

多层介质膜激光诱导损伤改进模型与实验研究

王震 涂帅 张蓉竹

Improved model and experimental study of laser-induced damage in multilayer dielectric films

WANG Zhen, TU Shuai, ZHANG Rongzhu

引用本文:

王震, 涂帅, 张蓉竹. 多层介质膜激光诱导损伤改进模型与实验研究[J]. *中国光学*, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2025-0146

WANG Zhen, TU Shuai, ZHANG Rongzhu. Improved model and experimental study of laser-induced damage in multilayer dielectric films[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2025-0146

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0146>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多波长拉曼激光对CCD损伤实验研究

Experimental study on CCD damage by multi-wavelength Raman lasers

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 373 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0228>

脉冲激光辐照背照式CMOS图像传感器损伤机理研究

Damage mechanism of back-illuminated CMOS image sensor irradiated by pulsed laser

中国光学 (中英文). 2025, 18(2): 256 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0139>

纳秒脉冲激光对背照式CMOS探测器组件损伤机理研究

Investigation of laser-induced damage mechanisms in back-illuminated CMOS detector modules under nanosecond pulsed irradiation

中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1277 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0090>

改进丰富卷积特征算法的液滴边缘检测模型

Improved droplet edge detection model based on RCF algorithm

中国光学 (中英文). 2024, 17(4): 886 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0019>

高重频声光门控自吸收免疫激光诱导击穿光谱技术分析研究

Study and analysis of self-absorption-free laser-induced breakdown spectroscopy with high-repetition rate acousto-optic gating

中国光学 (中英文). 2024, 17(2): 253 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0147>

基于紫外激光的羟基-平面激光诱导荧光探测研究进展

Research progress of hydroxy-plane laser-induced fluorescence detection based on ultraviolet laser

中国光学 (中英文). 2024, 17(5): 1014 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0013>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-10

多层介质膜激光诱导损伤改进模型与实验研究

王震, 涂帅, 张蓉竹*

(四川大学电子信息学院, 四川, 成都 610065)

摘要:目的: 多层介质薄膜的结构会调制光场, 因此在研究激光诱导损伤特性时, 有必要考虑薄膜体系内部的能量分布以及由此引起的材料光学性质变化。方法: 以 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 多层介质薄膜结构为例, 基于激光诱导电离/电子倍增过程, 在光场计算中引入 Drude 模型, 将膜层折射率由静态常数扩展为由自由电子密度驱动的动态复折射率。在此基础上耦合热传导(及热应力)模型, 计算纳秒脉冲激光作用下薄膜内部的热效应演化, 并求得相应的损伤阈值为 13.65 J/cm^2 , 同时开展实验研究其损伤特性。结果: 验证实验观察到 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 多层介质薄膜的损伤形貌为圆孔状, 属于典型的热熔融型损伤, 测得的损伤阈值 13.75 J/cm^2 略高于理论分析结果, 与理论模型结论吻合。结论: 本文建立的改进模型有助于从理论层面进一步分析强激光与多层介质薄膜的相互作用, 并更好地研究光学薄膜的抗损伤能力。

关键词: $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 多层介质膜; 场致效应; Drude 模型; 热力耦合; 损伤阈值

中图分类号: TN24

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2025-0146

CSTR: 32171.14.CO.2025-0146

Improved model and experimental study of laser-induced damage in multilayer dielectric films

WANG Zhen, TU Shuai, ZHANG Rongzhu*

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

* Corresponding author, E-mail: zhang_rz@scu.edu.cn

Abstract: **Objective:** The structure of multilayer dielectric film will modulate the optical field, thus in the study of laser-induced damage characteristics, it is necessary to consider the energy distribution within the film system and the resulting changes in material optical properties. **Method:** Taking the $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ multilayer dielectric film structure as an example, and based on the laser-induced ionization/electron multiplication process, the Drude model is introduced into the optical field calculation, extending the film layer refractive index from a static constant to a dynamic complex refractive index driven by the free electron density. Based on this, a thermal conduction (and thermal stress) model is coupled to calculate the evolution of thermal effects inside the thin film under nanosecond pulsed laser irradiation, and the corresponding damage threshold is determined to be 13.65 J/cm^2 , and the damage characteristics of the film are studied experimentally. **Result:** The verification experiment observed that the damage appearance of the $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ multilayer dielectric film is a round hole type, which is a typical thermal melting damage, and is consistent with the conclusion of

收稿日期: xxxx-xx-xx; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金(No. 62205316)

Supported by

the theoretical model. The measured damage threshold is 13.75 J/cm^2 , which is only higher than the theoretical analysis result. **Conclusion:** The improved model established is helpful to further analyse the interaction between strong laser and multilayer dielectric film from the theoretical level, and to better study the damage resistance of optical thin film.

Key words: multilayer dielectric films; field effect; Drude model; thermal-stress coupling; damage threshold

1 引言

近年来,光学薄膜的应用已扩展到军队武器、工业生产及日常生活等各个领域,成为光学系统研究中不可或缺的元件。在其使用过程中,由于其物理结构薄弱,不可避免的会受到激光的辐照,造成膜内温度的升高,导致其光学性能发生变化^[1-7]。

针对该问题,已有学者做了很多研究工作,取得了一定的研究成果。Du L^[8]等基于麦克斯韦方程组,计算了多层介质膜内部光场的分布,利用材料的场效应损伤机理,分析了驻波场分布对薄膜损伤的影响,定量确定了多层介质膜的场损伤阈值。Cai Y^[9]等基于矩阵光学理论,建立了透射谱反演模型,通过测量损伤区域的有效折射率与消光系数,间接分析了材料光学性质随激光作用的演化特性。Wu S^[10]等则通过实验发现外加电场影响损伤形貌,进一步验证了电子行为与能量沉积路径之间的耦合关系。Zhou Q^[11]等分析了纳

秒激光基频和三倍频信号辐照下各自损伤形貌的特点和演变规律。

尽管已有研究引入了部分动态机制,但整体建模仍以静态参数为主,缺乏对光学响应与热力过程的统一耦合描述,且多数验证手段相对间接。实验室前期也对其进行了相关研究^[12],发现理论模拟与实验检测仍存在一定误差。基于以上原因,需对原有模型中容易被忽略的点进行相应改进,以获得更加准确的理论模型。为此,本文以 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 多层膜为研究对象,构建基于 Drude 模型的电子—折射率耦合机制,结合热-力方程建立完整的多物理场损伤模型,并通过实验验证其有效性。

2 理论模拟

2.1 多层介质膜中的光场分布

以一块实际的 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 多层介质膜为研究对象,按其膜系结构参数来构建理论模型,如图 1 所示。其量化后的膜系结构数据为:

$$\begin{aligned} & \text{substrate}/(0.61H0.66L)(1.21H0.66L) \\ & (1.22H0.69L)(1.28H0.74L)(1.35H0.74L)^{13} \\ & (1.29H0.71L)(1.34H0.65L)(1.33H0.75L)(0.90H)/\text{air} \end{aligned} ,$$

其中的系数表示对每个膜层物理厚度的量化, H 表示光学厚度为 $1/4$ 波长的高折射率材料 (HfO_2) 层, L 表示光学厚度为 $1/4$ 波长的低折射率材料 (SiO_2) 层, b 为薄膜半径, z_i 为第 i 层薄膜材料的厚度。

在激光辐照下,第 i 层介质中的光场是第 $i+1$ 层界面的透射波和第 i 层界面反射波的叠加,根据麦克斯韦方程,可以得到第 i 层介质膜中光场的通解为:

$$\begin{aligned} E_i(Z) &= A_1^{(i)} \left\{ \exp \left\{ -j[2\pi n^{(i)}/\lambda_0] \left(Z - \sum_{k=i+1}^{N+1} z_k \right) \right\} + A_2^{(i)} \exp \left\{ +j[2\pi n^{(i)}/\lambda_0] \left(Z - \sum_{k=i+1}^{N+1} z_k \right) \right\} \right\} \\ H_i(Z) &= n^{(i)} A_1^{(i)} \left\{ \exp \left\{ -j[2\pi n^{(i)}/\lambda_0] \left(Z - \sum_{k=i+1}^{N+1} z_k \right) \right\} - A_2^{(i)} \exp \left\{ +j[2\pi n^{(i)}/\lambda_0] \left(Z - \sum_{k=i+1}^{N+1} z_k \right) \right\} \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $E_i(Z)$, $H_i(Z)$ 分别表示位置为 Z 处的电场强度和磁场强度, $n_i(\rho)$ 表示第 i 层薄膜材料的折射

率, z_i 为第 i 层膜的厚度。 $A_1^{(i)}$ 和 $A_2^{(i)}$ 为常数,不同膜层中该系数也不相同,具体表达式如下:

$$A_2^{(i)} = \frac{[n^{(i)} - n^{(i-1)}]/[n^{(i)} + n^{(i-1)}] + A_2^{(i-1)}}{1 + \{[n^{(i)} - n^{(i-1)}]/[n^{(i)} + n^{(i-1)}]\}A_2^{(i-1)}} \times \exp\{-j[4\pi n^{(i)}/\lambda_0]z_i\}$$

$$A_1^{(i)} = \frac{(\exp\{-j[2\pi n^{(i+1)}/\lambda_0]z_{i+1}\} + A_2^{(i+1)} \exp\{-j[2\pi n^{(i+1)}/\lambda_0]z_{i+1}\})}{1 + A_2^{(i)}} \times A_1^{(i+1)}, \quad (2)$$

相应的, 初始值中 $A_1^{(N+1)}$ 为入射激光的场强, $A_2^{(1)} = 0$ 。

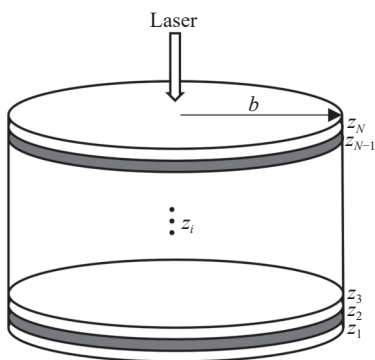


图 1 激光辐照下多层介质膜的理论模型

Fig. 1 Theoretical model of multilayer dielectric films under laser irradiation

为获得更加具体的光场分布, 结合实验室激光参数条件, 选取的光学薄膜半径 $b=1$ mm, 入射激光为高斯光束, 采用输出功率密度为 19.5×10^8 W/cm², 脉宽为 7 ns, 波长为 1064 nm, 半径为 0.8 mm, 根据公式 (1)–(2) 计算得到膜系内部的光场分布如图 2 所示。

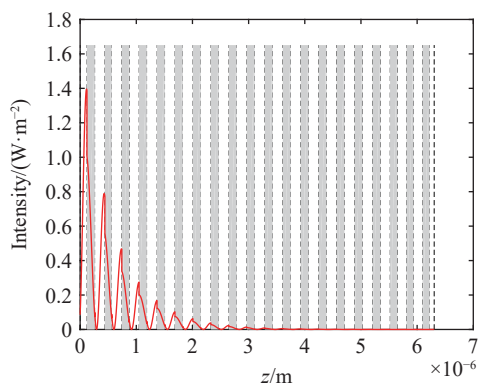


图 2 波长 1064 nm 激光辐照下膜内的光场强度分布

Fig. 2 Optical field intensity distribution inside the film under 1064 nm laser irradiation

可以发现, 图中的灰色条纹表示 SiO₂ 层, 白色条纹表示 HfO₂ 层。从图中可以发现, 电场的波腹及波节交替出现, 且均位于膜层的交界处, 越靠近空气-膜层界面, 峰值强度越大。同时结合对公式 (1)–(2) 的分析, 每层介质膜中的光场强度与材

料的折射率高度相关, 获取折射率的准确值很有必要。

2.2 改进后多层介质膜中的光场分布

在高能激光辐射下, 薄膜内部会存在大量自由电子导致其光学性质发生改变, 呈现一定的金属性。传统模型计算时, 并未充分考虑该因素。此时可引入 Drude 模型对光场分布进行修正, 得到更加准确的折射率数值, 其表达式如下^[13]:

$$n_i(\rho) = \sqrt{n_{i0}^2 - \frac{\rho e^2}{m\epsilon_0(\omega^2 + j\omega/\tau_D)}} \quad (3)$$

式中, $n_i(\rho)$ 表示第 i 层薄膜材料的折射率, n_{i0} 为未激发状态下第 i 层薄膜材料的折射率, ρ 是自由电子数密度, m 为材料内部自由电子有效质量, ϵ_0 是真空介电常数, ω 是激光角频率, τ_D 是 Drude 弛豫时间。

分析公式 (3) 可以发现, 当高能激光辐射时, 材料的折射率会由于内部自由电子数密度的变化而变化, 不再像已有研究中是一个常数, 对后续改进膜层内部电场分布计算将产生重要影响。

高能激光与材料相互作用时, 材料会在短时间内以雪崩电离或多光子电离的方式把材料导带中束缚电子激发为自由电子, 这一过程中自由电子密度随时间的变化规律可表示为^[3]:

$$\frac{d\rho(t)}{dt} = (R_{pi} + R_{ai}\rho(t))(1 - \rho(t)/\rho_1) \quad (4)$$

$\rho(t)$ 为导带中的自由电子密度, $1 - \rho(t)/\rho_1$ 表示导带电子的损耗, R_{ai} 是雪崩电离速率, R_{pi} 是多光子电离速率。

雪崩电离发生的物理过程可由 Thornber 雪崩电离模型表示为^[14]:

$$R_{ai} = \frac{v_s e E}{E_g} \exp\left\{\left[-\frac{E_I}{E(1 + E/E_p) + E_{KT}}\right]\right\} \quad (5)$$

式中 v_s 为饱和漂移速率, E 为入射光场强, E_g 是材料禁带宽度, E_I , E_p , E_{KT} 分别是载流子克服电离散射, 光学声子散射以及热散射所需的电场强度, 分别取值为 30×10^8 V/m, 3.2×10^8 V/m 及 $0.01 \times$

10^8 V/m。指数项则是用来描述电子发生雪崩的概率。

多光子电离速率可由 Keldysh 公式推导如下^[15]:

$$R_{pi}(E) = \frac{2\omega}{9\pi} \left(\frac{\omega m}{\hbar \sqrt{\gamma_1}} \right)^{3/2} Q(\gamma, x) \exp \left\{ -\pi \langle x+1 \rangle \frac{K_1(\gamma_1) - K_2(\gamma_1)}{K_2(\gamma_2)} \right\}$$

$$Q(\gamma, x) = \sqrt{\frac{\pi}{2K_1(\gamma_2)}} \sum_{n=0}^{\infty} \exp \left\{ -n\pi \frac{K_1(\gamma_2) - K_2(\gamma_2)}{K_2(\gamma_1)} \right\} \Phi \left\{ \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{2 \langle x+1 \rangle - 2x+n}{K_1(\gamma_2)K_2(\gamma_2)}} \right\}$$

$$\Phi(z) = \int_0^z \exp(y^2 - z^2) dy \quad , \quad (6)$$

式中 ω 为入射激光的频率, m 为材料内部自由电子有效质量, $\gamma = \omega \sqrt{mE_g}/eE$ 为材料 Keldysh 参数, $\gamma_1 = \gamma^2/(1+\gamma^2)$, $\gamma_2 = 1/(1+\gamma^2)$, $x = 2E_g K_2(\gamma_2)/\pi\hbar\omega\sqrt{\gamma_1}$, $K_1(\gamma)$, $K_2(\gamma)$ 分别为第一类和第二类完全椭圆积分, 符号 $\langle x+1 \rangle$ 表示对其中参量 $(x+1)$ 进行取整。

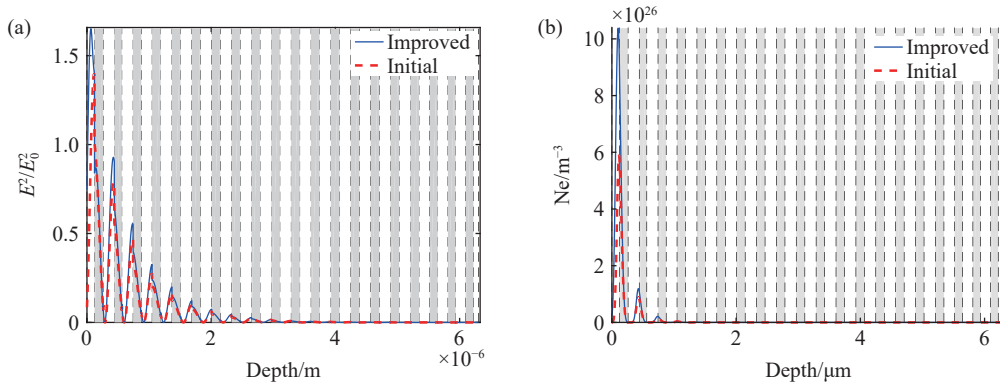
结合公式 (3)-(4) 来看, 由于场效应的存在, 材料在强光场作用下会产生电离, 产生大量自由电子, 进而影响材料的折射率, 导致膜内光场重新分布, 并最终反过来影响自由电子数密度。

因此, 考虑采用迭代法来合理计算电场强度。首先通过公式 (1) 计算膜层内初步的电场分布, 在此基础上利用公式 (4) 得到自由电子数密度, 将其代入公式 (3) 获得改进的折射率。最后将该值重新带入公式 (1), 重复上述步骤进行迭代计算, 直到脉冲作用结束。计算得到的薄膜内部的电场强度分布、自由电子数密度及复折射率的变化趋势如图 3 所示。

可以发现, 在 1064 nm 激光辐照下, 薄膜内部的电场强度、自由电子数密度及复折射率等参数呈现出明显的时空演化特征。图 3(a) 表明电场在入射界面处达到最大值, 引入 Drude 修正后, 表

层局域场略有增强, 说明自由电子的产生使介电常数降低, 从而强化了局域电场。图 3(b) 显示自由电子密度主要集中于表面附近, 随深度迅速衰减。改进模型的电子密度峰值更高, 说明载流子反馈效应促进了电离。图 3(c) 和 (d) 分别给出折射率实部与虚部的分布, 改进后 $\text{Re}(n)$ 在表层略减小、 $\text{Im}(n)$ 明显升高, 反映出自由电子导致的折射率下降和吸收增强。图 3(e) 和 (f) 展示了电场强度与电子密度随时间的变化。电场强度随时间单调上升, 在脉冲末期达到峰值; 电子密度则在初期迅速增长并逐渐趋于饱和。改进模型整体值略高, 说明 Drude 效应增强了载流子-场的耦合。总体而言, 改进模型更能反映激光作用下的非线性反馈与瞬态响应, 为后续高功率激光诱导损伤过程提供了更合理的物理依据。

为进一步分析不同波长条件下的光场差异, 并验证本文求解流程在其他波段下的可复用性, 我们在保持膜系结构与入射条件一致的前提下, 选取波长为 355 nm, 对膜内沿深度方向的电场强度分布进行了计算, 并对比引入 Drude 动态复折射率修正前后的结果, 如图 4 所示。



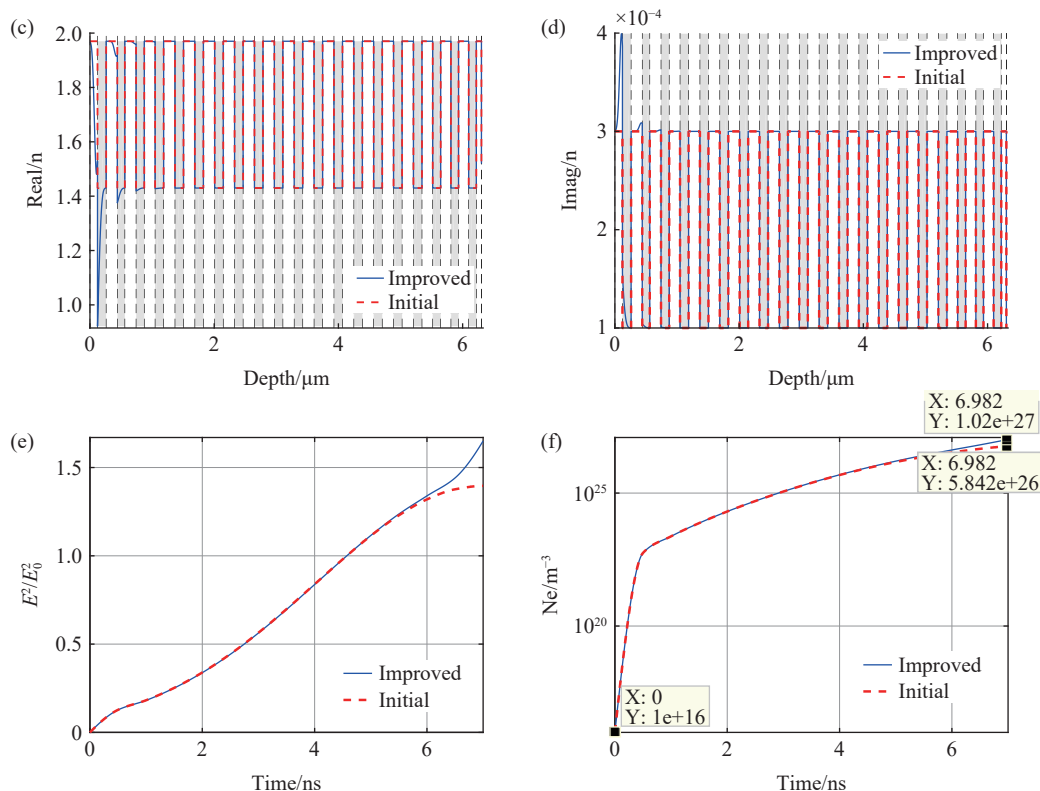


图3 波长 1064 nm 激光辐照下膜内各参数变化趋势。(a) 电场沿深度分布; (b) 自由电子数密度沿深度分布; (c) 折射率实部沿深度分布; (d) 折射率虚部沿深度分布; (e) 电场随时间变化; (f) 自由电子数密度随时间变化

Fig. 3 Variation of film parameters under 1064 nm laser irradiation. (a) Electric field distribution along depth; (b) Free electron density distribution along depth; (c) Real refractive index distribution along depth; (d) Imaginary refractive index distribution along depth; (e) Electric field variation over time; (f) Free electron density variation over time.

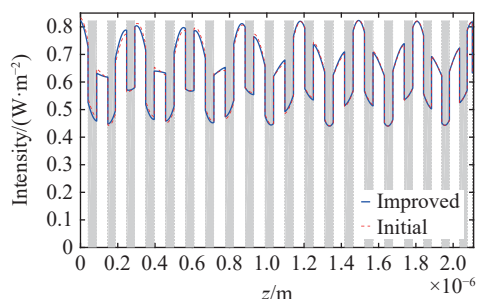


图4 波长 355 nm 激光辐照下膜内电场沿深度分布

Fig. 4 Optical field intensity under 355 nm laser irradiation (Drude-Improved vs. Initial)

从图4可以看到,在355 nm辐照下,改进前后电场强度分布曲线整体几乎重合,仅在个别位置出现轻微差异,表明该波长条件下Drude修正对光场分布的反馈并不显著。其主要原因在于:首先,Drude自由载流子项对角频率具有显著依赖, ω 越大(波长越短),Drude对介电常数的修正幅度越小,因此在355 nm下由自由电子引起的折射率/吸收修正相对减弱;其次,该膜系在355 nm

的透射较高,驻波增强效应较弱,使电场分布对小幅度折射率扰动的敏感性进一步降低。此外,不同波长对应不同的相位累积,膜层内干涉条件与场增强位置本身也会随波长发生变化。

需要强调的是,本文研究薄膜的工作波长为1064 nm,上述355 nm对比仅用于补充说明不同波长下Drude对光场反馈的差异。因此,在后续计算,均采用1064 nm条件开展能量沉积与热响应计算,并在此基础上与实验结果进行对照验证。

2.3 改进后多层介质膜的损伤模型

在改进模型获得光场分布的基础上,介质膜吸收的激光能量将转化成热量向周围传递,符合傅立叶热传导方程,其表达式为^[16]:

$$c_i \rho_i \left(\frac{\partial}{\partial t} \right) T(r, z, t) - K_i \nabla^2 (r, z, t) = q_i(r, z, t) \quad (7)$$

式中的 c_i 、 ρ_i 及 K_i 分别表示第*i*层薄膜材料的比热容、密度和热导率; r 表示薄膜半径; t 表示激光作用时间; $T(r, z, t)$ 表示薄膜的瞬态温度; $\nabla(r, z, t)$

表示温度对空间坐标的导数； $q_i(r, z, t)$ 表示第*i*层薄膜处的热源，与材料内的电场分布有关，可表示为：

$$q_i(r, z, t) = I(r, t) |E(z)_i|^2 f(r) g(t) \quad , \quad (8)$$

式中的 $I(r, t)$ 为入射激光的峰值功率密度； $f(r)$ 和 $g(t)$ 分别表示激光脉冲的空间和时间分布；其中， $E(z)_i$ 为主要影响参数，表示每层介质膜层归一化的电场强度，由于引入公式(3)改进了模型，获取的膜内电场强度也随之发生变化。

相应的，其初始条件和边界条件有^[11]：

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} T(r, z = 0, t) = \eta T(r, z = 0, t) \\ \frac{\partial}{\partial t} T(r, z = Z, t) = \frac{\partial}{\partial t} T(r = b, z, t) = 0 \\ T(r, z, t)|_{t=0} = T_0 \end{cases} \quad , \quad (9)$$

式中的 η 表示膜层表面与空气进行热交换的表面

热流系数，一般取 10^7 m^{-1} ^[3]； Z 表示膜层的总厚度， T_0 表示环境温度，一般取 300K 。 b 表示横截面的半径，尺寸远超过激光光斑半径，有效地消除了热传导中的边缘效应^[17]。

利用公式(7)(10)，结合改进模型计算的光场强度及表1所示的相关参数^[18-19]，利用有限元差分计算，可得到膜层材料表面和中心轴处的温度分布及变化规律如图5所示。

图5(a)中水平虚线表示 SiO_2 膜层的熔点。可以发现薄膜中心处的温度分布规律基本跟光场分布一致，峰值温度出现在第1层和第2层交界处，且已达到了 SiO_2 材料的熔点，薄膜出现热熔融损伤；而 HfO_2 由于材料熔点更高，此时并未出现热熔融现象。图5(b)给出了温度最高点随时间的变化规律，可以看到在单脉冲作用结束时，薄膜出现了最高温度，随后温度逐渐降低。

表 1 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 的相关计算参数^[13-14]

Tab. 1 Related calculation parameters of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$

Parameter	Symbol	HfO_2	SiO_2
Band gap	$E_g/(\text{eV})$	5.5	7.8
Effective electron mass	$m/(10^{-31}\text{kg})$	0.39×9.11	0.50×9.11
Electron saturated drift velocity	$v_s/(10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	2.0	2.0
Refractive index	n_0	1.97	1.45
Heat capacity*Density	$\rho c/(10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1})$	4.65	2.10
Thermal conductivity	$K/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	2.0	1.19
Melting point	$T/(\text{K})$	3073	1997
Young's modulus	$\gamma/(10^{10} \text{ Pa})$	24.0	8.7
Thermal coefficient of expansion	$\beta/(10^{-6} \text{ K}^{-1})$	5.6	0.5
Poisson's ratio	ν	0.27	0.17

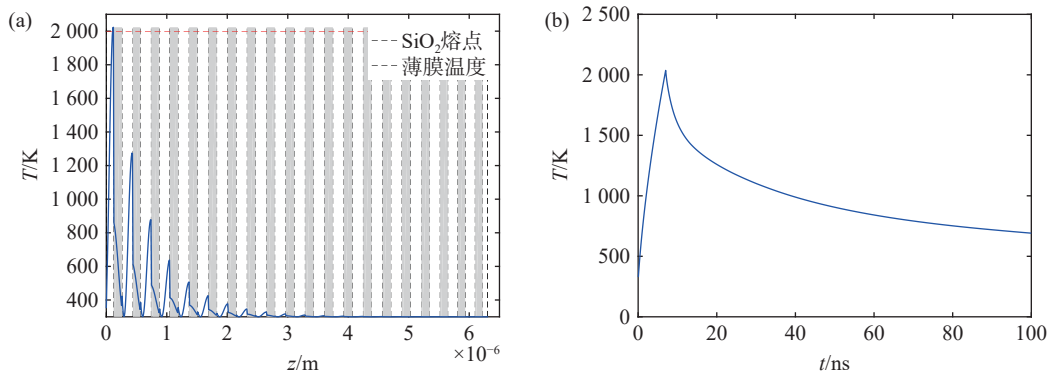


图 5 脉宽 7 ns 的纳秒激光辐照下薄膜内的温度变化曲线。(a) 薄膜中心处轴向温度变化曲线；(b) 温度最高点随时间的变化曲线

Fig. 5 Temperature variation curves within the film under 7ns laser irradiation. (a) Axial temperature variation curve at the center of the film; (b) Temperature peak variation curve over time.

得到薄膜的温度场分布后, 当其分布出现不均匀时, 膜内的热应力也随之产生。在计算温度场分别的同时, 根据热弹性理论, 结合应力应变的

广义胡克方程, 得到材料内部的热应力分布的表达式^[10]为:

$$\begin{aligned}\sigma_r(r, z, t) &= \frac{\beta\gamma}{1-\nu} \left[\frac{1}{b^2} \int_0^b T(r, z, t) r dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r T(r, z, t) r dr \right] \\ \sigma_z(r, z, t) &= \frac{\beta\gamma}{1-\nu} \left[\frac{2}{b^2} \int_0^b T(r, z, t) r dr - T(r, z, t) \right] \\ \sigma_\theta(r, z, t) &= \frac{\beta\gamma}{1-\nu} \left[\frac{1}{b^2} \int_0^b T(r, z, t) r dr + \frac{1}{r^2} \int_0^r T(r, z, t) r dr - T(r, z, t) \right],\end{aligned}\quad (10)$$

式中的参数 $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta$ 分别表示径向、轴向以及环向的热应力分布, β 表示热弹性系数, γ 表示薄膜材料的杨氏模量, ν 表示泊松比。

利用公式 (10) 可求得相应热应力的空间分布, 以薄膜中心为原点, 其空间分布如图 6 所示。分析发现, 由于两种膜层材料的热力学参数存在差异, 热应力大小也随之在膜层间波动。其中, 数

值的正负并不表示大小, 仅表示方向。三种热应力占主要作用的均为压应力, 且压应力峰值位于薄膜中心, 靠近空气-膜层界面。同时, 在一定的薄膜厚度内, 环向、轴向应力随着半径增大, 逐渐由压应力减少到零, 然后转变为拉应力继续增大, 最后趋于平稳。而径向压力则随着半径增大逐渐减小, 最后趋于零。

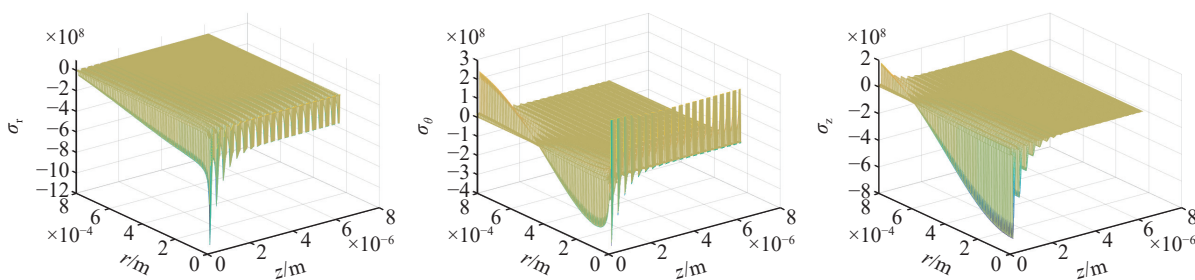


图 6 纳秒激光脉冲辐照下膜内热应力场分布。(a) 径向应力; (b) 环向应力; (c) 轴向应力

Fig. 6 Thermal stress distribution within the film under laser pulse irradiation. (a) Radial stress; (b) Hoop stress; (c) Axial stress

为进一步分析对比薄膜内部应力的分布情况, 选取了两种薄膜材料应力最大的膜层进行分析,

计算出三种应力随薄膜半径的空间分布规律如图 7 所示。

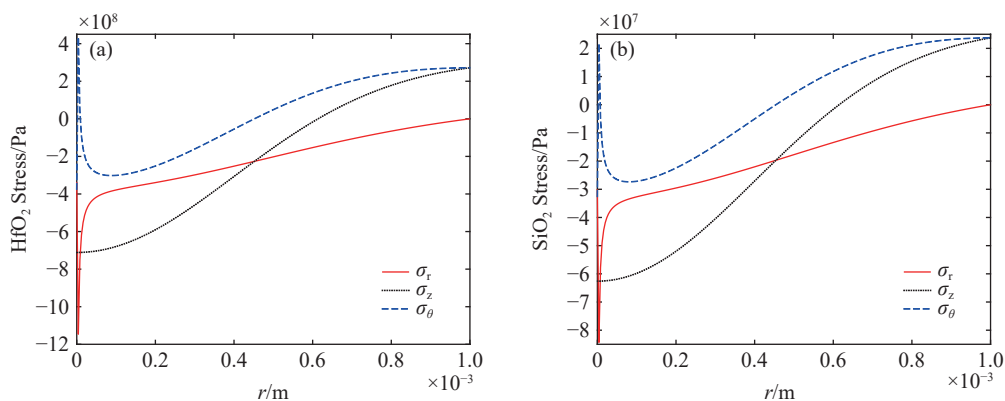


图 7 纳秒激光脉冲辐照下膜层的最大热应力场分布 (a) HfO_2 膜层 (b) SiO_2 膜层

Fig. 7 Maximum thermal stress distribution within the film irradiated by laser pulses (a) HfO_2 (b) SiO_2

从图中可以发现, HfO_2 膜层此时的最大应力已经达到了 1.2×10^9 Pa 远大于 SiO_2 膜层的 8.5×10^8 Pa, 但仍未超过膜层的应力阈值 1.5×10^9 Pa, 故此时还不会产生热致应力损伤。

综合来看, 引入的 Drude 模型改进了折射率的计算, 进而获得了更加精确的电场强度分布。再通过公式 (8) 计算激光热源, 最终得到的温度以及热应力, 达到改进理论模型的目的。在当前辐照条件下, 介质膜由于热效应, 温度已基本达到了 SiO_2 的熔点, 开始出现热熔融损伤, 但此时热应力损伤暂未出现。通过计算得到膜层的热损伤阈值为 13.65 J/cm^2 。

3 实验验证分析

为验证所改进的分析模型计算结果的准确性, 我们搭建了如图 8 所示的损伤测试实验, 主要包括 ND:YAG 激光光源, He-Ne 准直光源, 分光板, 能量探测器, 聚焦透镜, 二维样品载物台及

CCD 相机等元件。实验材料为相同膜系结构的 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 多层介质膜, 激光光束为高斯脉冲, 脉宽为 7 ns, 波长为 1064 nm, 光斑面积为 2 mm^2 。

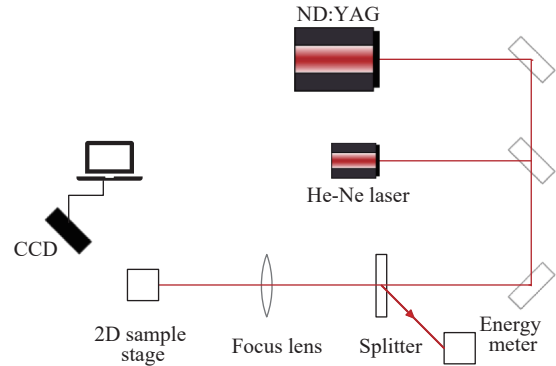


图 8 实验装置光路图

Fig. 8 Optical path diagram of the experimental setup

实验过程中, 在膜层表面选择不同位置点, 改变 ND:YAG 激光的输出能量, 由分光板处的能量计记录此时的激光能量, CCD 上也同步记录了膜层对应的损伤形貌, 以此判断此时的损伤情况, 如图 9 所示。

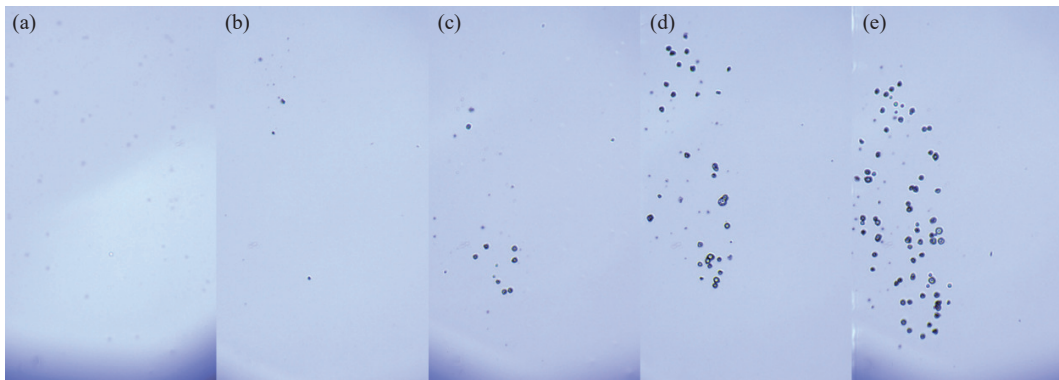


图 9 不同激光能量辐照后膜层的损伤形貌。(a) 激光能量密度 12.5 J/cm^2 ; (b) 激光能量密度 14.5 J/cm^2 ; (c) 激光能量密度 20.0 J/cm^2 ; (d) 激光能量密度 5.0 J/cm^2 ; (e) 激光能量密度 30.0 J/cm^2

Fig. 9 Damage morphology within the film after irradiation with different laser energies (a) Laser energy density 12.5 J/cm^2 ; (b) Laser energy density 14.5 J/cm^2 ; (c) Laser energy density 20.0 J/cm^2 ; (d) Laser energy density 5.0 J/cm^2 ; (e) Laser energy density 30.0 J/cm^2

几种辐照后的形貌图是在不同激光能量密度情况下产生的。当辐照的激光能量密度小于 12.5 J/cm^2 时, 介质膜并未出现可被观测到的任何损伤现象。激光能量增大, 膜层开始出现细微的规则型孔洞。当激光能量密度达到 20.0 J/cm^2 时膜层已经出现了密集的麻点状损伤。继续增大至 30.0 J/cm^2 , 开始出现剥落的黑色形状损伤样貌。

由于实验采用的 1-on-1 的测量方式, 通过分

光板处的能量计记录的激光能量数据, 结合分光比, 及此时的损伤状态, 拟合出介质膜的损伤几率-能量密度线性关系, 进而得到 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 介质膜的零几率损伤阈值为 13.75 J/cm^2 , 略高于理论模型计算得到的数值。

究其原因, 理论计算是当达到材料熔点即判定损伤发生, 而实验数据是以有可观察的损伤点为标准。当温度刚达到熔点时, 并不能直接观测到损伤点, 因此实测数据略高。考虑到实验与理

论数据的区别, 本文所改进的损伤分析模型能够很好的与实测结果相符, 模型有效。

4 结 论

本文提出了一种更为全面的多层介质膜损伤特性分析模型。基于电子倍增理论, 计算了薄膜材料内部自由电子密度的变化规律, 并在此基础上讨论了膜层内电子密度变化引起的折射率变化, 从而建立了光场与材料特性之间的耦合关系。以 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 多层介质膜结构为例, 引入 Drude 模型计算膜层折射率, 从而得到更为精确

的薄膜介质内部光场分布。进一步利用热传导方程, 计算得到了更为精确的膜系统内部不同位置的温度变化和热应力分布结果。最终确定损伤阈值为 13.65 J/cm^2 。随后, 通过具体的损伤实验, 观察到此时膜层的损伤形貌为规则的圆形孔洞, 属于典型的热熔性损伤, 同时得到了损伤阈值为 13.75 J/cm^2 。考虑到人眼只有在实际损伤发生并经过一定发展后才能观察到损伤点, 实际测量的阈值往往会略高于理论分析结果。实验证明, 优化后的阈值分析模型有助于对强激光束与多层介质薄膜的相互作用进行更深入的理论分析, 从而更好地预测光学薄膜的抗损伤性能。

参考文献:

- [1] KOZLOWSKI M R, THOMAS I M, CAMPBELL J H, *et al.*. High-power optical coatings for a megajoule class ICF laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 1993, 1780: 17802L.
- [2] 毛思达, 邹永刚, 范杰, 等. 离子后处理对 TiO_2 光学薄膜及损伤特性的影响[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(7): 1451-1457.
MAO S D, ZOU Y G, FAN J, *et al.*. Influence of plasma treatment on optical and damage properties of TiO_2 thin films[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(7): 1451-1457. (in Chinese).
- [3] 刘瑞斌, 殷允嵩. 激光诱导击穿光谱技术相关物理机制研究进展[J]. *中国光学 (中英文)*, 2024, 17(1): 19-37.
LIU R B, YIN Y S. Research progress on the related physical mechanism of laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(1): 19-37. (in Chinese).
- [4] 陈斐, 王树青, 程年恺, 等. 高重频声光门控自吸收免疫激光诱导击穿光谱技术分析研究[J]. *中国光学 (中英文)*, 2024, 17(2): 253-262.
CHEN F, WANG SH Q, CHENG N K, *et al.*. Study and analysis of self-absorption-free laser-induced breakdown spectroscopy with high-repetition rate acousto-optic gating[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 253-262. (in Chinese).
- [5] 钱方, 彭佳琦, 许永博. 脉冲激光辐照背照式 CMOS 图像传感器损伤机理研究[J]. *中国光学 (中英文)*, 2025, 18(2): 256-265.
QIAN F, PENG J Q, XU Y B. Damage mechanism of back-illuminated CMOS image sensor irradiated by pulsed laser[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(2): 256-265. (in Chinese).
- [6] 杨艳, 张慧敏, 张旭霖, 等. TiO_2/PSS 薄膜对 Kretschmann 型传感器光谱的调制[J]. *中国光学 (中英文)*, 2025, 18(2): 297-306.
YANG Y, ZHANG H M, ZHANG X L, *et al.*. Modulation of a Kretschmann-type sensor's spectra using TiO_2/PSS thin films[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(2): 297-306. (in Chinese).
- [7] 辛亚武, 彭永超, 张宇翔, 等. 可见/近红外多波段激光滤光膜的研制[J]. *中国光学 (中英文)*, 2026, 19(1): 239-249.
XIN Y W, PENG Y CH, ZHANG Y X, *et al.*. Development of visible/near-infrared multiband laser filter film[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(1): 239-249. (in Chinese).
- [8] DU L F, ZHU X B, ZHANG R ZH. The thermal-stress accumulation in anti-reflective coatings with multi-pulse laser irradiation[J]. *Optics Communications*, 2015, 350: 263-269.
- [9] CAI Y, ZHOU M L, MA ZH L, *et al.*. Spectrum method for laser induced damage in dielectric thin films[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9543: 95430C.
- [10] WU SH J, SU J H, LI D J, *et al.*. The effect of the applied electric field on laser-induced damage of dielectric thin films[J]. *Materials Research Express*, 2017, 4(1): 016403.
- [11] ZHOU Q, MA P, QIU F M, *et al.*. Material ejection and layer peeling-off in $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ thin-film beam splitters induced by 1ω and 3ω lasers[J]. *Optical Materials*, 2022, 125: 111894.
- [12] 郑梦珂, 李杰, 张蓉竹, 等. 激光诱导多层光学薄膜损伤分析与仿真[J]. *光学学报*, 2022, 42(1): 0131001.

- ZHENG M K, LI J, ZHANG R ZH, *et al.*. Analysis and simulation on damage characteristics of multilayer optical film by pulsed laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 0131001. (in Chinese).
- [13] GROSSO G, PARRAVICINI G P. *Solid State Physics*[M]. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press, 2013.
- [14] LI F Y, LIU G D, DU L F, *et al.*. Comparisons and analyses of the properties of laser-induced damage to SiO₂ and ZnS[J]. *Journal of Modern Optics*, 2014, 61(14): 1158-1163.
- [15] MANSURIPUR M, CONNELL G A N, GOODMAN J W. Laser-induced local heating of multilayers[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(6): 1106-1114.
- [16] WANG ZH, ZHANG R ZH, CHEN M. Analysis of composite wavelength multilayer dielectric film damage based on the field-thermal effect[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2024, 41(11): 2589-2598.
- [17] WANG F, CHEN K J, GAO F, *et al.*. Analysis of laser-induced damage in optical thin film based on ANSYS[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10964: 109642M.
- [18] WEBER M J. *Handbook of Optical Materials*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- [19] WAKAKI M. *Optical Materials and Applications*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.

作者简介:



王震(1995—),男,四川大学博士在读,主要从事激光与薄膜相互作用方面的研究。学习经历:2013—2017年就读于三峡大学光电信息科学与工程专业;2017—2020年,就读于四川大学光学工程专业,主要从事激光与金属材料相互作用的研究;2022至今,就读于四川大学光学工程专业,从事激光与薄膜相互作用方面的研究。
E-mail: 935086783@qq.com



张蓉竹(1975—),女,四川大学教授,博士生导师,主要从事高功率激光系统方面的研究。E-mail: zhang_rz@scu.edu.cn