文章编号:1001-5078(2018)08-0978-07

·激光应用技术·

# 毫秒激光辐照光学元件的多杂质损伤模型

王 斌1,邓 超1,江修娥1,潘云香2,莫绪涛1

(1. 安徽工业大学数理科学与工程学院,安徽 马鞍山 243032;2. 南京理工大学理学院,江苏 南京 210094)

摘 要:建立了毫秒长脉冲激光辐射透明光学元件的多杂质加热模型,对涂有 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>增透 薄膜的 K9 玻璃光学元件在毫秒激光辐照下的温度场和热应力场进行了数值模拟,分析了温 度场和应力场分布的发展历程。结果表明在毫秒激光作用下,多个微小杂质团簇作为吸收热 源能够导致毁灭性的损伤,且损伤同时出现在元件的前后表面,前表面为温度与应力效应共同 作用,后表面为应力效应主导。数值模拟结果与实验损伤形貌观察结果吻合较好。

关键词:长脉冲;激光损伤;温度场;应力场;多杂质

中图分类号:0437;TN249 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2018.08.007

# Multi-inclusion model of optical components damaged by millisecond laser irradiation

WANG Bin<sup>1</sup>, DENG Chao<sup>1</sup>, JIANG Xiu-e<sup>1</sup>, PAN Yun-xiang<sup>2</sup>, MO Xu-tao<sup>1</sup>

 $(1.\ School\ of\ Mathematics\ and\ Physics\ , Anhui\ University\ of\ Technology\ , Maanshan\ 243032\ , China\ ;$ 

2. School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A multiple inclusion model of transparent optical components irradiated by millisecond long pulse laser was established. The temperature and stress field distribution and process of a K9 based component coated with  $\mathrm{SiO}_2/\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$  anti-reflection films irradiated by millisecond laser were numerical calculated and analyzed. The results show that multiple micro-inclusions can serve as heating source which induce devastating damages under the action of a millisecond laser. The damage happens both from front and back surfaces. The front surface damage is caused by heat and stress while the back surface damage is dominant by stress. The damage morphologies indicated by numerical results meet well with the experimental morphologies observed.

Key words: long pulse; laser damage; temperature field; stress field; multi-inclusion

#### 1 引 言

随着高功率激光器输出能量密度的不断提高, 光学元件的抗损伤能力成为提高激光器输出能量密 度的制约因素。20世纪70年代以来,很多学者致 力于激光诱导透明光学元件损伤的研究,发现通过 实验测试材料的损伤阈值常低于理论阈值<sup>[1]</sup>。为 此,人们提出了多个模型来解释这种现象,这些模型 包括加热杂质模型<sup>[2]</sup>、色心模型<sup>[3-4]</sup>,热电子碰撞电 离模型<sup>[5]</sup>和多光子电离模型<sup>[3]</sup>等。其中,加热杂质 模型是解释材料损伤的典型模型,它最初由 Hopper 提出,用于解释光学玻璃激光损伤<sup>[6]</sup>。后来,加热 杂质模型较多地应用于薄膜激光损伤的解释<sup>[7-8]</sup>。

**基金项目:**安徽省自然科学基金青年项目(No. 1708085QF145);安徽省省级 SRTP 项目(No. 201710360348);国家自然科 学基金青年项目(No. 11504003)资助。

作者简介:王 斌(1985-),男,博士,讲师,主要从事高能激光与物质相互作用机理及测试方面的研究。E-mail:wangbin\_ njust@163.com

收稿日期:2017-11-30;修订日期:2018-01-04

该模型假设材料中存在一定密度的杂质。其主要原 因是:这些杂质的吸收系数大,在脉冲激光的照射下 迅速升温,使周围的温度瞬间高于熔点或沸点,这样 就在杂质周围形成高温微腔,且该微腔的范围在热 传导作用下不断扩大;另外,材料内部温度的不均匀 分布使材料发生不同程度的热膨胀,不可避免有某 些部分材料的膨胀受到阻碍从而产生热应力<sup>[9]</sup>。 当材料中温度大于熔点或应力超过拉伸/压缩强度 时,材料就发生破坏<sup>[10]</sup>。因此,在激光损伤光学元 件的过程中热吸收温度和应力效应是激光损伤材料 的主要机制<sup>[11]</sup>。

由于材料内部杂质的形状、大小各异,为了对损 伤形貌、损伤机理进行深入地理解,人们研究了包含 已知性质的加热杂质模型,如在研究薄膜损伤和玻 璃损伤时假设杂质的形状为球形<sup>[12]</sup>或圆柱形<sup>[7]</sup>;杂 质的材质为金属或非金属(陶瓷杂质)<sup>[6]</sup>;杂质尺寸 对损伤的影响<sup>[13]</sup>等。

有关激光损伤光学元件方面已经有了较多的研究,但大多研究主要集中在高功率短脉冲激光损伤方面,结果表明其损伤主要在浅表面极小范围,损伤范围为微米量级,损伤形貌近似为点状<sup>[14-16]</sup>。有关短脉冲激光的损伤机理多利用前文所述加热杂质模型进行解释。然而随着激光技术的发展,脉宽为毫秒量级的长脉冲激光越来越广泛地应用于激光加工领域,其对光学元件损伤形貌和损伤大小为毫米量级,损伤形貌近似为锥形<sup>[10,12]</sup>。此时用于解释短脉冲激光的单个杂质加热模型无法获得与实验现象吻合的理想结果,由于长脉冲激光的热影响范围远大于短脉冲激光,必须考虑到光学元件内部相邻多个杂质之间的相互热传递及产生的热团簇效应。

本文建立了毫秒激光辐射下的多杂质加热模型,利用有限元法计算了涂有 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>增透薄膜的 K9 玻璃光学元件在毫秒激光辐照下的温度场和 热应力场,研究其温度场和应力场分布的发展历程, 理论上分析毫秒激光的损伤效果,进而与实验损伤 形貌进行比较。数值模拟温度分布与应力分布云图 显示结果与实验损伤形貌吻合较好。

#### 2 模型建立及理论分析

激光与光学材料相互作用的过程中,光学材料 中的杂质等缺陷能够引起局部和周围区域快速升 温,并随之产生热应力。因此,杂质使光学材料变得 更容易破坏。在激光损伤光学材料的过程中,温度 场效应和热应力起到很大的作用。

为了计算激光与 K9 玻璃光学元件相互作用产 生的温度场和应力场,建立了如图 1 所示的模型。 模型由 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>增透薄膜、K9 玻璃基底和 Pt 杂 质组成。薄膜厚度为 1  $\mu$ m,玻璃尺寸为 1 mm × 1.8 mm。模型假设 K9 玻璃基底中均匀分布着 Pt 杂质, 且 Pt 杂质的形状为圆柱形,底面直径和高均为 *a* = 15 nm,杂质之间相距为 *d* = 50  $\mu$ m。图 1 给出的是 二维剖面图,在该图中,圆柱形杂质为边长为*a* 的正 方形。激光经透镜聚焦于模型上表面,持续时间为 1 mm。模型中设置透镜口径为 40 mm,焦距为 100 mm,激光经透镜聚焦后的发散角近似为  $\theta = 2$ arctan  $\frac{2}{10} \approx 22.62$  rad,因而模型中光束半径可近似 为  $R_0 = r_0 - 0.2y(y < 0), r_0$ 为透镜焦平面上的光斑 半径,大小为 200  $\mu$ m。



Fig. 1 General View of the model

薄膜、基底以及缺陷对激光能量的吸收可表示为<sup>[17]</sup>:

$$C_{i}\rho_{i}\frac{\partial}{\partial t}T(x,y,t) - k_{i}\nabla^{2}T(x,y,t) = Q_{i}(x,y,t)$$
(1)

$$-k_1 \frac{\partial}{\partial x} T_1(x, y, t) \Big|_{x=\pm R} = -k_2 \frac{\partial}{\partial x} T_2(x, y, t) \Big|_{x=\pm R}$$

$$= -k_2 \frac{\partial}{\partial y} T_2(x, y, t) \Big|_{y=H} = 0$$
<sup>(2)</sup>

$$T(x, y, 0) = T_0 \tag{3}$$

式(2)和(3)分别为边界条件和初始条件,T(x, y,t)为t时刻(x,y)处的温度; $C_i$ 、 $\rho_i$ 、 $k_i$ 分别为比热 容、密度和热导率。下标i取1、2和3,分别代表薄 膜、基底和缺陷; $T_0$  = 293.15 K 为环境温度; $Q_i(x, y,t)$ 为热源,薄膜和基底的热源可表示为:

$$Q_i(x, y, t) = \alpha_i |E(y)|^2 n_i I_{\text{laser}} \quad (i = 1, 2) \quad (4)$$
杂质的热源可表示为:

$$Q_{3}(x,y,t) = \alpha_{3} |E(y)|^{2} n_{3} I_{\text{laser}} \times \exp\{-\alpha_{3} [a - (h + y)]\}$$
(5)

式中,  $\alpha_i$  为材料的吸收系数; E(y) 为材料中的电场 强度分布, 可由麦克斯韦方程组和薄膜特征矩阵得 到;  $n_i$  为材料的折射率; h 为杂质距样品上表面的距 离, 其大小与杂质的位置有关;  $I_{laser}$  为激光入射功率 密度, 可表示为:

$$I_{\text{laser}} = I_0 f(x) g(t) \tag{6}$$

其中, $I_0$ 为峰值功率密度;f(x)和g(t)分别为激光脉 冲的空间和时间分布,且:

$$f(x) = \exp\left(-\frac{2x^2}{R_0^2}\right) \tag{7}$$

$$g(t) = \begin{cases} 1, 0 < t < \tau \\ 0, t > \tau \end{cases}$$
(8)

式中, R<sub>0</sub>为光束半径; 7为脉冲宽度。

材料吸收激光能量后温度升高,由于 Pt 杂质的 吸收系数远大于玻璃基底以及激光光束的空间分布 不均匀,材料内部各个部分的温升不同,从而产生热 应力。温度变化产生的应力、应变则用热弹性力学 的原理计算。热弹性方程可表示为<sup>[18]</sup>:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} = 0$$
(9)

$$\frac{\partial \sigma_{y}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} = 0$$
(10)

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} = 0$$
(11)

基本关系式可表示为:

$$\sigma_x = \frac{E}{1+\mu} \left( \frac{\mu}{1-2\mu} e + \varepsilon_x \right) \tag{12}$$

$$\sigma_{y} = \frac{E}{1+\mu} \left( \frac{\mu}{1-2\mu} e + \varepsilon_{y} \right)$$
(13)

$$\sigma_z = \frac{E}{1+\mu} \left( \frac{\mu}{1-2\mu} e + \varepsilon_z \right) \tag{14}$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \frac{E}{2(1+\mu)}\varepsilon_{xy}$$
(15)

$$\sigma_{yz} = \sigma_{zy} = \frac{E}{2(1+\mu)}\varepsilon_{zy}$$
(16)

$$\sigma_{zx} = \sigma_{xz} = \frac{E}{2(1+\mu)}\varepsilon_{zx}$$
(17)

几何变形关系可表示为:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \beta (T - T_0)$$
(18)

$$\varepsilon_{y} = \frac{\partial u_{y}}{\partial y} + \beta (T - T_{0})$$
(19)

$$\varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} + \beta (T - T_0) \tag{20}$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}$$
(21)

$$\varepsilon_{yz} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}$$
(22)

$$\varepsilon_{zx} = \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z}$$
(23)

其中,  $e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ ,  $e = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)(1 - 2\mu)/E$ ,  $E_{,\mu}$  和 $\beta$ 分别为杨氏模量、泊松比和线性膨胀系数;  $\varepsilon_{,\sigma}$  和u分别为应变、应力和位移; 下标x、 $y_{,z}$ 分别代表三个方向上的应力和应变;  $xy_{,yz}$ , zx分别代表不同方向上的剪应力和剪应变。

忽略杂质对光场的调制,采用有限元法计算薄 膜和 K9 玻璃中的温度和应力场分布,计算所需参 数在表1中给出<sup>[10]</sup>。

# 表1 计算所需参数值

Tab. 1 Parameters used in the simulation

材料	К9	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Pt
熔点/K	1673	2313	1973	2041
拉伸强度/MPa	28	255	110	
压缩强度/MPa	650	2945	1500	
折射率	1. 52	1.61	1.465	3.7
吸收系数/m <sup>-1</sup>	1. 181	1181	141. 726	$7 \times 10^7$
比热容/(J・kg <sup>-1</sup> ・K <sup>-1</sup> )	868	880	841	132.6
热导率/(W・m <sup>-1</sup> ・K <sup>-1</sup> )	1.5	35	1.19	71.6
杨氏模量/GPa	81	375	87	168
泊松比	0. 208	0. 22	0.16	0. 38
线性膨胀系数/K-1	7. 1 × 10 <sup>-6</sup>	8. 4 × 10 <sup>-6</sup>	0. 5 × 10 <sup>-6</sup>	8.8×10 <sup>-6</sup>
密度/(kg・m <sup>-3</sup> )	2510	2500	2500	21450

# 3 计算结果和讨论

3.1 温度场和应力场的分布

图 2 为作用于光学元件的激光能量为 21 J 时

的温度场分布图,(a)~(d)分别对应于t = 0.1 ms、 0.3 ms, 0.7 ms, 1.0 ms 时刻, 图中标出了 T = 293. 15 ~ 638. 15 K 638. 15 ~ 983. 15 K 983. 15 ~ 1328.15 K、1328.15~1673.15 K 区域。在激光作用 时间内,温度随作用时间的增长而增大,这些区域的 形状近似为锥形,这与光束在元件中的分布有关。 K9 玻璃的熔融温度为 1673 K,从图中可以看出靠 近薄膜部分的 K9 玻璃基底温度达到了熔点,这主 要有两方面的原因,一方面,该部分靠近激光光束焦 平面,能量密度较其他各处大,吸收的热量更多,温 度上升的幅度也就更大;另一方面,薄膜对激光的吸 收强度大于玻璃,薄膜内的温升更大,薄膜通过热传 导加热玻璃,致使靠近薄膜部分的玻璃温度进一步 上升。此外,由于 Pt 缺陷的吸收系数达到  $7 \times 10^7$  $m^{-1}$ ,在激光作用过程中,这些缺陷大量地吸收激光 能量使自身温度迅速上升,并通过热传导的作用在 其周围形成高温"微腔"。





Fig. 2 Temperature field distribution

温度的升高使材料内部产生不均匀膨胀,进而产 生压缩应力和拉伸应力。图 3 为相同能量密度下,样 品内部 x 向热应力分布图,图中负值代表压应力,正值 代表拉应力。激光照射过程中,K9 玻璃与激光作用部 分因温度升高而引发热膨胀。以 Pt 杂质为中心形成 的高温微腔由于温升幅度高于周围玻璃,热膨胀受到 周围的限制,从而在微腔内形成压缩应力。在 Pt 杂质 周围直径约为1  $\mu$ m 的范围内,压缩应力大于 K9 玻璃 的压缩强度  $\sigma_c$  = 650 MPa,玻璃会产生微小破损。微腔 周围外部则相应形成拉伸应力,当拉伸应力值大于玻 璃拉伸强度  $\sigma_r$  = 28 MPa 时,就会产生裂纹。

图 3 中分别标出了拉伸应力为 28 MPa 和 56 MPa 的等值线。从图中可以看出,在缺陷间隔处 形成一个个拉伸应力大于拉伸强度的小区域,这 些小区域最先遭到破坏。值得注意的是,在图 3 的(b)-(d)中,基底的下表面有一部分的应力值 超过28 MPa,也就是说这部分将会遭到破坏。



Fig. 3 Stress distribution alongx direction

从以上数值模拟的温度与应力分布云图中可 以看出,该光学元件在毫秒长脉冲激光辐照下,不 仅前表面将出现损伤,后表面也将出现损伤。前 表面的损伤由于温度和应力的共同作用导致,后 面主要由于应力所致。

3.2 分析与讨论

激光与样品作用过程中,由于杂质对激光能量的吸收能力很强,杂质的温度瞬间上升到很高的温度,高温的杂质相当于一个热源,通过热传导的作用加热周围区域。在激光作用期间热扩散距离可以表示为 $L_{D}(t) = 2 \sqrt{D\tau}$ ,其中 $D = k_2/(\rho_2 C_2)$ 。若作用激光为纳秒量级短脉冲激光,取 $\tau = 10 \text{ ns}, L_{D,s}(t) \approx 166 \text{ nm};若作用激光为毫秒量级长脉冲激光,取<math>\tau = 1 \text{ ms}, L_{D,l}(t) \approx 52.5 \mu\text{m}$ 。

杂质周围形成的微腔的平均温升可表示为<sup>[9]</sup>:

$$F = \frac{\sigma_{abs}m(1 - R)(a + L_D(t))F}{\rho_2 C_2 V(t)a}$$
(24)

其中,  $\sigma_{abs}$  为杂质的吸收截面, 可表示为  $\pi a^2$ ;  $V(t) = \frac{4}{3}\pi (a + L_p(t))^3$  为微腔的体积; F 为能量 密度。对于短脉冲激光, 正常使用范围内取能量 为 100 mJ, 光束半径为 200 µm, 激光持续时间为 10 ns, 则 $\bar{T} \approx 1.25 \times 10^5$  K, 对于长脉冲激光, 正常 使用范围内取能量 21 J, 光束半径为 200 µm, 激光 持续时间为1 ms, 由于  $L_{p,l}(t) > > a$ , 有  $L_{p,l}(t) + a$  $\approx L_{p,l}(t)$ ,  $V(t) \approx \frac{4}{3}\pi L_{p,l}(t)^3$ , 则 $\bar{T} \approx 313$  K。

由此可以看出,对于纳秒激光,只有杂质附 近的区域受到影响,并且微腔的温度达到 10<sup>5</sup> K 量级,说明该部分已经熔融气化甚至可能产生等 离子体;而对于毫秒激光则完全不同,由于毫秒 激光的持续时间长,杂质周围很大一片区域的温 度都将受到影响。这也是对于毫秒激光损伤机 理探讨需要引入多杂质模型的原因,且我们发 现,虽然长脉冲激光热影响范围大,但由于热扩 散效应,杂质团簇周围的总体温升小,因此不易 产生熔融损伤,应力损伤成为长脉冲激光损伤不 可忽略的一个因素。

#### 4 实验损伤形貌特征

本课题组进行了相关的毫秒长脉冲激光损伤实

983

验。实验装置如图 4 所示,所用为一 Nd<sup>3+</sup>:YAG 毫 秒级脉冲可调脉冲激光器,波长 1064 nm。实验中 调节并固定脉冲宽度为 1 ms。激光器发出的光束 经过分光器后被分成两束,一束经透镜聚焦到样品 表面,一束到达能量计进行测量。被辐照样品为 K9 玻璃基底上镀 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>抗反射膜层的光学元件, 元件结构及厚度尺寸与图 1 所示一致。



图 4 激光损伤实验装置 Fig. 4 Experiment setup of laser induced damage

图 5 为实验获得的损伤形貌照片。从这些损伤 照片可以看出,损伤形貌近似为锥形,且下表面也有 不同程度的损伤。这一损伤特征区别于短脉冲激光 的情况,同时也是单杂质模型无法得到的。将多杂 质加热模型的数值模拟温度分布与应力分布云图结 果与实验结果进行比较可知,从损伤形貌上看,二者 具有一定的吻合度。



图 5 激光损伤形态图 Fig. 5 Cross section photos of laser induced damage

需要附加说明的是,数值模拟云图与实验损伤 形貌仍然存在一些差异,如损伤尺寸,损伤深度与强 度等。这主要是由于多杂质模型中作了一些简化或 近似所致:①未考虑材料参数随激光作用过程中温 升的变化;②未考虑杂质本身对光场的影响;③未考 虑相变或裂纹产生对后续激光作用的影响。数值结 果显示,在激光作用初期(如图3(a)所示),已有部 分区域应力值超过玻璃所能承受的临界强度,也就 是说,这些部分已经遭到破坏。事实上,这些破坏处 将使局部光场增强或局部光吸收增强,进而增强后 续激光的破坏效应,在后续激光的作用下,原先遭到 破坏的小区域将加速扩张。由于数值模型中并未考 虑该动态过程影响,因此,实际过程中后续损伤的扩 张速度与强度可能会强于数值模拟结果。这些都是 今后研究对多杂质加热模型进一步优化的有效 途径。

### 5 结 论

本文建立了毫秒激光辐射下的多杂质加热模型,对涂有 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>增透薄膜的 K9 玻璃光学元件 在毫秒激光辐照下的温度场和热应力场进行了数值 模拟,分析了温度场和应力场分布的发展历程,结果 表明在毫秒激光作用下,微小杂质团簇能够导致毁 灭性的损伤,且损伤同时出现在元件的前后表面,前 表面为温度与应力效应共同作用,后表面为应力效 应主导。数值模拟结果与实验结果吻合良好。本文 所建立的多杂质加热模型可以为长脉冲高能激光损 伤光学元件机理的进一步研究提供帮助。

# 参考文献:

- B C Stuart, M D Feit, S Herman, et al. Nanosecond-tofemtosecond laser-induced breakdown in dielectrics [J]. Phys. Rev. B53,1996:1749 - 1761.
- J Y Natoli, L Gallais, H Akhouayri, et al. Laser-induced damage of materials in bulk, thin-film, and liquid forms
   [J]. Appl. Opt. 2002, 41:3156 3166.
- [3] S C Jones, P Braunlich, R T Casper, et al. Recent progress on laser-induced modifications and intrinsic bulk damage of wide-gap optical materials [J]. Opt. Eng. 1989, 28: 1039 – 1068.
- [4] R T Casper, S C Jones, P Braunlich. F-center accumulation as a mechanism of multiple-pulse, laser-induced bulk damage in KBr and KI at 532nm [J]. Nucl. Inst. Meth. phy. Res. B., 1990, 46:231-234.
- [5] N Bloembergen. Laser-induced electric breakdown in solids[J]. IEEE J. Quant. Electron. ,1974,10:375-386.
- [6] R W Hopper, D R Uhlmann. Mechanism of inclusion damage in laser glass [J]. J. Appl. Phys., 1970, 41: 4023-4037.
- S Papernov, A W Schmid. Heat transfer from localized absorbing defects to the host coating material in HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> multilayer systems [ J ]. Proc. SPIE, 1997, 2966: 283 291.
- [8] S I Kudryashov, S D Allen, S Papernov, et al. Nanoscale laser-induced spallation in SiO<sub>2</sub> films containing gold nanoparticles[J]. Appl. Phys. B,2006,82:523 - 527.

- [9] Y G Shan, H B He, C Y Wei, et al. Geometrical characteristics and damage morphology of nodules grown from artificial seeds in multilayer coating [J]. Appl. Opt., 2010, 49;4290-4295.
- [10] B Wang, Y Qin, X W Ni, et al. Effect of defects on longpulse laser-induced damage of two kinds of optical thin films[J]. Appl. Opt. ,2010,49:5537 - 5544.
- [11] H B He, H Y Hu, Z P Tang, et al. Laser-induced damage morphology of high-reflective optical coatings [J]. Appl. Surf. Sci. ,2005,241:442-448.
- [12] B Wang, H C Zhang, Y Qin, et al. Temperature field analysis of single layer TiO<sub>2</sub> film components induced by longpulse and short-pulse lasers [J]. Appl. Opt., 2011, 50: 3435 - 3441.
- [13] N Bloembergen. Role of cracks, pores, and absorbing inclusions on laser induced damage threshold at surfaces of transparent dielectrics[J]. Appl. Opt., 1973, 12:661-664.

- [14] A E Chmel. Fatigue laser-induced damage in transparent materials [J]. Mater. Sci. Eng., 1997, C49:175-190.
- [15] S G Demos, M Staggs. Characterization of laser induced damage sites in optical components [J]. Opt. Express., 2002,10:1444 - 1450.
- [16] M D Feit, A M Rubenchik, D R Faux, et al. Modeling of laser damage initiated by surface contamination [J]. Proc. SPIE, 1996, 2966:417 - 424.
- [17] G H Liu, M Zhou, G H Hu, et al. Calculation of temperature fields with a film-substrate interfacial layer model to discuss the layer-pair number effects on the damage thresholds of LaF<sub>3</sub>/MgF<sub>2</sub> high reflectors at 355nm [J]. Appl. Surf. Sci. ,2010,256;4206-4210.
- [18] G Dai, Y B Chen, J Lu, et al. Analysis of laser induced thermal mechanical relationship of HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> high reflective optical thin film at 1064nm [J]. Chin. Opt. Lett., 2009,7:601-604.