

激光辐照氮化硅陶瓷光谱信息研究

蔡鹏程 闫佳 孔鹏 张卫国 庞澜 惠进 蔡红星

Spectral information of silicon nitride ceramics irradiated by laser

CAI Pengcheng, YAN Jia, KONG Peng, ZHANG Weiguo, PANG Lan, XI Jin, CAI Hongxing

引用本文:

蔡鹏程, 闫佳, 孔鹏, 等. 激光辐照氮化硅陶瓷光谱信息研究[J]. 应用光学, 2022, 43(4): 819–824. DOI: 10.5768/JAO202243.0407005

CAI Pengcheng, YAN Jia, KONG Peng, et al. Spectral information of silicon nitride ceramics irradiated by laser[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(4): 819–824. DOI: 10.5768/JAO202243.0407005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0407005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

侧边抛磨的U型金溅射塑料光纤等离子体共振传感器

Side-grinding U-shaped gold sputter plastic fiber SPR sensor

应用光学. 2019, 40(3): 511–516 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0308002>

基于PDMS薄膜的等离子体光栅仿真分析

Simulation analysis of plasma grating based on PDMS thin films

应用光学. 2021, 42(2): 371–376 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0208002>

气体浓度激光光谱检测温度影响修正研究

Study on temperature influence correction of gas concentration laser spectrum detection

应用光学. 2020, 41(2): 348–353 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0203002>

光电振荡器相位噪声和频率稳定性研究进展

Research progress on phase noise and frequency stability of optic-electronic oscillator

应用光学. 2017, 38(4): 562–568 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0401008>

激光辐照下红外测温的误差补偿方法研究

Research on error compensation method for infrared temperature measurement under laser irradiation

应用光学. 2019, 40(6): 1084–1090 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0603001>

532 nm激光辐照下ZnSe薄膜光学特性研究

Optical properties of ZnSe film under 532 nm laser irradiation

应用光学. 2018, 39(6): 929–935 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0607003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2022) 04-0819-06

激光辐照氮化硅陶瓷光谱信息研究

蔡鹏程¹, 闫佳², 孔鹏¹, 张卫国¹, 庞澜¹, 惠进¹, 蔡红星³

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 军事代表局驻西安地区第八军事代表室, 陕西 西安 710065;
3. 长春理工大学物理学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 氮化硅陶瓷具备耐腐蚀、耐磨损和耐高低温冲击的优良性能, 常用于高超声速飞行器的热防护材料, 激光武器是未来高超声速目标拦截和打击的主要技术手段。采用 Nd³⁺:YAG 固体脉冲激光器作为辐照源, 热压烧结氮化硅陶瓷为靶材, 中阶梯光栅光谱仪为探测器搭建实验系统, 采集激光波长 1 064 nm, 脉宽 15 ns, 不同能量 (50 mJ~500 mJ) 作用靶材的辐射光谱。基于美国标准技术与研究院原子光谱数据库对谱线指认, 利用玻尔兹曼斜线法计算得到等离子体电子温度范围为 6 203 K~6 826 K, 斯塔克展宽法计算等离子体电子密度范围为 $8.40 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \sim 1.14 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 等离子体电子振荡频率为 $8.23 \times 10^{11} \text{ Hz} \sim 9.58 \times 10^{11} \text{ Hz}$, 随着激光能量增加电子温度整体呈上升趋势, 电子密度变化存在波动。

关键词: 氮化硅陶瓷; 等离子体光谱; 电子密度; 电子温度; 电子振荡频率

中图分类号: TN249; O433

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202243.0407005

Spectral information of silicon nitride ceramics irradiated by laser

CAI Pengcheng¹, YAN Jia², KONG Peng¹, ZHANG Weiguo¹,
PANG Lan¹, XI Jin¹, CAI Hongxing³

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 2. The 8th Military Representative Office of Military Representative Bureau in Xi'an Region, Xi'an 710065, China; 3. School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Silicon nitride ceramics have excellent properties of corrosion resistance, wear resistance and resistance to high-low temperature impact, which are commonly used in thermal protection materials of hypersonic vehicles. The laser weapons are the main technical means for intercepting and striking the hypersonic targets in the future. The Nd³⁺:YAG solid-state pulsed laser was used as an irradiation source and hot-pressed sintered silicon nitride ceramic was used as the target. Meanwhile, the echelle grating spectrometer was used as the detector to construct an experimental system. The radiation spectra of the target with a laser wavelength of 1 064 nm, pulse width of 15 ns, and different energies (50 mJ~500 mJ) were collected. Line identification was based on the national institute of standards and technology (NIST) atomic spectrum database. According to the Boltzmann method, the plasma electron temperatures range from 6 203 K~6 826 K, the plasma electron density range calculated by the Stark broadening method is $8.40 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \sim 1.14 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, and the electronic oscillation frequency is $8.23 \times 10^{11} \sim 9.58 \times 10^{11} \text{ Hz}$. With the increase of laser energy, the electron temperature demonstrates an overall upward trend, and the change of electron density fluctuates.

Key words: silicon nitride ceramics; plasma spectrum; electron density; electron temperature; electronic oscillation frequency

收稿日期: 2022-05-28; 修回日期: 2022-06-14

基金项目: 国防基础科研项目 (JCKY2016208B001)

作者简介: 蔡鹏程 (1990—), 男, 博士, 工程师, 主要从事光学探测及设计方面的研究。E-mail: cpcaba@126.com

引言

氮化硅陶瓷(Si_3N_4)具有良好的力学性能、热稳定性、低介电损耗和高耐冲蚀性,是一种综合性能优良的结构材料,在运载火箭、飞船、导弹及返回卫星等领域中得到广泛应用^[1-3]。激光武器打击速度快、精度高、效费比高,作为这些高超声速目标的主要拦截和打击手段之一,开展激光与氮化硅陶瓷相互作用光谱研究是至关重要的^[4-7]。激光与目标相互作用过程产生强烈的等离子体闪光,光谱中包含有丰富的物理化学信息。线状特征谱线可用于目标的种类识别、材质分析和损伤位置判断^[8]。同时等离子体中电子温度、电子密度和电子振荡频率参数是高超声速飞行器探测及其外层热防护材料选择的重要物理参数^[9],光谱法是诊断这些参数的有效手段^[10]。

Chen Minhao 等^[11]研究了激光损伤过程中目标识别技术,采集激光辐照钢板、碳纤维、环氧树脂发射光谱,利用支持向量机的方法对等离子体特征谱线进行了分类识别,目标材质识别速度和准确率得到了大幅提高。M A Hafez 等^[12]研究了335 nm 紫外激光与 Cu 靶相互作用光谱,利用等离子体特征光谱和电子探针探测计算得到距离靶面不同位置处的电子温度和电子密度值。Alessandro De Giacomo 等^[13]研究了激光与钛靶材相互作用特征光谱,讨论了不同延迟时间下等离子体中电子密度变化特性。Sidra Khan 等^[14]研究了环境压力对 YAG 激光烧蚀钽等离子体光谱电子温度和电子密度的影响。Ye Ying 等^[15]基于偏振光谱技术对激光辐照复合陶瓷材料的损伤过程进行了实时观测。

目前对于纳秒激光辐照氮化硅陶瓷等离子体光谱参数的全面研究尚未见到。本文搭建了激光与氮化硅陶瓷靶材相互作用实验系统,采集激光作用过程辐射光谱,对特征谱线进行了指认。基于硅原子和离子线状特征谱线计算了不同注入激光能量下的等离子体参数,指认结果可为目标材质识别和毁伤部位判断提供参考,计算结果可为高超声速飞行器的探测及其表面热防护材料的选择提供基础依据。

1 实验原理

激光辐照氮化硅靶材,材料吸热后温度迅速升高,达到熔点后熔化蒸发,蒸汽中的粒子吸收激光

能量,通过多光子电离产生等离子体,高温高压等离子体向外膨胀喷出,产生闪光,光谱仪采集闪光光谱即可得到发射光谱信息。线状特征谱线是受激光能量作用处于高能级的激发态氮化硅材料原子和离子,向低能态跃迁时辐射产生,如(1)式所示^[16]:

$$\lambda = \frac{hc}{E_p - E_q} \quad (1)$$

式中: λ 为线状特征谱线中心波长; h 为普朗克常数; c 为光在真空中的传播速度; E_p 为高能级能量; E_q 为低能级能量。

2 测量装置组成

测试系统如图1所示。采用 Nd^{3+} :YAG 固体脉冲激光器输出激光波长 1 064 nm、脉宽 15 ns、频率 1 Hz,能量可调。靶材样品选用规格为 25 mm×25 mm×3 mm 的热压烧结氮化硅陶瓷,参数如表1所示。光谱仪选用 EM5000 中阶梯光栅光谱仪,光谱波段 200 nm~900 nm,光谱分辨率 0.1 nm。激光束经衰减器精确控制入射到靶面的激光能量,会聚的激光束通过分束器1和分束器2确定入射到靶面的激光能量和用于实时监测的激光能量比例。测试时通过调整三维移动平台来确定透镜与靶材之间的位置,并通过能量计和示波器实时监测激光能量和脉宽,以 50 mJ 为能量间隔,在 50 mJ~500 mJ 间依次选取 10 个能量梯度对靶材进行辐照。光谱仪探头位置采用半导体激光器准直,调整探头位置使探头输出的准直激光与辐照强激光作用在靶材上的会聚点重合,确保探测区域为激光辐照区,激光与靶材相互作用过程产生的光谱信息,由会聚透镜收集经光纤传入光谱仪 EM5000,将光信号转换为电信号,由计算机进行分析处理。

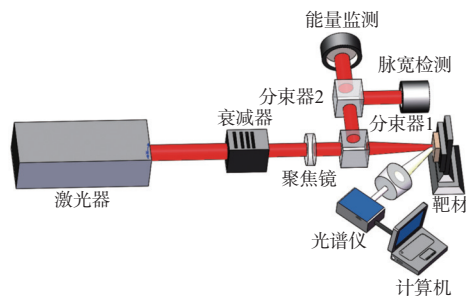


图1 激光辐照氮化硅陶瓷测试装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device for silicon nitride ceramics irradiated by laser

表 1 氮化硅陶瓷物理特性

Table 1 Physical properties of silicon nitride ceramics

参数	值
密度/g·cm ⁻³	3.2
烧结温度/℃	1 700
硬度/HV	1 500~1 800
抗折强度/MPa	700
热膨胀系数(0~1000℃)/℃	10.5×10 ⁻⁶
热传导率(25~300℃)/W·m·K ⁻¹	18

3 实验结果与分析

3.1 测量结果

采集脉冲激光在 50 mJ~500 mJ 能量下作用氮化硅陶瓷辐射光谱, 预处理后光谱如图 2 所示。呈现为连续谱上叠加有丰富的线状特征谱线, 随激光能量的增加谱线强度上升, 中心波长保持一致。激光能量 500 mJ 光谱指认结果展示如图 3 所示。由于谱线分布比较密集, 将图 3(a) 中波长 200 nm~350 nm 谱线展开如图 3(b)、3(c) 所示。根据 NIST 原子光谱数据库指认主要为硅、氧、氮原子和离子的特征谱线, 说明靶材中硅原子已经电离, 氧元素和部分氮元素特征谱线来自空气电离。不同原子、离子上下能级能量存在差异, 跃迁几率不同, 元素含量不同, 跃迁产生谱线的中心波长和强度不同, 242 nm~254 nm 波段光谱主要集中为硅原子特征谱线, 等离子体特征谱线强度较高的主要分布在 700 nm~800 nm 波段, 其中部分光谱参数如表 2 所示。第 1 列是原子与离子的不同电离态, 第 3 列是跃迁几率和统计权重的乘积, 主要用于光谱计算。

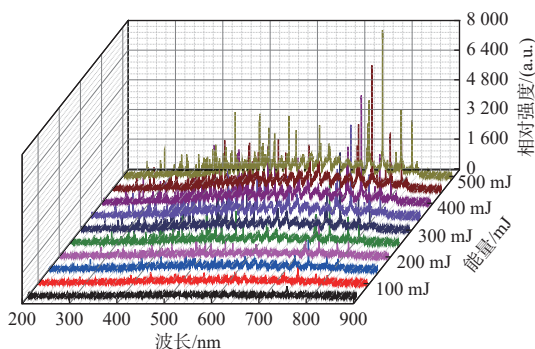
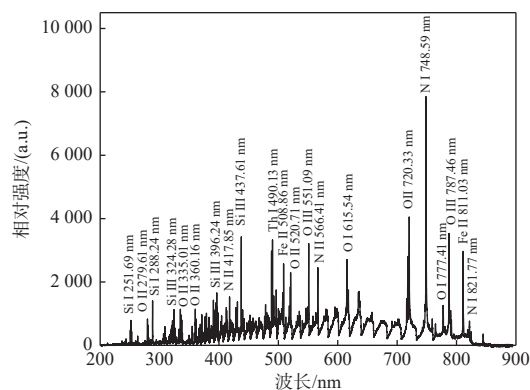
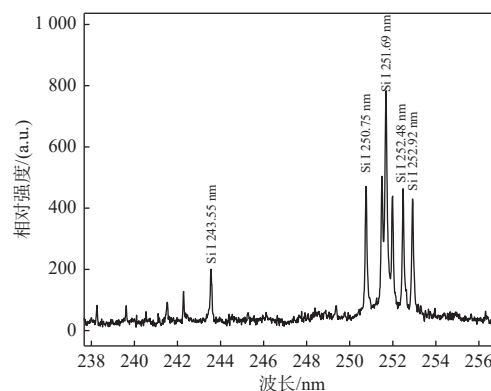


图 2 激光能量 50 mJ~500 mJ 辐照氮化硅陶瓷光谱图

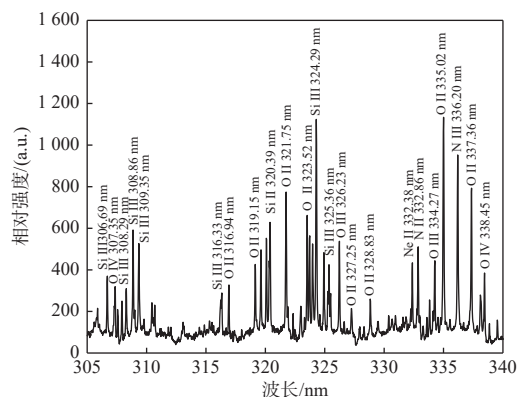
Fig. 2 Spectrogram of irradiated silicon nitride ceramics with laser energy of 50 mJ~500 mJ



(a) 200 nm~900 nm 光谱图



(b) 237 nm~257 nm 展开光谱图



(c) 305 nm~340 nm 展开光谱图

图 3 激光能量 500 mJ 辐照氮化硅陶瓷光谱图

Fig. 3 Spectrogram of irradiated silicon nitride ceramics with laser energy of 500 mJ

光谱计算时主要用到谱线中心波长、相对强度和半高宽参数, 波长和强度参数可直接在光谱图中提取。激光与氮化硅陶瓷作用过程谱线线宽主要受到 Stark 展宽的影响, 线型符合 Lorentz 线型。利用 Lorentz 函数拟合激光能量 500 mJ 时, Si I 288.2 nm 谱线如图 4 所示, 黑色线为实测结果, 红色曲线为拟合结果, 半高宽为 0.12 nm。

3.2 电子温度计算

根据原子发射光谱理论, 受激原子从高能级向

表2 激光辐照氮化硅陶瓷光谱参数

Table 2 Spectral parameters of silicon nitride ceramics irradiated by laser

原子/离子	波长/nm	跃迁几率·统计权重/s ⁻¹	下能级能量E ₁ /eV	上能级能量E ₂ /eV	下能级电子组态	上能级电子组态
Si I	288.24	6.51×10 ⁸	0.780957	5.082345	3s ² 3p ²	3s ² 3p4s
Si III	324.29	7.05×10 ⁸	21.73892	25.56257	3s4p	3s5s
Si III	396.23	1.82×10 ⁷	24.99515	28.12213	3s4d	3p4s
Si III	437.61	2.07×10 ⁷	25.39544	28.22687	3s4f	3s5d
O I	615.54	6.86×10 ⁷	10.74093	12.75369	2s ² 2p ³ (4s ⁰)3p	2s ² 2p ³ (4s ⁰)4d
N I	821.72	1.84×10 ⁸	10.33589	11.84447	2s ² 2p ² (3p)3s	2s ² 2p ² (3p)3p

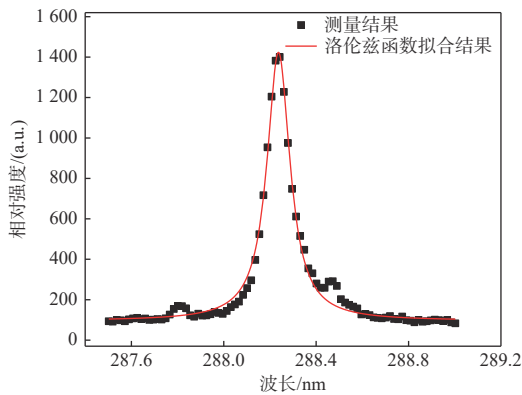


图4 Si I 288.2 nm 谱线洛伦兹拟合

Fig. 4 Lorentz fitting of Si I (288.2 nm) spectral line

低能级跃迁时,将以光的形式辐射出能量,产生特定的原子光谱。同种原子或者离子的2条光谱线在局部热力学平衡状态(LTE)下,其辐射强度比值满足(2)式:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1 g_1 \lambda_2}{A_2 g_2 \lambda_1} \exp\left(-\frac{E_1 - E_2}{kT_e}\right) \quad (2)$$

$$\ln\left(\frac{I_1 \lambda_1 / A_1 g_1}{I_2 \lambda_2 / A_2 g_2}\right) = -\frac{1}{kT_e} (E_1 - E_2) \quad (3)$$

式中: I_1 和 I_2 分别为2条谱线的发射光谱强度; A_1 和 A_2 为跃迁概率; g_1 和 g_2 为统计权重; λ_1 和 λ_2 为2条谱线的波长; E_1 和 E_2 为2条谱线激发态能量; k 为玻尔兹曼常数; T_e 为等离子体电子温度^[17]。(2)式变形为(3)式后, $-1/kT_e$ 为斜率,等式两边其他参数已知,根据斜率值带入玻尔兹曼常数即可求出电子温度。

选用硅离子 Si III 324.29 nm、Si III 396.23 nm 和 Si III 437.61 nm 3条特征谱线,根据玻尔兹曼斜线法计算得到不同激光能量下电子温度值如图5所示。电子温度值整体呈上升趋势,这是由于注入激光能量的增加,等离子体中电子运动加剧,50 mJ 时等离子体温度最低值为6203 K,激光能量400 mJ 时电子温度值达到最大值6827 K。

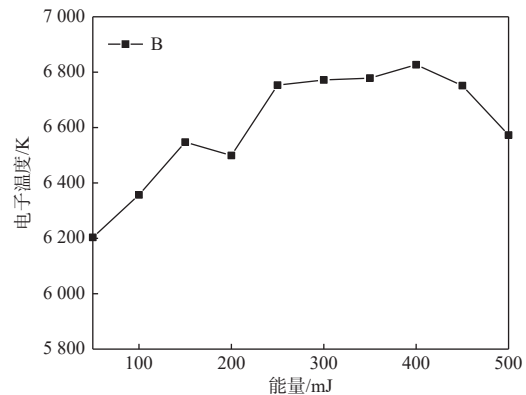


图5 不同激光能量下等离子体电子温度计算结果

Fig. 5 Calculation results of plasma electron temperature at different laser energies

3.3 电子密度计算

同时等离子体中发射原子受到周围运动电子和离子的电场作用,引起的谱线展宽为 Stark 展宽,展宽线型为 Lorentz 线型。利用发射光谱法对电子密度进行诊断,即利用谱线的 Stark 展宽量来计算等离子体的电子密度:

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2w \left(\frac{n_e}{10^{16}} \left[1 + 1.75A \left(\frac{n_e}{10^{16}} \right)^{1/4} \left(1 - \frac{3}{4} n_d^{-1/3} \right) \right] \right) \quad (4)$$

式中: $\Delta\lambda_{1/2}$ 为谱线半高全宽; n_e 为电子密度; n_d 为德拜球内粒子数, $n_d = 1.72 \times 10^9 \frac{T_e^{3/2}}{n_e}$; w 是电子碰撞参数; A 为离子碰撞参数。由于离子质量远大于电子质量,电子运动速度远大于离子运动速度,因此,可以忽略离子项的贡献,将(4)式简化为^[18]

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2w \frac{n_e}{10^{16}} \quad (5)$$

选择来自靶材元素的硅原子 Si I 288.2 nm 典型特征谱线,利用 Lorentz 函数拟合特征谱线得到谱线的半高全宽,电子碰撞展宽参数由文献[19]可知 $w_{Si288.2nm} = 0.054$,根据 Stark 展宽公式计算得到等离子体电子密度如图6所示。结果存在波动可

能是由于激光作用靶材过程中等离子体喷溅物影响, 激光能量 200 mJ 时电子密度最小值为 $8.40 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 250 mJ 时达到最大值 $1.14 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。

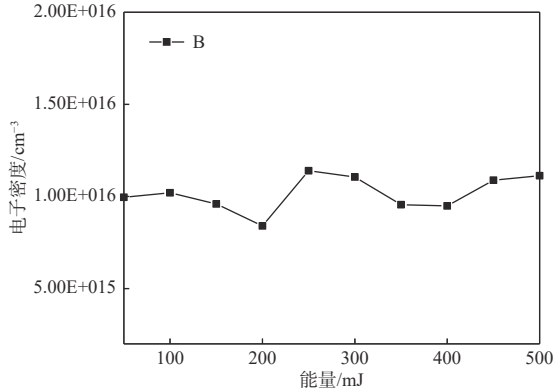


图 6 不同激光能量下等离子体电子密度计算结果

Fig. 6 Calculation results of plasma electron density at different laser energies

3.4 电子振荡频率计算

等离子体中电子运动满足:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{eE}{m_e} = -\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e} x \quad (6)$$

式中: n_e 为电子密度; e 为电子电量 ($e=1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$); m_e 为电子质量 ($m_e=9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$); ϵ_0 为真空介电常数 ($\epsilon_0=8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)^[20]。

电子振荡角频率可表示为

$$\omega = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (7)$$

等离子体中自由电子在做朗缪尔振荡, 与等离子体电子密度密切相关, 根据 (7) 式计算得到等离子体中电子振荡频率, 式中 ω 为角频率转化为频率结果, 如图 7 所示。电子振荡频率与电子密度值成

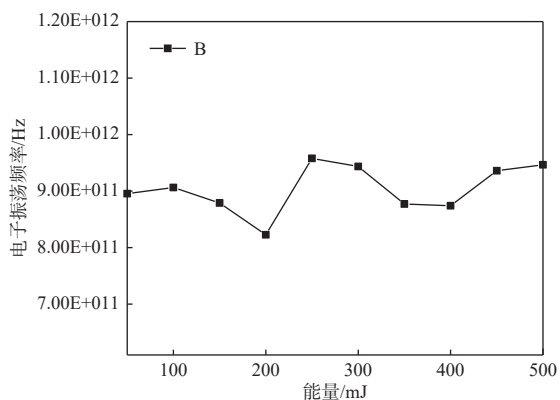


图 7 不同激光能量下等离子体电子振荡频率计算结果

Fig. 7 Calculation results of plasma electron oscillation frequencies at different laser energies

正比, 随着激光能量的增加, 其变化规律与电子密度一致, 激光能量 200 mJ 时最小值为 $8.23 \times 10^{11} \text{ Hz}$, 250 mJ 达到最大值 $9.58 \times 10^{11} \text{ Hz}$ 。

4 结论

针对航空航天领域常用的氮化硅陶瓷材料, 设计搭建了激光与陶瓷相互作用试验系统。利用光谱仪测量了不同激光能量辐照氮化硅陶瓷辐射光谱。经指认选择硅原子和离子线状特征光谱曲线, 计算得到了不同激光能量下, 等离子体电子密度、电子温度和电子振荡频率值。电子温度随着激光能量的增加整体呈上升趋势, 这是由于注入到靶面激光能量增加引起等离子体中电子运动加剧。电子密度与电子振荡频率值变化规律一致, 存在波动可能是由于激光与陶瓷靶材作用过程中产生喷溅物影响。这些结果可为激光毁伤中材质识别和损伤位置判定提供基础数据, 同时为氮化硅陶瓷材料特性研究提供参考。

参考文献:

- [1] BOCANEGRA-BERNAL M H, MATOVIC B. Dense and near-net-shape fabrication of Si₃N₄ ceramics[J]. *Materials Science and Engineering:A*, 2009, 500(1/2): 130-149.
- [2] 赵明亮, 陈松, 孙峰, 等. Si₃N₄陶瓷材料晶界特征分布研究[J]. *物理学报*, 2021, 70(22): 254-265.
ZHAO Mingliang, CHEN Song, SUN Feng, et al. Grain boundary character distributions in Si₃N₄ ceramics[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(22): 254-265.
- [3] 崔雪峰, 李建平, 李明星, 等. 氮化物基陶瓷高温透波材料的研究进展[J]. *航空材料学报*, 2020, 40(1): 21-34.
CUI Xuefeng, LI Jianping, LI Mingxing, et al. Research progress of nitride based ceramic high temperature wave transparent materials[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2020, 40(1): 21-34.
- [4] 张同鑫, 李权. 对抗高超声速武器的机载激光武器发展研究[J]. *航空科学技术*, 2016, 27(3): 5-8.
ZHANG Tongxin, LI Quan. Research on the development of airborne laser weapons against hypersonic weapons[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2016, 27(3): 5-8.
- [5] KAUSHAL H, KADDOUM G. Applications of lasers for tactical military operations[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 20736-20753.
- [6] 孙铭远, 张昊春, 曲博岩, 等. 激光辐照下卫星筒体部分

- 多物理建模及毁伤效应分析[J]. *应用光学*, 2021, 42(3): 542-549.
- SUN Mingyuan, ZHANG Haochun, QU Boyan, et al. Multi-physical modeling and damage effect analysis of satellite cylinders under laser irradiation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(3): 542-549.
- [7] 王克强. 抗激光损伤复合陶瓷的研制[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- WANG Keqiang. Preparation of laser damage resistant ceramic composite[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [8] PEDARNIG J D, KOLMHOFFER P, HUBER N, et al. Element analysis of complex materials by calibration-free laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Applied Physics A*, 2013, 112(1): 105-111.
- [9] STARKEY R P, LEWIS M J, et al. Plasma telemetry in hypersonic flight[C]//International Telemetering Conference Proceedings. Washington: International Foundation for Telemetering, 2002: 1-10.
- [10] GRIEM H R. Plasma spectroscopy[M]. New York: McGraw-Hill, 1964: 2-579.
- [11] CHEN Minhao, LI Wei, YANG Chunping. Rapid recognition of laser-induced breakdown spectrum in laser damage[J]. *Journal of Physics:Conference Series*, 2020, 1507(7): 072026.
- [12] HAFEZ M A, KHEDR M A, ELAKSHER F F, et al. Characteristics of Cu plasma produced by a laser interaction with a solid target[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2003, 12(2): 185-198.
- [13] De GIACOMO A, HERMANN J. Laser-induced plasma emission: from atomic to molecular spectra[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(18): 183002-1-17.
- [14] KHAN S, BASHIR S, HAYAT A, et al. Laser-induced breakdown spectroscopy of tantalum plasma[J]. *Physics of Plasmas*, 2013, 20(7): 073104.
- [15] YE Ying, TAN Yong, JIN Guangyong. Accurate measurement for damage evolution of ceramics caused by nanosecond laser pulses with polarization spectrum imaging[J]. *Optics Express*, 2019, 27(11): 16360-16376.
- [16] 杨福家. 原子物理学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 29-53.
- YANG Jiafu. Atomic physics[M]. 4th edition. Beijing: Higher Education Press, 2008: 29-53.
- [17] CAI Pengcheng, LI Shuang, SHI Jing, et al. Inversion of spectral information obtained during hypersonic impact[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(2): 291-295.
- [18] LIU L, HUANG X, LI S, et al. Laser-induced breakdown spectroscopy enhanced by a micro torch[J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): 15047.
- [19] KONJEVIĆ N, LESAGE A, FUHR J R, et al. Experimental stark widths and shifts for spectral lines of neutral and ionized atoms[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2002, 31(3): 819-927.
- [20] 宋黎浩. 等离子鞘套下高超声速飞行器载雷达目标探测研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- SONG Lihao. Research on hypersonic vehicle-borne radar target detection under plasma sheath[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.