

# 红外滤光片激光损伤的研究

周东平 范正修 刘立明 庄大奎 刘华

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

**提要** 介绍了利用  $1.06 \mu\text{m}$  准连续 YAG 激光对红外滤光片进行损伤的实验, 从薄膜热物性的角度确定红外滤光片的损伤阈值, 通过对红外滤光片的损伤过程的研究, 初步提出红外滤光片的损伤机理。

**关键词** 红外滤光片, 光热偏转, 激光损伤

## 1 引言

红外滤光片主要用于红外探测系统, 本文研究的是用于卫星空间探测的系统。由于卫星的工作环境恶劣及激光反卫星系统的建立, 有必要对红外滤光片的损伤进行研究。红外滤光片的薄膜对  $1.06 \mu\text{m}$  激光有较大的吸收, 滤光片的损伤主要是薄膜的损伤。对损伤的研究有很多方法, 这里利用光热偏转技术实时研究<sup>[1]</sup>, 有利于观察损伤过程, 初步地提出了红外滤光膜的损伤机理。

## 2 实验

### 2.1 原理

受调制的泵浦光入射到红外滤光片时, 由于薄膜材料的吸收, 使样品受热发生周期形变, 利用另一测量光入射到形变部分, 可以探测到形变信号。在调制频率较低时, 红外材料有较大的吸收, 热扩散长度较长, 一般样品为热薄试样, 此时, 光热信号<sup>[2]</sup>为

$$\Phi \propto \beta l \alpha_m P (1 - R_0)$$

式中  $\beta$  为薄膜的吸收系数,  $l$  为样品厚度,  $\alpha_m$  为样品热扩散系数,  $P$  为样品表面泵浦光的入射能量,  $R_0$  为样品表面反射率。可见光热信号中包含了薄膜的热物性的信息, 由于泵浦光的作用引起薄膜的结构及性能发生变化, 光热信号也随着变化。当观察到光热信号发生不可逆的变化时, 薄膜的热性能也发生不可逆转的变化, 薄膜已经发生了损伤, 由此可以确定薄膜的损伤阈值。

### 2.2 实验装置

实验装置如图 1 所示。准连续脉冲 YAG 激光器作为泵浦光源, 输出脉宽为  $100 \text{ ps}$ , 脉冲间隔为  $12 \text{ ns}$ , 功率  $0 \sim 10 \text{ W}$  可调, 工作波长为  $1.06 \mu\text{m}$ , 经聚焦后照射在样品表面。利用 He-Ne

探测光及像限探测器来检测光热形变,探测器前加光阑可消除杂散光的影响。对于微弱的光热信号用锁相器进行相关检测,当泵浦光能量高于损伤阈值时,由于信号较大,可在示波器上直接观察并用高锭数底片进行拍摄记录。

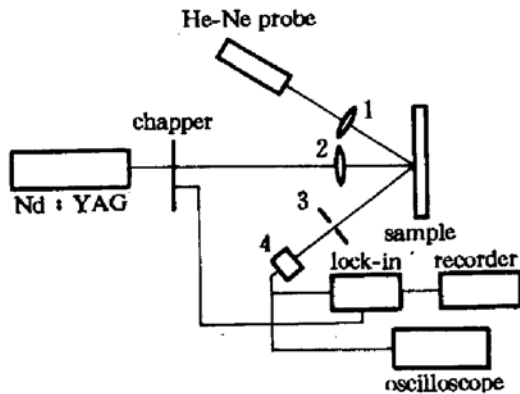


Fig. 1 Experimental setup for PDT measurement

1, 2: lens; 3: stop; 4: guardant detector

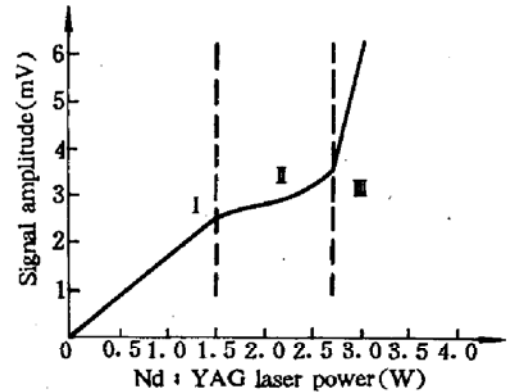


Fig. 2 Curve of PDT signals vs pump power in damage study of infrared filter

I: linear region; II: nonlinem region;

III: inconvertible damage region

### 2.3 实验结果

对红外薄膜损伤采用 n-on-1 方式,得到了样品的损伤阈值。样品由 Si 基底 Ge 和 ZnS 或 SiO 构成膜系。由于红外材料在  $1.06 \mu\text{m}$  有较大的吸收,在薄膜接近损伤及损伤后,光热信号很大,可以在示波器上清楚地观察到这些信号的波形。在实验中通过改变泵浦光的功率得到了光热信号随功率变化的曲线如图 2 所示,从而由光热信号的跃变确定了滤光片的损伤阈值为  $2.81 \text{ J/cm}^2$ 。采用稍低于损伤阈值的激光功率对该红外滤光片进行损伤过程的研究,把锁相器的信号用记录仪记下得到如图 5 所示的曲线。

## 3 实验结果分析

薄膜损伤机理有很多种不同的理论,如雪崩离化、多电子电离、雪崩离化结合多电子电离以及杂质缺陷的破坏。红外滤光片由于材料的吸收较大,其损伤主要是由杂质、膜层及层间吸收引起的。从图 2 曲线中可以看到该曲线可分三个区域。在区域 I 内泵浦光能量远低于阈值,光热信号基本上随能量的增加而成线性增加,说明此时薄膜形变与能量成线性关系,薄膜的吸收与能量成线性关系。在图 3 中,当泵浦能量在区域 I 时,对试样进行损伤实验,正反行程光热信号基本上相同,说明在区域 I 内,光热信号是可逆的。在这区域内对不同材料的红外多层膜(Si 基底 Ge 和 ZnS、Si 基底 Ge 和 SiO)进行实验,发现光热信号的曲线的斜率不同,与各自的吸收和热扩散系数有关,而与泵浦能量无关,如图 4 所示。说明在此区域里膜的热性能与能量没有关系,这时薄膜没有发生损伤。在区域 II 内,泵浦能量增加,光热信号变化不大,趋向平缓状态,出现了拐点。实验中,发现光热信号还是可逆的。这时信号随能量的变化,说明薄膜的热变形随能量的增加变化不明显,膜的热性能及结构开始变化,即膜的热性能与泵浦能量发生了关系,表现为光热信号由区域 I 的线性上升变成区域 II 的信号的非线性变化,但这种变化是可逆的,说明这时薄膜处于破坏的边缘。研究这个区域内的薄膜热性能的变化行为,对认识薄膜的损伤过程、确定损伤阈值及了解损伤的机理很有意义。在区域 III 内泵浦能量继续增大,光热信号发生很陡的跃变。这时薄膜的热性能发生显著的变化,使薄膜损伤破裂、剥落或烧蚀,这

时光热信号是不可逆的。这样我们可以从图 2 得到薄膜损伤的阈值。

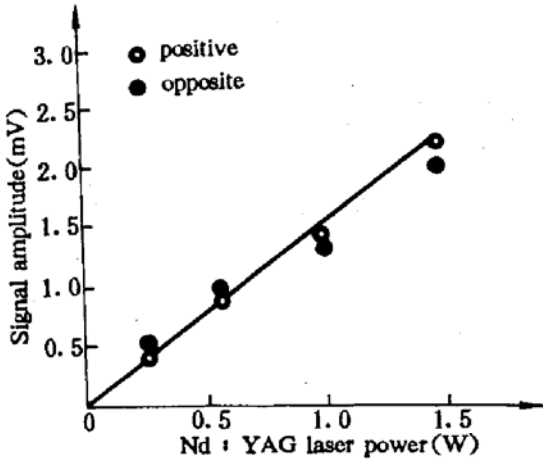


Fig. 3 PTD signals in region I of Fig. 2

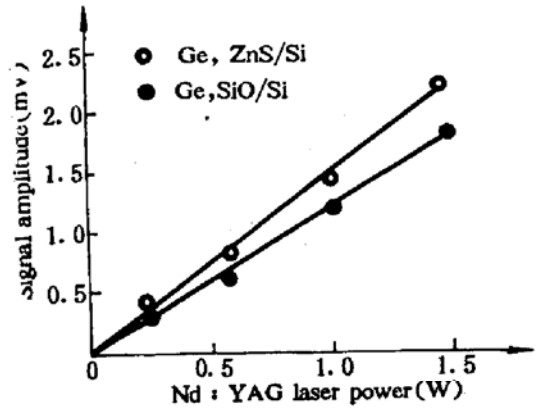


Fig. 4 PTD signals of different infrared filters in region I of Fig. 2

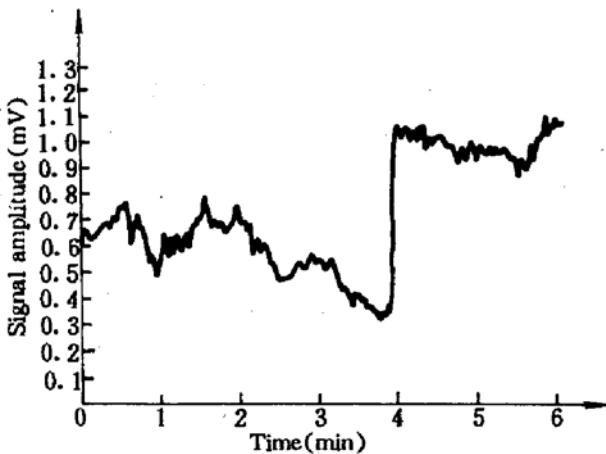


Fig. 5 PTD signals of infrared filter vs time showing the onset of the cumulative damage

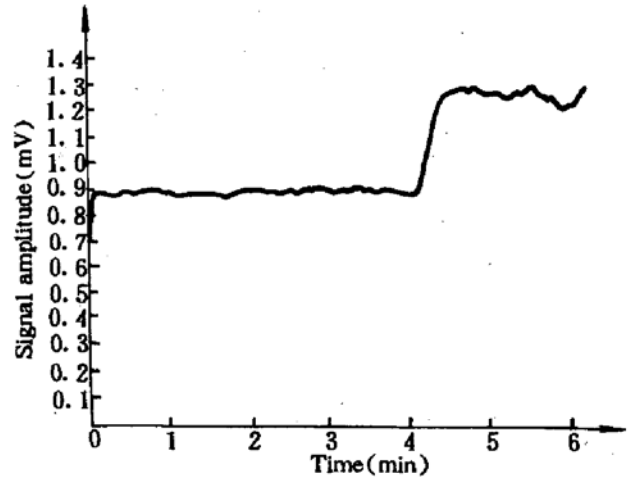


Fig. 6 PTD signals of Al coating vs radiation time, showing the onset of the cumulative damage

在重复频率激光的作用下,红外滤光膜的损伤有一定的累积作用。这种累积效应在重复频率很高时,主要表现为热的累积。我们用光热偏转技术实时研究重复频率激光损伤的累积效应,结果如图 5 所示。在使用稍低于损伤阈值的某一功率(图 2 中区域 II 内的功率)时,从图 5 曲线可以发现,随着时间的变化,光热信号发生波动有不少尖峰,到一定时间以后,信号发生了跃变,而跃变后信号发生波动变化很小。从实验中可观察到信号发生跃变的时间随泵浦光的功率的增大而缩短。由于红外材料的吸收较大,薄膜中存在缺陷,而且一般吸收都较材料大,滤光膜一般是由多层高低折射材料周期构成,层间都有很大的吸收,所以我们可以发现光热信号上升很快,达到一个峰值,马上开始下降,我们认为这时薄膜内部杂质和膜层间吸收最多的膜层的结构及热性能可能首先发生了变化<sup>[3]</sup>,使该层局部发生损伤(烧蚀、熔化、剥落),光热信号出现一个波谷。随着热量的累积,使光热信号又会上升,出现第二个波峰,这时薄膜某些层可能发生损伤(熔化),光热信号逐步下降,又出现一个波谷,已损伤的膜层全部熔化。这样光热信号在波动中趋于下降,一段时间后信号达到最小点,说明膜层形变最小,在探测点薄膜可能基本熔化。这时光热信号发生陡峭突变,膜层全部烧蚀,信号趋于平稳。由于泵浦光的光斑很小,烧蚀

处面积很小,而探测光的光斑较大,所以在烧蚀处的信号反而增大。实验中我们与铝膜重复频率激光损伤过程的曲线如图 6 所示进行比较,发现铝膜的损伤曲线很平稳,损伤前没有出现波峰,这与红外膜具有明显的差异。这是因为铝膜的吸收很大,而且单层膜不存在膜层间的吸收,信号在开始时,很快上升达到饱和,膜层的形变达到最大,不存在膜内的局部损伤,信号没出现波峰。这说明红外滤光膜是由于杂质及膜层间的吸收引起局部损伤从而导致整个膜的损伤。

### 参 考 文 献

- 1 M. A. Olmstead, N. M. Amet, S. Kohn. Photothermal displacement spectroscopy; an optical probe for solids and surfaces. *Appl. Phys. A*, 1983, 6(2): 141
- 2 吴周令, 范正修. 膜系结构对激光损伤阈值的影响. *光学学报*, 1989, 9(9): 830
- 3 范正修, 苏 星, 吴周令. 光学薄膜的光热偏转信号分析. *光学学报*, 1991, 11(2): 166

## Study on Laser-induced Damage of Infrared Filter

Zhou Dongping Fan Zhengxiu Liu Liming Zhuang Dakui Liu Hua

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

**Abstract** In this paper, experiments of laser-induced damage of infrared filters by quasi-convergence wave Nd: YAG laser were presented. Damage threshold was determined in the light of thermal performance of thin film. Damage mechanism was preliminarily put forward by studying the damage process of the infrared filters induced by lasers.

**Key words** infrared filter, photothermal deformation, laser-induced damage

\*\*\*\*\*

## 《国外激光》从 1995 年起更名为《激光与光电子学进展》

经国家科委国科[1994]117 号文件批准,《国外激光》从 1995 年第 1 期起更名为《激光与光电子学进展》。欢迎新老订户订阅,不要漏订。更名后的刊物,办刊宗旨不变,在刊登国外信息的同时,更注重刊登国内的学术与技术性文章,欢迎专家教授踊跃投稿。

《国外激光》创刊 30 周年来,深受国内同行关注和好评,在国内享有良好信誉并拥有众多读者,它为我国激光事业的兴起和发展作出了突出贡献。为了适应新的形势,更好地为广大读者服务,经编委会多次讨论,决定更名。现采纳多位专家教授的意见和建议,将《国外激光》更名为《激光与光电子学进展》。我们努力将原有栏目办得更好,还将新设光电子领域等栏目,以满足社会各层次专家和读者的需要。更名后的刊物既有学术、技术专业性强最新的进展报道,又有国内外最新科技发展动态报道;既有科学实验技术,又有工艺产品信息,同时注重光电医学、工程技术实施。只要您拥有本刊,便会知道当今光电子学的发展动态,受益匪浅,它将帮助您事业有更大发展。