delta\varphi/\Delta n$ 值大。因为激光腔中 o 光、e 光的折射率差 Δn 和波长差 $\Delta\lambda$ 是相关的, 所以选择 $\Delta\varphi/\Delta\lambda$ 值变化剧烈的结构计算双反射相位差不失为一种简洁的途径。

2.2 双反射膜的设计实例

1) 基片: 圆形, 直径为 5 mm , 厚度 t 为 4 mm ; 材料为 K_4 (玻璃), 折射率 $n_g = 1.50625$ (工作波长为 $0.6328\text{ }\mu\text{m}$), 弹性模量 $E = 71.44\text{ GPa}$ 。

2) 膜系材料: 低折射率材料为 SD_2 , 折射率 $n_{\text{SD}_2} = 1.457156$ (工作波长为 $0.63\text{ }\mu\text{m}$), 应变弹光系数为 $p_{11} = 0.121$ 和 $p_{12} = 0.270$; 高折射率材料为 TD_2 , 折射率 $n_{\text{TD}_2} \approx 2.4$, 应变弹光系数近似取为 $p_{11} \approx -0.011$ 和 $p_{12} \approx 0.172$ (工作波长为 $0.633\text{ }\mu\text{m}$, 需要说明, 这里的应变弹光系数数值是晶体 TD_2 的, 只作为估算用)。

3) 形状因子 k_s : 假定激光光束的直径 $< 1\text{ mm}$, 并假设激光光束从窗片的中心穿过; 又由于窗片的几何形状、受力状态、受力大小和材料与文[1]一致, 故取 $k_s = 2.54$ 。

取一非 $\lambda/4$ 膜系为: $\text{A } 0.966[\text{H}(\text{LH})^{10}]\text{L } 1.18[\text{H}(\text{LH})^{10}]\text{G}$, 由上面给定的原始数据, 计算出波长在 $420\sim 680\text{ nm}$ 范围内, 反射率和相位相对于波长的变化曲线如图 1 所示。表 1 列出了在波长 633 nm 附近的反射率和相位延迟角大小。由图 1 和表 1 可以看出, 在 633 nm 附近的一段波长范围内, 反射率几乎接近于 1 并保持不变, 但相位随波长的改变却

有急剧变化, 即 $\Delta\varphi/\Delta\lambda$ 值很大。图 2 表示出在 633 nm 附近 e 光和 o 光由于折射率不同引起的相位差值, 可以看出, 上述膜系工作波长为 633 nm 时 $\Delta\varphi$ 值达到极大, 此时对应的激光输出双频频差也最大。

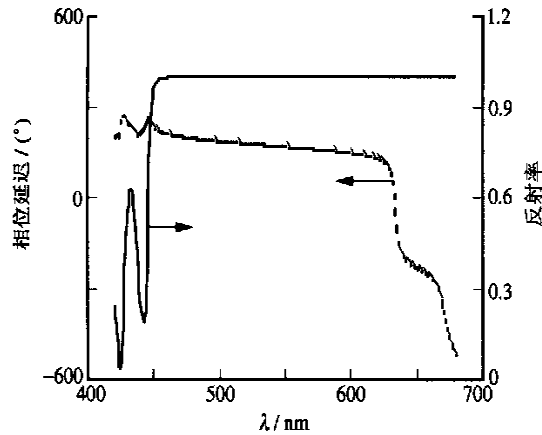


图 1 A0 966[H(LH)¹⁰]L1 18[H(LH)¹⁰]G 膜系
反射率和相位相对于波长的变化曲线

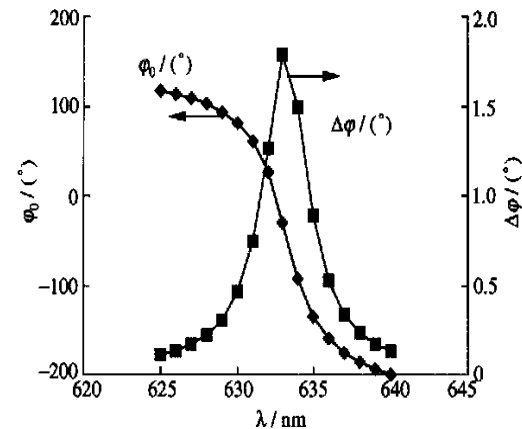


图 2 在 633 nm 附近 e 光和 o 光由于折射率不同
引起的相位差值

表 1 A0 966[H(LH)¹⁰]L1 18[H(LH)¹⁰]G 膜系
反射率和相位相对于波长的变化值(633 nm 附近)

λ/nm	反射率	相位延迟/(°)
630	0.999 957	73.75
631	0.999 919	48.49
632	0.999 851	5.47
633	0.999 806	-56.36
634	0.999 851	-112.07
635	0.999 905	-146.87

令加在基片上的力 F 在 0~ 200 N 范围内变化, 则由式(2)~ (5)可算出双频激光的频差 $\Delta\nu$ 随加力 F 的变化曲线, 如图 3 所示。当 $F=100\text{ N}$ 时, 对应的频差 $\Delta\nu$ 达 5.0 MHz。

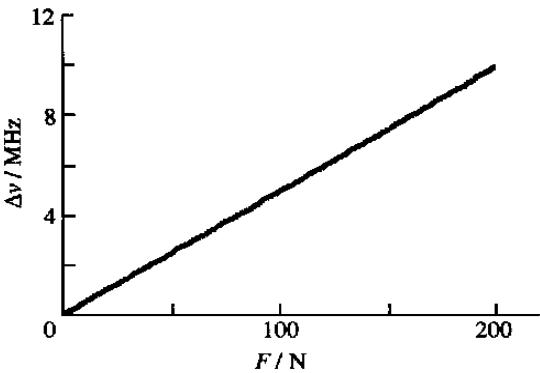


图 3 双频激光的频差 $\Delta\nu$ 随加力 F 的变化曲线

值得一提的是, 并非任意的非 $\lambda/4$ 膜系对于双频激光频差的提高都有显著作用, 这需要一定的理论计算分析选择并通过实验验证。改变非 $\lambda/4$ 膜系的结构和层数, 则得到的频差 $\Delta\nu$ 随加力 F 的变化斜率将有不同, 相应的 $\Delta\varphi/\Delta\lambda$ 也有不同。经数值模拟计算比较, 对于上述所采用的非 $\lambda/4$ 膜系, 在加力一定的情况下, $\Delta\varphi/\Delta\lambda$ 、 $\Delta\nu$ 达到极大值。

3 结 论

在一种非 $\lambda/4$ 膜系中镀膜因弹光效应而产生的折射率微小变化条件下, 得到了反射率几乎不变而正交方向的相位急剧变化的结果。其相位变化量在激光谐振腔中足以产生 5 MHz 的频差。这对于研制高频差的双频激光器是一个十分有吸引力的结果。双反射膜也会在其它方面得到广泛的应用。

参考文献 (References)

[1] Holzapfel W, Settgast W. Force to frequency conversion by intracavity photoelastic modulation [J]. Applied Optics, 1989, 28(21): 4585 ~ 4594

[2] Owyong A, Esherrick P. Stress-induced tuning of a diode-laser-excited monolithic Nd: YAG laser [J]. Optics Letters, 1987, 12(12): 999 ~ 1001

[3] Tai S, Kyuma K, Nunoshita M. Fiber-optic acceleration sensor based on the photoelastic effect [J]. Applied Optics, 1983, 22(11): 1771 ~ 1774

[4] 王明利, 范正修, 龚 辉, 等. 光学薄膜的相位变化与特点 [J]. 光学学报, 1997, 17(11): 1559 ~ 1562

WANG Mingli, FANG Zhengxiu, GONG Hui, et al. Phase variation and characterization of the optical coatings [J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17(11): 1559 ~ 1562 (in Chinese)

[5] 王之江, 杨本祺. 超短脉冲和腔内色散 [J]. 光学学报, 1985, 5(8): 697 ~ 701

WANG Zhijiang, YANG Benqi. Ultrashort pulses and intracavity dispersion [J]. Acta Optica Sinica, 1985, 5(8): 697 ~ 701 (in Chinese)