

文章编号： 1001-4322(2003)04-0319-04

# 连续激光辐照 ZnSe/ MgF<sub>2</sub>/ K9 滤光片的透射特性研究<sup>\*</sup>

袁永华<sup>1,2</sup>, 刘颂豪<sup>2</sup>, 孙承纬<sup>1</sup>, 范正修<sup>3</sup>, 廖常俊<sup>2</sup>, 赵元安<sup>3</sup>

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 华南师范大学 量子电子学研究所, 广东 广州 510631; 3. 中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要:** 分析了连续激光辐照 ZnSe/ MgF<sub>2</sub>/ K9 滤光片引起透射特性的变化。在室温条件下,用波长 0.632 8μm 激光作为探测光束,测量了 1.06μm 连续激光辐照 ZnSe/ MgF<sub>2</sub>/ K9 滤光片温升引起薄膜折射率的改变,导致探测光束通过干涉滤光片后透过率的热致非线性变化。在光斑直径 0.75mm 条件下,测量了不同功率激光辐照 ZnSe/ MgF<sub>2</sub>/ K9 滤光片引起温升随时间的变化。在激光功率 30W,辐照时间 2.52s 条件下,实验观测到 ZnSe/ MgF<sub>2</sub>/ K9 滤光片薄膜破坏温度约为 90℃,辐照时间 10s 时干涉滤光片形成的薄膜龟裂形貌。

**关键词:** 连续激光; 干涉滤光片; 折射率; 透过率; 薄膜破坏

**中图分类号:** TN437 **文献标识码:** A

光学中最为熟悉的 F-P 结构,可以有效地提供光场的反馈条件,并在多层介质薄膜干涉滤光片的研制中得到了充分的认识和利用<sup>[1~3]</sup>。激光辐照干涉滤光片的透射特性一直是激光与材料相互作用耦合规律研究的重要内容,它在光电对抗技术研究方面具有重要的应用前景<sup>[4~6]</sup>。本文采用探测光和泵浦光各自分开的方法,其中探测光波长位于干涉滤光片的通带范围内,而泵浦光波长则处于干涉滤光片的通带范围之外,用光热光平行检测方法测量连续激光辐照 ZnSe/ MgF<sub>2</sub>/ K9 滤光片透过率的变化<sup>[7]</sup>。由于泵浦光与干涉滤光片工作波段不存在共振吸收,因此激光辐照干涉滤光片引起透过率变化的研究方法在实际应用中更具有普遍性和适应性。

## 1 干涉滤光片的透射特性

典型全介质 F-P 干涉滤光片结构为<sup>[8]</sup>:HL HL ... (m HH) ..L HL H,其中 H 为 λ/4 厚度的高折射率材料,L 为 λ/4 厚度的低折射率材料,m 为整数。高低薄膜层在 mHH 标准具中起高反射作用。如激光单次通过标准具损耗,则低能量激光辐照时其线性透射光强满足

$$I_T(\phi) = I_0 a(1 - R)^2 [(1 - Ra)^2 (1 + F \sin^2 \phi)]^{-1} \quad (1)$$

$$F = 4Ra / (1 - Ra)^2 \quad (2)$$

式中:R 为薄膜的反射率;φ 为波长 λ 的光束单程通过标准具的位相差;I<sub>0</sub> 和 I<sub>T</sub> 分别为入射和透射光强。φ 随光强的变化确定了标准具的非线性特性。根据激光辐照干涉滤光片产生的温升 ΔT 确定光学厚度 (nl),可以给出<sup>[9]</sup>

$$\phi(I) = m\pi - \phi_0 + (nl)^2 / \lambda \quad (3)$$

$$(nl) = nl \left[ \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} + \frac{1}{l} \frac{dl}{dT} \right] T \quad (4)$$

式中:φ<sub>0</sub> 为低激光辐照强度下透射峰值的初始失调位相。在对应波长下,ZnSe 薄膜的光热系数 (1/n) (dn/dT) 比线膨胀系数要大十多倍。因此,激光辐照干涉滤光片过程中产生的热效应将起主要作用。

实验中,使用的干涉滤光片样品结构为:(HL)<sup>3</sup>HH(LH)<sup>3</sup>,其中 H 为 λ/4 厚度的高折射率材料 ZnSe,L 为 λ/4 厚度的低折射率材料 MgF<sub>2</sub>,m = 1,共有 14 层薄膜叠加在 K9 玻璃基片上。干涉滤光片中心波长为 0.632 8μm,透过率大于 0.70,半宽度约为 6nm。图 1 给出 ZnSe/ MgF<sub>2</sub>/ K9 滤光片结构对应的归一化驻波场分布,其中 M 为空气,第 7 层薄膜为 HH,S 为 K9 玻璃基片。按照驻波场理论,驻波波腹处光强最大,因而对薄膜的破坏也从该处附近开始。考虑到驻波场的波腹并不一定位于膜层的表面,因而激光与光学薄膜作用的场效应将

\* 收稿日期:2002-11-19; 修订日期:2003-01-15

基金项目:国家 863 计划项目资助课题

作者简介:袁永华(1955-),男,研究员,博士生,研究方向为光电子技术和激光效应;绵阳 919-113 信箱。

可能导致膜层从非表面某处开始破坏。从图中可以看出,在第 9 层薄膜驻波波腹处光强最大,预示在激光辐照 ZnSe/MgF<sub>2</sub>/K9 滤光片过程中,此薄膜层附近可能首先出现破坏。

## 2 实验结果

实验中,研究 1.06μm 连续激光辐照 ZnSe/MgF<sub>2</sub>/K9 滤光片的透射特性实验光路布局如图 2 所示。其中 0.632 μm 波长位于干涉滤光片的光谱通带范围内,并作为干涉滤光片透过率变化的探测光;波长 1.06μm 位于 ZnSe/MgF<sub>2</sub>/K9 干涉滤光片的光谱通带范围之外,作为诱导干涉滤光片透过率变化的泵浦光。

1.06μm 连续激光作为泵浦光,经  $f = 250\text{mm}$  透镜 1 辐照 ZnSe/MgF<sub>2</sub>/K9 滤光片产生温升,引起薄膜折射率改变,使干涉滤光片透射光谱曲线偏离中心波长。He-Ne 激光作为探测光束,经  $f = 50\text{mm}$  透镜 2 垂直照射干涉滤光片实验样品。He-Ne 激光经分束器反射到功率计 1 用于监测入射干涉滤光片的激光功率。透过滤光片的 He-Ne 激光经 0.632 μm 滤光片进入功率计 2,用于监测透过干涉滤光片的 He-Ne 激光功率。通过分析透过滤光片后激光功率的变化来分析滤光片的透射特性变化。红外热像仪用于测量 ZnSe/MgF<sub>2</sub>/K9 滤光片吸收入射激光能量产生温升随时间的变化。

实验中,调节透镜位置,使干涉滤光片上泵浦激光的光斑尺寸远远大于探测光斑。为了确定干涉滤光片的初始状态位置,旋转安装好实验样品的支架,由功率计 2 监测 He-Ne 激光透过干涉滤光片刚好出现最大功率位置或最小功率的位置。在不同泵浦激光功率条件下,实时监测入射、透过干涉滤光片的 He-Ne 激光功率。实验中,激光辐照到样品上的光斑直径为 0.75mm。图 3 给出 1.06μm 连续激光辐照 ZnSe/MgF<sub>2</sub>/K9 滤光片,探测光通过干涉滤光片后透过率随泵浦激光功率的变化。通过旋转干涉滤光片,使探测光透过最大时为初始位置,激光功率先从大到小,然后再从小到大,透过干涉滤光片的探测光随泵浦激光功率的变化如图 3(a) 所示。从图 3(a) 中可以看出:激光功率先从大到小,然后再从小到大,探测光通过滤光片的透过率存在一个明显的非线性变化区域;如果通过旋转干涉滤光片,使探测光透过最小时为初始位置,激光功率先从小到大,然后再

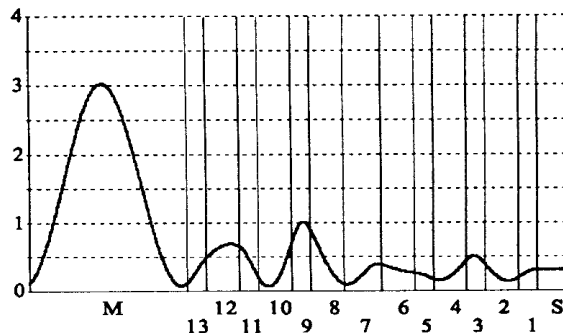


Fig. 1 Stationary wave field normalized of ZnSe/MgF<sub>2</sub> filter  
图 1 ZnSe/MgF<sub>2</sub> 滤光片归一化的驻波场

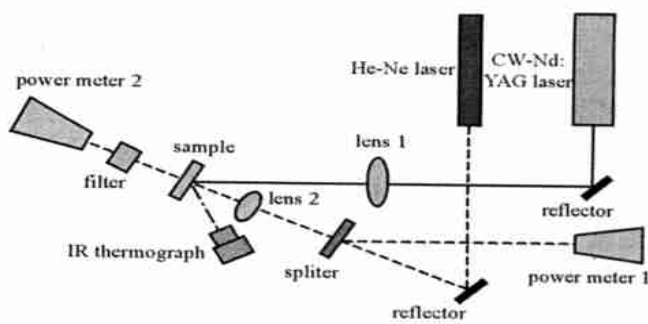


Fig. 2 Experimental setup for transmission of the interference filter changed by CW laser-induced  
图 2 连续激光辐照干涉滤光片透射特性测量的实验布局

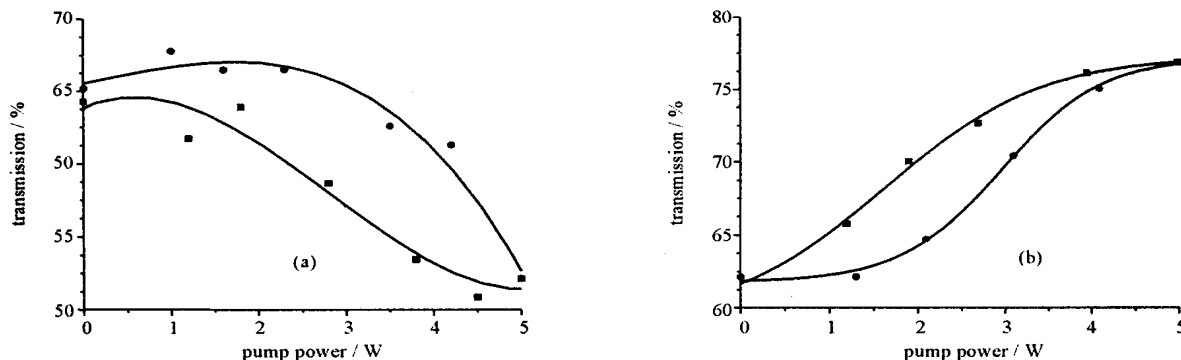


Fig. 3 Variation of the detecting beam through the interference filter with the pumping laser power  
(a) initial state at the maximum of the interference filter's transmission;  
(b) initial state at the minimum of the interference filter's transmission

图 3 透过干涉滤光片的探测光随泵浦激光功率的变化。(a) 初始状态在干涉滤光片透射最大位置;(b) 初始状态在干涉滤光片透射最小位置

从大到小,透过干涉滤光片的探测光随泵浦激光功率的变化如图 3(b) 所示,探测光通过滤光片的透过率同样存在一个明显的非线性变化区域。

在激光输出功率 30W 和光斑直径 0.75mm 的条件下,用红外热像仪测量 1.06μm 连续激光辐照 ZnSe/ MgF<sub>2</sub>/ K9 滤光片的典型热像图如图 4 所示。不同激光功率下温升随时间的变化曲线如图 5 所示。从图中可以看出,当激光辐照滤光片引起温升大于 90 时,温度出现突变,表明温升已使干涉滤光片性能发生改变,并意味着干涉滤光片膜层损伤的开始。



Fig. 4 Typical thermal plot recorded by IR thermograph  
图 4 红外热像仪记录的典型热像图

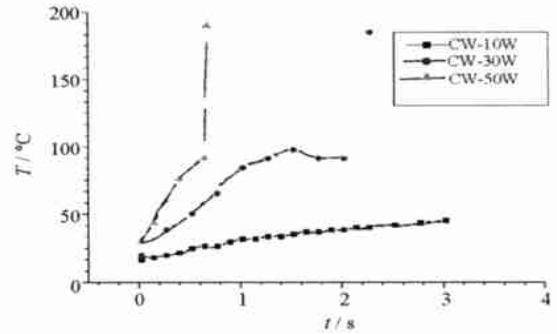


Fig. 5 Temperature rise of the ZnSe/ MgF<sub>2</sub>/ k9 filter irradiated by the 1.06μm CW laser vs time

图 5 1.06μm 连续激光辐照 ZnSe/ MgF<sub>2</sub>/ K9 滤光片温升随时间的变化

在激光辐照功率 30W 条件下,图 6 给出用红外热像仪测量的 1.06μm 连续激光辐照 ZnSe/ MgF<sub>2</sub>/ K9 滤光片,不同时间对应温度的截面分布。从图中可以看出,在激光辐照时间 2.4s,对应热像图(a),薄膜温升达到最大,并出现膜层温度的饱和现象。当激光辐照时间继续增加到 2.52s,对应热像图(b),滤光片的 ZnSe/ MgF<sub>2</sub> 膜层温升达到最大,然后很快下降又上升。由以上结果断定 ZnSe/ MgF<sub>2</sub> 膜层破坏的温度大约为 90 ,相应所需要的辐照时间为 2.52s。ZnSe/ MgF<sub>2</sub>/ K9 滤光片温升突变可能与薄膜中包含的杂质有关,薄膜中杂质吸收射激光能量往往是薄膜破坏的最初起因。

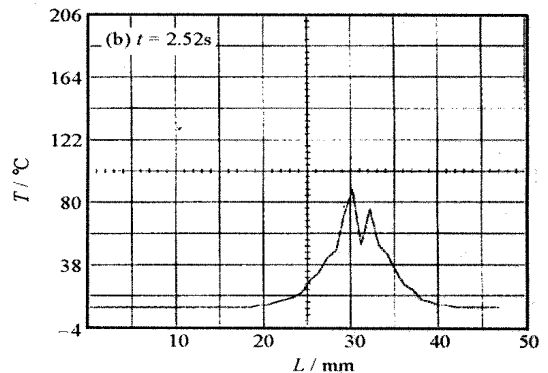
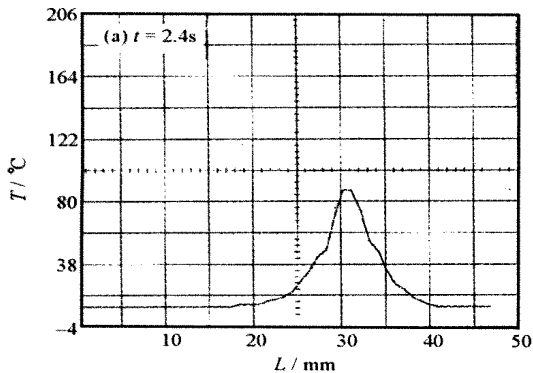


Fig. 6 Temperature rise's variation of the ZnSe/ MgF<sub>2</sub>/ k9 filter irradiated by laser at different time

图 6 不同时间 ZnSe/ MgF<sub>2</sub>/ K9 滤光片温升的截面分布(30W)

在激光功率 30W、光斑直径 0.75mm 和辐照时间 10s 的条件下,用 1.06μm 连续激光辐照 ZnSe/ MgF<sub>2</sub>/ K9 滤光片后,通过光学显微镜观察干涉滤光片表面,发现薄膜有明显的龟裂现象。图 7 给出激光辐照滤光片后用光学显微镜拍摄到的薄膜龟裂形貌。从图 7(a)可以看出,滤光片薄膜损伤区内存在着大量的气泡,中心处气泡排列密集,而边缘处气泡分布相对稀少。从图 7(b)发现滤光片损伤区内的薄膜表面有明显的裂纹存在,说明薄膜材料的热稳定性差,激光辐照薄膜产生的热应力达到一定程度时,就会导致薄膜层发生龟裂,而此时薄膜本身的温升并没有达到熔化温度。

### 3 讨论和初步结论

采用泵浦激光与探测激光波长相互分开的方法,利用 1.06μm 连续激光作为泵浦光辐照 ZnSe/ MgF<sub>2</sub>/ K9 滤光片,研究了 He-Ne 激光通过 ZnSe/ MgF<sub>2</sub>/ K9 滤光片后透射特性和温升的变化。研究结果表明,干涉滤光

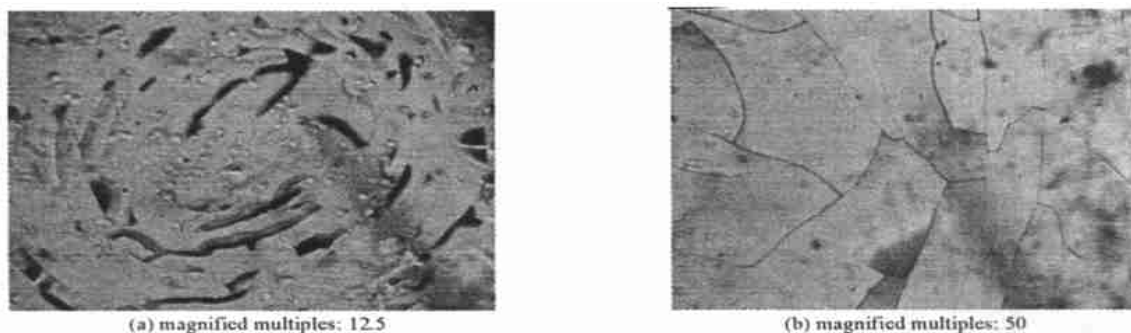


Fig. 7 Typical appearance of ZnSe/MgF<sub>2</sub>/K9 filter irradiated by laser

图 7 激光辐照 ZnSe/MgF<sub>2</sub>/K9 滤光片形成薄膜龟裂的典型形貌。(a) 放大倍数 12.5, (b) 放大倍数 50

片薄膜层吸收入射激光能量,引起薄膜升温,造成薄膜折射率和膜层光学厚度的改变,使干涉滤光片的透射光谱曲线偏离中心波长。明显的特征是,在泵浦激光辐照 ZnSe/MgF<sub>2</sub>/K9 滤光片的条件下,探测光通过干涉滤光片后的透射光强呈现明显的热致非线性变化。

在低泵浦激光功率条件下,连续激光对 ZnSe/MgF<sub>2</sub>/K9 滤光片的透射性能影响是可恢复的,造成干涉滤光片透射性能改变的恢复时间与泵浦光的功率密度有关。通过监测激光辐照干涉滤光片温升随时间的变化,以及不同时间温升的截面分布,可观察到干涉滤光片膜层随温升的变化。当泵浦光功率密度超过这一范围时,连续激光辐照会引起 ZnSe/MgF<sub>2</sub>/K9 滤光片的薄膜损伤,甚至造成膜层龟裂,导致干涉滤光片透射功能的永久失效。此研究结果为干涉滤光片的透射特性改进提供了实验依据。

#### 参考文献:

- [1] Shanbhogue H G, Nagendra C L, Annapurna M N, et al. Multilayer antireflection coatings for the visible and near infrared regions[J]. *Appl Opt*, 1997, **36**(25):6339—6351.
- [2] Hawkins J, Hunnemann R. Design and fabrication of infrared filter for remote sensing instrumentation[A]. *Proc SPIE[C]*. 1994, **2210**:639—651.
- [3] [法]弗朗松 M, 徐森禄. 光学滤光片[M]. 北京:科学出版社, 1986. (Longsong M, Xu S L. Optical filter. Beijing: Science Press, 1986)
- [4] Fan Z X, Zhao Q, Qi H, et al. Laser induced in optical materials[A]. *Proc SPIE[C]*. 1997, (3244):469—474.
- [5] 孙承纬, 陆启生, 范正修, 等. 激光辐照效应[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. (Sun C W, Lu Q S, Fan Z X, et al. Effects of laser irradiation. Beijing: National Defense Industry Press, 2002)
- [6] 袁永华, 刘颂豪, 孙承纬, 等. Q 开关 Nd:YAG 脉冲激光对红外滤光片的损伤效应[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(5):677—680. (Yuan Y H, Liu S H, Sun C W, et al. Damage effects of Q-switched Nd:YAG laser beam on IR filter. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(5):677—680)
- [7] 殷庆瑞, 王 通, 钱梦绿. 光声光热技术及其应用[M]. 北京:科学出版社, 1999. (Yin Q R, Wang T, Qian M L. The photoacoustic and photothermal Technology and application. Beijing: Science Press, 1999)
- [8] 郑 权, 唐晋发. 应用光学薄膜[M]. 北京:国防工业出版社, 1984. (Zheng Q, Tang J F. Applied optical film. Beijing: National Defense Industry Press, 1984)
- [9] Smith S D, Mathew J G H, Hendry A, et al. Room temperature visible wavelength optical bistability in ZnSe interference filters[J]. *Optics Communications*, 1984, **51**(5):357—362.

### CW laser-induced transmission change in ZnSe/MgF<sub>2</sub>/K9 filter

YUAN Yong-hua<sup>1,2</sup>, LIU Song-hao<sup>1</sup>, SUN Cheng-wei<sup>2</sup>, FAN Zheng-xiu<sup>3</sup>, LIAO Chang-jun<sup>1</sup>, ZHAO Yuan-an<sup>3</sup>

(1. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Quantum Electronics, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;

3. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** The transmission change of ZnSe/MgF<sub>2</sub>/K9 filter induced by CW laser (1.06μm) is analyzed in this paper. At room temperature, the change of the film's refractive index induced by heating is measured with the detecting laser beam (0.6328μm). As a result of this change, the filter's transmission varies nonlinearly. When laser beam of different power with the spot diameter 0.75mm irradiated on the ZnSe/MgF<sub>2</sub>/K9 filter, temperature change responding to irradiation time is measured. Typical experiment results are as follows: The film temperature damage threshold is 90 with laser power 30W and irradiation time 2.52s, checked surface of the film is formed with irradiation time 10s.

**Key words:** CW laser; Interference filter; Refractive index; Transmission; Film damage