

# 大能量灯泵浦双掺杂 YAG 脉冲激光器

余新海<sup>1</sup>, 尹中亚<sup>2\*</sup>, 尹曰雷<sup>2</sup>, 宋家豪<sup>2</sup>, 秦瑞希<sup>3</sup>

1. 安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001

2. 合肥综合性国家科学中心能源研究院, 安徽省能源实验室, 安徽 合肥 230051

3. 电能高效高质转化全国重点实验室, 合肥工业大学, 安徽 合肥 230009

DOI:10.61369/EPTSM.2025030003

**摘要 :** 实现焦耳级输出是脉冲激光器的发展趋势。搭建了一种焦耳级大能量灯泵浦双掺杂 YAG 脉冲激光器。该激光器采用双掺 Nd: Ce: YAG 晶体作为工作介质, 利用 Ce<sup>3+</sup> 的能量吸收与转移机制提高泵浦光的利用效率。基于四能级系统的速率方程组, 推导出激光器的输出能量表达式。通过在谐振腔内引入伽利略式望远镜, 增大了基膜体积, 减小了光束发散角。在不同重复频率下, 实验测量了激光器的输出能量, 结果与理论模拟基本吻合。最终, 该激光器实现了重复频率为 10Hz、单脉冲能量为 30 J、峰值功率为 75 kW、平均功率为 300 W、光束发散角为 1.75mrad、光束参数乘积为 1.75mm · mrad 的激光输出。单脉冲激光成功打穿了 1 mm 厚度的金属板。

**关键词 :** 焦耳级; 大能量脉冲激光器; 灯泵浦; Nd: Ce: YAG; 望远镜

## High-Energy Lamp Pumped Double-Doped YAG Pulsed Laser

Yu Xinhai<sup>1</sup>, Yin Zhongya<sup>2\*</sup>, Yin Yuelei<sup>2</sup>, Song Jiahao<sup>2</sup>, Qin Ruixi<sup>3</sup>

1. Anhui University of Science and Technology College of Electrical and Information Engineering, Huainan, Anhui 232001

2. Energy Research Institute of Hefei Comprehensive National Science Center Anhui Energy Laboratory, Hefei, Anhui 230051

3. State Key Laboratory of High-Efficiency and High-Quality Conversion for Electric Power Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009

**Abstract :** Achieving joule-level output is the development trend for pulsed lasers. A joule-level high-energy lamp-pumped, dual-doped YAG pulsed laser has been developed. The laser uses a double-doped Nd: Ce: YAG crystal as the gain medium and improves the pump light utilization efficiency by utilizing the energy absorption and transfer mechanism of Ce<sup>3+</sup>. Based on the rate equations of the four-level system, the output energy expression of the laser is derived. A Galileo-type telescope was introduced into the resonator to increase the base mirror volume and reduce the beam divergence angle. The output energy of the laser was measured at different repetition rates, and the experimental results were in good agreement with the theoretical simulation. Finally, the laser achieved a laser output with a repetition frequency of 10 Hz, a single-pulse energy of 30 J, a peak power of 75 kW, an average power of 300 W, a beam divergence angle of 1.75mrad, and a beam parameter product of 1.75mm · mrad. The single-pulse laser successfully perforated a 1 mm thick metal plate.

**Keywords :** joule-level; high-energy pulse laser; lamp pumping; Nd: Ce: YAG; telescope

大能量脉冲激光器凭借其高脉冲能量输出, 广泛应用于深度打孔、激光测距、激光清洗和表面改性处理等制造加工领域<sup>[1-4]</sup>。目前该类激光器的发展趋势是实现几十焦耳和几百焦耳的高脉冲能量输出<sup>[5]</sup>。尽管 LD 泵浦已成为国内外脉冲激光器的主要泵浦源, 但与灯泵浦相比, 采用 LD 泵浦的主振荡器输出能量通常仅为毫焦耳级, 需经过多级放大才能来实现焦耳级输出<sup>[6]</sup>。此外, 基于闪光灯泵浦的自由振荡脉冲激光器可以在 10 μs 的振荡周期内实现超过 10<sup>5</sup> W 的泵浦功率, 成本仅为几千美元, 而若采用 LD 泵浦, 需要 10<sup>4</sup> ~ 10<sup>5</sup> 个二极管阵列, 总成本可达数十万美元<sup>[7]</sup>。鉴于此, 灯泵浦激光器仍是满足大能量输出需求下的一种重要选择。

钇铝石榴石 (YAG) 是目前应用最广泛的激光工作物质之一<sup>[8]</sup>。Nd<sup>3+</sup> 因具有较小的量子亏损、低激光阈值和较大的发射截面等优点, 使得 Nd: YAG 晶体在大能量脉冲激光器中得到广泛应用。文献 [9] 报道的高功率 Nd: YAG 脉冲激光器经抽运功率放大后, 输出能

项目信息: 高功率大能量氙灯脉冲激光器关键热管理技术研究, 项目编号: 2024KF004。

作者简介: 余新海 (2001.09-), 男, 汉族, 安徽六安人, 学历: 硕士研究生在读, 研究方向: 大能量固体脉冲激光器。

通讯作者: 尹中亚 (1996.01-), 男, 汉族, 安徽淮南人, 学历: 博士研究生在读, 研究方向: 大能量固体脉冲激光器, 邮箱: 17855337246@163.com。

量仅为1.2 J。文献[10]报道的灯泵6根Nd: YAG的脉冲激光器，尽管光束质量很高，单光束发散角小于1.7mrad，但经合束后输出能量仅为1.53 J。文献[11]报道的高功率高光束质量灯泵浦脉冲Nd: YAG激光器，单脉冲能量达到10 J，但光束发散角为17mrad，光束参数乘积为12.7mm · mrad。目前，常用的Nd: YAG晶体对短波长泵浦光的能量利用效率较低。为此，文献[12]提出了双掺Nd: Ce: YAG晶体的方案。在该方案中，Nd<sup>3+</sup>不仅能够有效吸收泵浦光，掺入的Ce<sup>3+</sup>还能够吸收短波长的光。针对上述问题，本文搭建了一种基于双掺Nd: Ce: YAG晶体的大能量灯泵浦脉冲激光器，实现了单脉冲能量高达30 J、光束发散角为1.75mrad、光束参数乘积为1.75mm · mrad的激光输出。在实现大能量脉冲输出的同时，仍保持了较高的光束质量。

## 一、理论分析

在Nd: Ce: YAG晶体介质的工作过程中，Ce<sup>3+</sup>与Nd<sup>3+</sup>之间具有辐射能量转换和非辐射能量转换两个过程，如图1所示<sup>[13-15]</sup>。

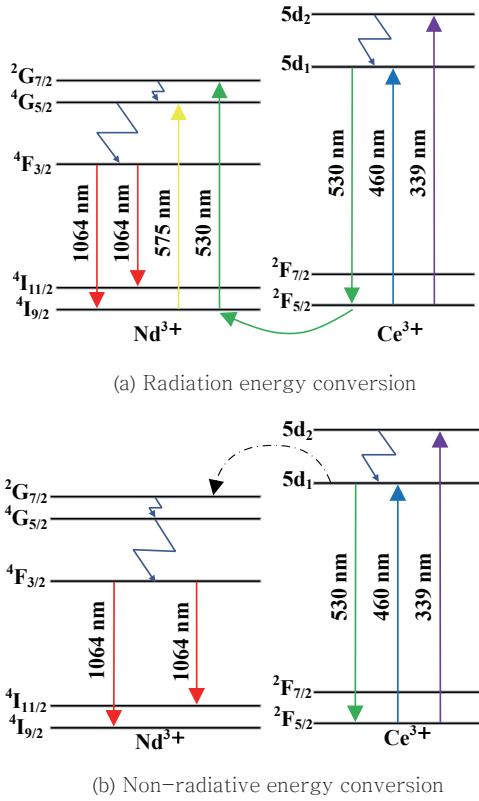


Fig.1 The energy conversion process between Ce<sup>3+</sup> and Nd<sup>3+</sup>

图1 Ce<sup>3+</sup>与Nd<sup>3+</sup>之间能量转换过程

图1(a)为晶体中Ce<sup>3+</sup>与Nd<sup>3+</sup>之间辐射能量转换过程，在5d<sub>2</sub>能级上的Ce<sup>3+</sup>容易弛豫到5d<sub>1</sub>能级，5d<sub>1</sub>能级上的Ce<sup>3+</sup>通过辐射能跃迁至基态<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>，并发出530 nm附近的荧光，而Ce<sup>3+</sup>在该波段的荧光又恰好与Nd<sup>3+</sup>的<sup>4</sup>I<sub>9/2</sub>→<sup>2</sup>G<sub>7/2</sub>的吸收带重合，能量被Nd<sup>3+</sup>吸收后继续产生能级跃迁，发出1064 nm激光。图1(b)为晶体中Ce<sup>3+</sup>与Nd<sup>3+</sup>之间非辐射能量转换过程，部分Ce<sup>3+</sup>将能量转移给<sup>2</sup>G<sub>7/2</sub>能级上的Nd<sup>3+</sup>，受到激发的Nd<sup>3+</sup>弛豫至<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>能级，最后经过跃迁发出1064 nm激光。所以双掺杂YAG晶体对泵浦光的利用率更高。Nd: Ce: YAG激光器是四能级系统，通过简化脉冲激光器的速率方程组，可以得到激光输出能量表达式<sup>[16-17]</sup>。激光电源中储能电容充电后再放电给单根脉冲氙灯的电能量为E，由氙灯外加电压U<sub>i</sub>、氙灯放电终止电压U<sub>e</sub>及脉冲电源主电容量C决定，而

氙灯的外加电压远大于其放电终止电压，本文采用四氙灯泵浦，则总输入氙灯的总电能为：

$$E_i = 4E = 2C(U_i^2 - U_e^2) \approx 2CU_i^2 \quad (1)$$

四能级系统中，下能级无辐射跃迁到基态的粒子数密度n<sub>1</sub>可近似为零，此时上能级粒子数密度n<sub>2</sub>就是反转粒子数密度Δn。当跃迁时间t小于反转粒子数密度达到阈值的时间T<sub>th</sub>时，腔内光子数密度φ为零，则上能级粒子数密度n<sub>2</sub>随t的变化为：

$$\frac{dn_2}{dt} = \frac{\alpha E_i}{Vh\nu_p T} - \frac{n_2}{\tau_2} = \frac{2CU_i^2 \alpha}{slh\nu_p T} - \frac{n_2}{\tau_2} \quad (2)$$

其中：α为泵浦到上能级粒子数所吸收的能量占输入能量的比例；V为激活介质在光束截面内的体积；hν<sub>p</sub>为泵浦光子能量；α/Vhν<sub>p</sub>为单位能量泵浦到激光上能级的粒子数密度；T是激光脉冲时间；S为光束横截面积；L为晶体长度；τ<sub>2</sub>为激光上能级粒子数寿命。对(2)进行积分，得

$$\int_0^{\Delta n_{th}} \frac{1}{\frac{2CU_i^2 \alpha \tau_2}{Slh\nu_p T} - n_2} dn_2 = \int_0^{T_{th}} \frac{1}{\tau_2} dt \quad (3)$$

则反转粒子数密度Δn达到阈值Δn<sub>th</sub>的时间T<sub>th</sub>为：

$$T_{th} = -\tau_2 \ln\left(1 - \frac{SLh\nu_p \Delta n_{th} T}{2CU_i^2 \alpha \tau_2}\right) \quad (4)$$

当t>T<sub>th</sub>时，上能级粒子数密度n<sub>2</sub>和腔内光子数密度φ满足的速率方程为：

$$\begin{cases} \frac{dn_2}{dt} = \frac{2CU_i^2 \alpha}{Slh\nu_p T} - \Delta n \sigma c \varphi - \frac{n_2}{\tau_2} \\ \frac{d\varphi}{dt} = \Delta n \sigma c \varphi - \frac{\varphi}{\tau_R} \end{cases} \quad (5)$$

其中，c为光在YAG晶体中的传播速度；σ为粒子发射截面积；而腔内光子寿命τ<sub>R</sub>为：

$$\tau_R = \frac{t_r}{\ln\left(\frac{1}{R}\right) + \gamma} \quad (6)$$

t<sub>r</sub>为光在晶体中往返一周的时间，t<sub>r</sub>=2L/c；R为输出镜的反射率；γ为腔内的损耗。将速率方程组(5)相加并积分得

$$\int_0^0 d\varphi + \int_{\Delta n}^{\Delta n_{th}} dn_2 = \int_{T_{th}}^T \frac{2CU_i^2 \alpha}{Slh\nu_p T} dt - \int_{T_{th}}^T \frac{\varphi}{\tau_R} dt - \int_{T_{th}}^T \frac{n_2}{\tau_2} dt \quad (7)$$

由于自发辐射，反转粒子数密度Δn近似于反转粒子数密度阈值Δn<sub>th</sub>，再把(6)代入(7)可得

$$\int_{T_{th}}^T \varphi dt = \frac{2L \left( 2CU_i^2 \alpha - \frac{\Delta n_{th}}{\tau_2} \right) (T - T_{th})}{c \left[ \ln\left(\frac{1}{R}\right) + \gamma \right]} \quad (8)$$

而输出能量满足

$$E_o = \int_{T_{th}}^T P_o dt = \int_{T_{th}}^T \frac{Schv}{2} \varphi \ln\left(\frac{1}{R}\right) \quad (9)$$

将(4)和(8)代入(9)可得

$$E_o = \frac{\alpha v}{v_p} \left( 2CU_i^2 - \frac{T}{\tau_2} \cdot \frac{SLhv_p \Delta n_{th}}{\alpha} \right) \left[ 1 + \frac{\tau_2}{T} \cdot \ln\left( 1 - \frac{\tau_2}{T} \cdot \frac{SLhv_p \Delta n_{th}}{2CU_i^2 \alpha} \right) \right] \frac{\ln\left(\frac{1}{R}\right)}{\ln\left(\frac{1}{R}\right) + \gamma} \quad (10)$$

其中  $v$  是激光频率。对于长脉冲激光器,  $T \gg \tau_2$ 。此时:

$$1 + \frac{\tau_2}{T} \cdot \ln\left( 1 - \frac{\tau_2}{T} \cdot \frac{SLhv_p \Delta n_{th}}{2CU_i^2 \alpha} \right) \rightarrow 1 \quad (11)$$

反转粒子数密度阈值为

$$\Delta n_{th} = \frac{\ln\left(\frac{1}{R}\right) + \gamma}{2\sigma L} \quad (12)$$

将(11)和(12)代入(10)得激光输出能量表达式为:

$$E_o = \frac{\alpha v}{v_p} \left( 2CU_i^2 - \frac{TSLhv_p}{\alpha \tau_2} \cdot \frac{\ln\left(\frac{1}{R}\right) + \gamma}{2\sigma L} \right) \left[ \frac{\ln\left(\frac{1}{R}\right)}{\ln\left(\frac{1}{R}\right) + \gamma} \right] \quad (13)$$

## 二、大能量脉冲激光器结构

大能量脉冲激光器主要由激光电源、激光聚光腔和激光谐振腔组成, 如图2所示。

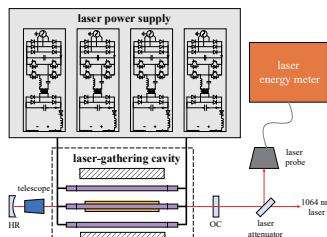


Fig.2 大能量脉冲激光器结构图

图2 大能量脉冲激光器结构图

激光电源系统主要由整流网络、充电网络和放电网络等组成, 电源可实现1~10 Hz调频<sup>[18]</sup>, 如图3所示。整流网络采用三相无控整流拓扑, 由全桥整流二极管D<sub>1~6</sub>把市电网提供的交流电整流滤波为直流电, C<sub>1</sub>是储能电容; 充电网络采用串联LC谐振变换器拓扑, 主要由开关器件Q<sub>1~4</sub>、谐振电容C<sub>r</sub>、谐振电感L<sub>r</sub>、高频变压器T、全桥整流二极管D<sub>7~10</sub>组成, 在充电期间能够实现储能电容器的恒流充电并达到充电电压的预设值; 放电网络选择晶闸管触发的LC放电电路, 由储能电容C<sub>2</sub>、功率晶闸管和放电电感L组成, 可实现单次高脉冲电能输出。

激光聚光腔为氙灯与晶体之间提供良好耦合, 决定着晶体上泵浦光的分布。传统上腔体的反射层采用玻璃或金属材料, 但这类腔体往往导致泵浦光的不均匀分布。相比之下, 陶瓷材料具有良好的化学稳定性、耐高温性和光漫反射特性等优点<sup>[19]</sup>。本文采用了四氙灯泵浦单晶体棒的陶瓷聚光腔, 如图4所示。外壳能够有效地保护反射层免受损坏; 反射层具有高反射率, 最大限度地确

保泵浦光能够作用于晶体棒上; 石英层则起到隔离水流和透过光线的作用。

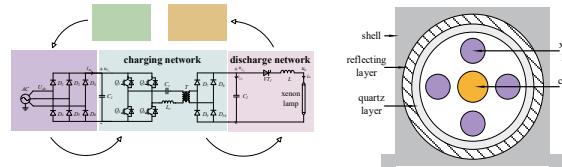


Fig.3 Laser power supply system

Fig.3 Laser condenser side view

图3 激光源系统

图4 激光聚光腔侧视图

激光谐振腔采用望远镜型设计, 如图5所示。具体而言, 在腔内插入望远镜进行扩束, 通过利用晶体棒边缘抑制高阶模的振荡, 实现光束整形匹配。增大激活介质处的光斑大小, 充分利用激活介质, 降低光束发散角, 提高光束质量<sup>[20]</sup>。其中, HR为平凹高反射率球面镜, 曲率半径为R; F<sub>1</sub>和F<sub>2</sub>分别为焦距f<sub>1</sub>的平凹透镜和焦距f<sub>2</sub>的平凸透镜, 它们构成了放大倍数为M的伽利略式望远镜; 晶体棒的长度为165 mm, 折射率为1.82; OC为平面耦合输出镜, 透过率为T。使用reZonator软件进行模拟计算, 分析高斯光束在谐振腔内传输过程。考虑到实际实验中光学元件占用的空间, 对谐振腔内各光学元件的参数及间距进行了优化。最终取R=2000mm, L<sub>1</sub>=80mm, F<sub>1</sub>=-50mm, F<sub>2</sub>=100mm, L<sub>2</sub>=50mm, M=2, L<sub>3</sub>=150 mm, L<sub>4</sub>=150 mm, T为90%。平凹谐振腔和望远镜谐振腔内高斯光束变化如图6所示, 激光晶体中心位于谐振腔内约360mm处。可以看出在腔内插入望远镜后, 晶体棒中的基模体积明显增大。

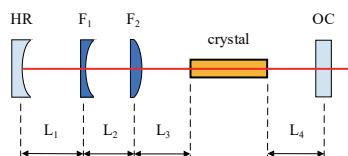


Fig.5 telescope resonator

Fig.6 Gaussian beam variation in the resonator

图5 望远镜谐振腔

图6 谐振腔内高斯光束变化

## 三、实验结果与分析

分别采用单掺Nd: YAG晶体和双掺Nd: Ce: YAG晶体作为工作物质, 如图7所示。当电压设定为300 V, 重复频率设定为1Hz时均未产生振荡, 无激光输出。电压间隔设为10 V, 逐步增压。当双掺Nd: Ce: YAG晶体作为工作物质时, 在输入电压达到330 V时, 能够检测到有微弱的激光输出, 此时输出能量为0.044 J, 因此可以确定双掺Nd: Ce: YAG激光器阈值电压约为330 V。相较之下, 单掺Nd: YAG激光器的阈值电压约为400 V, 此时输出能量为0.027 J。然后, 设定初始电压为300 V, 电压间隔为100 V, 最大电压为1500 V, 重复频率为1 Hz。在每个电压点上, 均测量了多个单脉冲的能量并取平均值, 以提高测量的准确性, 实验结果如图8所示。可以看出, 随着输入电压的增加, 双掺杂YAG激光器输出的能量更高。当输入电压为1500 V时, 双掺

Nd: Ce: YAG 激光器实现了单脉冲 30.46 J 的高能激光输出，而单掺 Nd: YAG 激光器仅 18.72 J。



Fig.7 Nd : YAG (purple) and Nd : Ce : YAG (yellow)

Fig.8 Output energy comparison

图7 Nd: YAG(紫)和Nd: Ce: YAG(黄)

图8 输出能量对比

随后，测试了双掺 Nd: Ce: YAG 激光器在不同重复频率下测的激光输出能量，结果如图9所示。在设定激光电源电压为 1500 V、重复频率为 10 Hz 的条件下，激光器的输出单脉冲能量约为 30 J，平均功率为 300 W，峰值功率达到 75 kW（激光脉冲宽度约为 400 μs）。由于在 1 Hz 到 10 Hz 的频率范围内，热累积效应较小，因此不同频率下输出能量近似相等。测试结果与模拟分析的趋势基本一致，如图 10 所示。

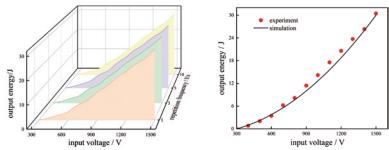


Fig.9 Output energy relationship diagram of double-doped YAG laser

Fig.10 The test results are compared with the simulation analysis

图9 双掺 YAG 激光器输出能量关系图

图10 测试结果与模拟分析对比

为了测试单脉冲激光的输出能力，设置输入电压 1500V，重复频率 1Hz。利用感光相纸成像法，获取了距离激光输出镜面 0.1 m 和 2.1 m 的光斑图像，如图 11 所示。图 A 和图 B 分别是采用平凹谐振腔时距离激光输出镜面 0.1 m 和 2.1 m 的光束光斑，图 C 和图 D 是在谐振腔内插入望远镜后在该处的光斑图像。为使实验结果准确，分别在两处获取多个光斑并取平均值。经计算可得未插入望远镜时光束发散角为 5.12mrad，插入望远镜后光束发散角为 1.75mrad。可以看出插入望远镜后，有效减小了激光光束发散角。在距离输出镜 0.1m 处放置焦距为 1m 的聚焦镜，聚焦镜焦点处放置 1mm 厚钢板。如图 12 所示，激光单脉冲打穿了钢板，孔在 x 和 y 方向的长度均小于 2mm。则激光束腰半径近似为 1mm，光束参数乘积约为 1.75mm · mrad。此方法测算的结果较真值大，实际真值要优于此结果。

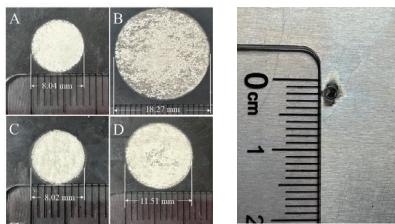


Fig.11 The laser spots are 0.1 m and 2.1 m away from the output mirror

Fig.12 Laser focus strikes steel plate 1m away

图11 距离输出镜 0.1 m 和 2.1 m 激光光斑；

图12 激光聚焦打击 1m 远处钢板

## 四、结论

本文搭建了一种大能量灯泵浦双掺杂 YAG 脉冲激光器。通过理论分析与实验研究相结合，验证了双掺杂晶体的优势。激光器的输出能量从单掺 Nd: YAG 晶体的 18.72 J 提高至双掺 Nd: Ce: YAG 晶体的 30.46 J。通过在谐振腔中引入望远镜以增大基模体积，将光束发散角由平凹谐振腔的 5.12mrad 减小至望远镜谐振腔的 1.75mrad。最终，在 10 Hz 重复频率下，激光器实现了单脉冲能量 30 J、峰值功率 75 kW、平均功率 300 W 及光束参数乘积 1.75mm · mrad 的输出性能。此外，本文所搭建的激光器还能够为放大级激光器提供稳定的能量脉冲种子光源。未来的研究将以此激光器为主振荡级，通过增加放大级进一步提升激光器的输出能量至百焦级。

## 参考文献

- [1] Mishra YK, Gupta SK, Mishra S, et al. Laser beam drilling of fiber-reinforced composites using Nd: YAG and CO<sub>2</sub> laser: A review [J]. Materials Today: Proceedings, 2023.
- [2] 杨熙航, 周子涵, 王志敏, 等. 大能量短纳秒脉冲 Nd: YAG 激光 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(9): 327–331.
- [3] 郭斌, 徐杰, 苏轩. 大能量高重频脉冲激光智能清洗技术与装备 (特邀) [J]. 红外与激光工程, 2023, 52(2): 16–19.
- [4] LU, W.Q., LIU, Y.J., WU, X., et al. Corrosion and passivation behavior of Ti-6Al-4V surfaces treated with high-energy pulsed laser: A comparative study of cast and 3D-printed specimens in NaCl solution [J]. Surface & Coatings Technology, 2023, 470.
- [5] GARANIN, S.G., DERKACH, V.N., MAKAROV, K.N., et al. Current Trends in the Creation of High-Energy Repetitively Pulsed Continuous Wave Lasers [J]. Doklady Physics, 2023, 68(12): 401–409.
- [6] 王运谦, 秘国江, 杜涛, 等. 高峰值功率大能量 Nd: YAG 激光器 [J]. 激光与红外, 2003, 33(3): 188–189, 191.
- [7] 杜秀兰, 吴峰. 固体激光器的灯泵浦和二极管泵浦方式比较 [J]. 应用光学, 2004, 25(3): 37–40.
- [8] 赵呈春, 李善明, 徐民, 等. 激光晶体研究进展 [J]. 中国激光, 2024, 51(11): 379–404.
- [9] 汪超, 韦辉, 周丽, 等. 10Hz, 1.2J 脉冲波形近方波的纳秒 Nd: YAG 激光器 [J]. 中国激光, 2017, 44(8): 60–66.
- [10] WANGW., YANGS., ZHAOQ., et al. Electro-optical Q-switched laser array with one lamp pumping six Nd: YAG rods for programmable laser reconstruction in space-power-time domains [J]. Optics & Laser Technology, 2024, 179.
- [11] 王宝华, 李强, 姜梦华, 等. 高功率高光束质量脉冲 Nd: YAG 激光器 [J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(5): 663–666.
- [12] 赵振宇, 聂劲松, 秦树军. 双掺 Nd: Ce: YAG 晶体激光输出特性 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(4): 911–914.
- [13] T. SAIKI, T. IWASHITA, J. SAKAMOTO, et al. Rod-Type Ce/Cr/Nd: YAG Ceramic Lasers with White-Light Pump Source [J]. International Journal of Optics, 2022, 2022(Pt.1): 8480676–1–8480676–10.
- [14] 张佳, 赵长明, 蔡子韬, 等. Nd: YAG、Cr: Nd: YAG 及 Ce: Nd: YAG 在太阳光泵浦下的光谱匹配研究 [J]. 中国激光, 2023, 50(13): 1–8.
- [15] TAI, YUPING, ZHENG, GUOJUN, WANG, HUI, et al. Near-infrared quantum cutting of Ce<sup>3+</sup>-Nd<sup>3+</sup> co-doped Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> crystal for crystalline silicon solar cells [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology, A, Chemistry, 2015, 303/304: 80–85.
- [16] 王伶俐, 赵友全, 翟瑞伟, 等. 基于光斑成像的脉冲氙灯发光特性分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(6): 122–128.
- [17] 张行愚, 赵圣之, 王青圃. 固体脉冲激光器输出能量的普遍表达式 [J]. 光电子. 激光, 1999, 10(5): 408–410.
- [18] 李贺龙, 徐健, 杨之青, 等. 大功率高能脉冲激光电源设计 [J]. 强激光与粒子束, 2024, 36(5): 56–61.
- [19] 李仁兴, 施江澜. 陶瓷材料应用于激光聚光腔的实验研制 [J]. 激光与红外, 2005, 35(5): 338–340.
- [20] 李雪鹏, 杨晶, 童兴伟, 等. 百瓦级近衍射极限 VCSEL 泵浦激光器 [J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(8): 23–28.