

激光对非 $\lambda/4$ 膜系变反射率薄膜的损伤机理*

倪晓武 陆 建

(南京理工大学应用物理系, 南京, 210094)

张 放

马 孜

(华北光电技术研究所, 北京, 100015)

(西南技术物理研究所, 成都, 610041)

摘要: 讨论了高功率激光对非 $\lambda/4$ 膜层组成的变反射率光学介质薄膜损伤时的场作用和热作用的物理机理, 并对实际膜层的激光损伤阈值进行了测试。理论和实验研究结果证明, 激光对该种膜系产生损伤的主要原因是膜层吸收激光能量引起的。

关键词: 激光产生损伤 光学介质薄膜 热作用 物理机理

Laser damage mechanisms of a variable refractivity thin film consisted of nonquarter-wavelength film layers

Ni Xiaowu, Lu Jian

(Dept. of Applied Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094)

Zhang Fang

(North China Institute of Electro-Optics, Beijing, 100015)

Ma Zi

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, 610041)

Abstract: The physics mechanism of field effect and thermal effect on a variable-refractivity optical dielectric thin film consisted of nonquarter-wavelength film layers irradiated by a beam of high-power laser to produce damage have been discussed in this paper, and laser damage thresholds of film layer specimen have been measured. It has been indicated theoretically and experimentally that the thin film absorbing laser energy is a main reason to produce laser damage for this kind of film.

Key words: laser produced damage optical dielectric thin film thermal effect physics mechanisms

引 言

变反射率光学介质薄膜(VRM)是真空镀膜技术迅速发展的产物,当将其作为激光输出镜时,能使激光器输出光束的特性得到明显改善,从而获得近单横模分布的激光束,这在80年代就有应用的报道^[1,2]。早期的变反射率光学介质薄膜用于低功率输出的连续激光器中,因而并不存在激光束对变反射率光学介质薄膜的损伤。近年来有将其用于高功率脉冲激光器的报道^[3,4]。我们在实际使用中,已发现激光束对变反射率光学介质薄膜产生的损伤,因此,对激光束致使变反射率光学介质薄膜产生损伤的问题进行了理论和实验研究。通过理论和实际损伤阈值的测试结果可见,激光束对变反射率光学介质薄膜产生损伤的主要机理是激光能量产生的热作用,故避免激光的热效应是防止膜层损伤的关键所在。

* 国家教委跨世纪优秀人才计划基金、霍英东教育基金会高校青年教师基金、江苏省自然科学基金资助。

一、损伤机理

激光对光学介质薄膜的损伤过程是比较复杂的,经典概念认为主要有场效应和热效应^[5]。在激光与光学介质薄膜的实际作用过程中,这两种效应同时存在。当然,对不同的作用过程,其中一种起主要作用。下面针对非 $\lambda/4$ 膜层组成的变反射率光学介质薄膜系统对上述两种损伤效应进行理论研究。

1. 激光对变反射率光学介质薄膜作用的场效应

激光具有良好的相干性,因而在其通过介质薄膜时,不仅反射光束之间会发生干涉,反射光与入射光相遇也将发生干涉。这种反射光与入射光作用的结果是在薄膜内部形成驻波场。

$$\text{设入射光波动方程为} \quad \bar{E}^+ = \bar{E}_0^+ \exp[i(\omega t - \delta)] \quad (1)$$

$$\text{反射光波动方程} \quad \bar{E}^- = \bar{E}_0^- \exp[i(\omega t + \delta)] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{则驻波场为} \quad \bar{E} &= \bar{E}^+ + \bar{E}^- = \bar{E}_0^+ \exp[i(\omega t - \delta)] + \bar{E}_0^- \exp[i(\omega t + \delta)] \\ &= [\bar{E}_0^+ \exp(i\delta) + \bar{E}_0^- \exp(i\delta)] \exp(i\omega t) \end{aligned} \quad (3)$$

$$|\bar{E}|^2 = |\bar{E}_0^+|^2 + |\bar{E}_0^-|^2 + 2\bar{E}_0^+ \bar{E}_0^- \cos 2\delta \quad (4)$$

式中, $\delta = (2\pi/\lambda)nz \cos\theta$ 是膜料折射率 n 和位置 z 以及入射角 θ 的函数。当 $\theta = 0$ 时有

$$\delta = 2\pi n z / \lambda \quad (5)$$

由上式可知,光在膜层中的强度随位置的不同而不同。且当 $\delta = m\pi$ ($m = 0, 1, 2, \dots$) 时

$$|\bar{E}|^2 = \left| |\bar{E}_0^+| - |\bar{E}_0^-| \right|^2 \quad (6)$$

光强呈极小值,即出现驻波波节。

$$\text{当 } \delta = (2m + 1)(\pi/2) \text{ (} m = 0, 1, 2, \dots \text{)} \text{ 时,} \quad |\bar{E}|^2 = \left| |\bar{E}_0^+| + |\bar{E}_0^-| \right|^2 \quad (7)$$

光强呈极大值,即出现驻波波腹。

将我们所讨论的非 $\lambda/4$ 膜层组成的变反射率光学介质薄膜的各层参量代入以上诸式,可以得到整个介质膜系中心处的总相位为 $\delta_{\max} = 2.357\pi$, 并不是 π 的整数倍,因而不能形成稳定的驻波场;在膜系的边缘处有 $\delta_{\min} = 1.40\pi$, 也不能形成稳定的驻波场;只有当 $\delta = 2\pi$ (此时对应的最外层膜层厚度为 0.154λ) 时,将形成稳定的驻波场,该驻波场也仅在膜系中形成二个稳定的波腹,分别位于距最外层膜外表面 $0.136\mu\text{m}$ 处(在最外层膜中间)和 $0.666\mu\text{m}$ (在第三层膜中间)。

我们知道,激光场在膜系中形成的波腹若位于膜层的界面处时,将最易引起薄膜损伤,而在本文讨论的激光在膜系中形成的驻波场是不稳定的,即使在稳定的驻波场处,对应的波腹也在某一膜层的中间,而不在界面处。由此可推知,在激光对这些膜系产生损伤时,场效应不是引起损伤的主要因素。

2. 激光对变反射率光学介质薄膜作用的热效应

我们知道,当激光作用于光学介质薄膜时,膜层所吸收的激光能量 W_A 可表示为

$$W_A = W_0(1 - e^{-Ad}) \quad (8)$$

因为介质薄膜对入射激光是一种弱吸收介质,因而上式可写为 $W_A \approx W_0Ad$ (9)

式中, W_0 为入射激光能量; A 为吸收率; d 为膜层厚度。在本文中膜层总厚度 d 是距中心半

径的不同而变化的, 根据膜系的有关参数可求得膜系中心和最边缘处的厚度分别为:

$$d_{\max} = 0.25\lambda + 0.3\lambda + 3.1345\lambda = 0.6845\lambda, \quad d_{\min} = 0.3\lambda + 0.1345\lambda = 0.4345\lambda$$

当 $\lambda = 1.064\mu\text{m}$ 时, $d_{\max} = 0.728\mu\text{m}$ 和 $d_{\min} = 0.462\mu\text{m}$ 。将以上数据代入(9)式得

$$W_{AM} \approx W_0 A d_{\max} = 0.728 W_0 A, \quad W_{Am} \approx W_0 A d_{\min} = 0.462 W_0 A$$

所以有 $W_{AM} = 1.576 W_{Am}, \quad W_{Am} = 0.635 W_{AM}$ (10)

由此可见, 对膜层总厚度变化的变反射率光学介质薄膜而言, 其中心处膜层总厚度最厚, 所吸收激光能量最多; 边缘处膜层最薄, 吸收激光能量也最少。

二、实验与结果

1. 实验样品 在实际测试研究中, 所使用的光学介质薄膜的结构如附图所示, 其中膜层 1 的厚度 d_1 是变化的, 最厚处厚度为入射激光波长的 $\lambda/4$, 最薄处为 0, 膜料的折射率为 $n_H = 1.95$; 膜层 2 的厚度 d_2 为 0.3λ 折射率 n_L 为 1.46; 膜层 3 的厚度 d_3 为 0.1345λ , 折射率与膜层 1 相同; 最下面的基底材料是 K9 玻璃, 折射率 $n_0 = 1.52$ 。

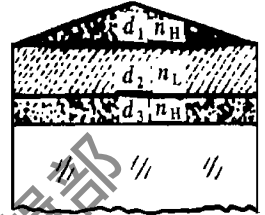


Fig. Structure diagram of measured specimen

2. 实验结果 我们对直径为 $\varnothing 8\text{mm}$ 的样品从中心向外依次取为: T_1, T_2, \dots, T_5 。实验测得 $T_1 \dots T_5$ 间的关系为 $T_1 < T_2 < T_3 < T_4 < T_5$ (11)

且有 $T_1 = 1.04\text{MW}/\text{cm}^2, T_5 = 679\text{MW}/\text{cm}^2$ 。注意到介质薄膜的激光损伤阈值较低时, 膜层更易被损伤, 因而, 此实验结果与理论结果基本一致。另外, 我们对图中最外层膜层各处厚度均为 $\lambda/4$ 的均匀膜系也进行了损伤阈值的测试, 其结果达到 $1\text{GW}/\text{cm}^2$ 。

三、讨 论

由实验结果可见, 激光对非 $\lambda/4$ 膜层组成的变反射率光学介质薄膜损伤的场效应并不明显, 即使激光在膜系中形成稳定的驻波场处 ($r = 2.464\text{mm}$), 也未见有异常的损伤点。这可能是因我们所讨论的膜系为非 $\lambda/4$ 膜系, 驻波场的波腹与波节均不在膜层界面处, 因而, 激光场效应不易对薄膜产生破坏。

通过膜系对激光束热吸收的计算结果可知, 膜层最厚的中心处吸收激光能量是边缘的 1.576 倍, 而由实验测得该处的损伤阈值 T_1 比边缘低了 1.492 倍。这说明激光的热作用是导致变反射率光学介质薄膜损伤的主要机理, 而且膜系的损伤阈值与其吸收的激光能量成反比, 这与我们以前得到的结论基本一致, 具体的作用机理已在作者的其它论文中讨论过^[5,6]。

参 考 文 献

- 1 Lavigne P, McCarthy N, Demers J G. Appl Opt, 1985; 24(16): 2581
- 2 Parent A, McCarthy N, Lavigne P. IEEE J Q E, 1987; QE-23(2): 222
- 3 Snell K J, McCarthy N, Piche M. Opt Commun, 1988; 65(5): 377
- 4 Zhou S, Zhang F, Wen H et al. SPIE, 1992; 1979: 269
- 5 倪晓武, 陆建, 贺安之. 激光技术, 1994; 18(4): 348
- 6 Ni X W, Lu J, He A Z. Opt Commun, 1992; 90(4/6): 270

作者简介: 倪晓武, 男, 1955 年出生。博士, 教授。长期从事激光与物质相互作用机理与测试方法研究。
陆建, 男, 1965 年出生。博士, 教授。长期从事激光与物质相互作用机理与测试方法研究。

收稿日期: 1997-06-16 收到修改稿日期: 1997-10-27