

文章编号: 1001-3806(2018)01-0034-05

25kHz、约2ns声光调Q Nd:YVO₄激光器研究

李燕凌¹, 贾凯¹, 顾宪松^{2*}, 郭嘉伟¹, 高恒¹, 王霞²

(1. 西南技术物理研究所, 成都 610041; 2. 北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为了获得高重频窄脉冲高光束质量激光输出, 采用 LD 抽运 Nd:YVO₄ 晶体声光调 Q 方案, 进行了相关理论分析和实验验证, 振荡级获得了重频 25kHz、单脉冲能量 22.4μJ、脉冲宽度 2.19ns、光束质量因子 $M^2 < 1.2$ 的种子激光, 光光转换效率为 24.3%; 放大级获得了重频 25kHz、单脉冲能量 585μJ、脉冲宽度 2.26ns、光束质量因子 $M^2 < 1.7$ 的激光输出, 提取效率为 15.6%。结果表明, 采用 LD 抽运 Nd:YVO₄ 晶体声光调 Q 方案能够获得高重频、窄脉冲、高光束质量激光输出, 其实验现象与理论计算结果较为符合。

关键词: 激光器; 高重频; 窄脉冲; 声光调 Q

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.01.007

Study on an acousto-optical Q-switched Nd:YVO₄ laser with 25kHz repetition rate and about 2ns pulse duration

LI Yanling¹, JIA Kai¹, GU Xiansong², GUO Jiawei¹, GAO Heng¹, WANG Xia²

(1. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China; 2. Key Laboratory of Photo Electronic Imaging Technology and System, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to achieve laser output with high repetition rate, short pulse duration and high beam quality, a LD pumped acousto-optically Q-switched Nd:YVO₄ solid-state laser was designed and set up. In the lasing experiments, the seed laser with an excellent beam quality was obtained from the master oscillator. The parameters of the seed laser are 25kHz repetition, 22.4μJ pulse energy, 2.19ns pulse duration, 24.3% optical-to-optical conversion efficiency and $M^2 < 1.2$. The output laser from the power amplifier is with 25kHz repetition, 585μJ pulse energy, 2.26ns pulse duration, 15.6% extraction efficiency and $M^2 < 1.7$. The result shows that laser output with high repetition rate, short pulse duration and high beam quality could be achieved by LD pumped acousto-optically Q-switched Nd:YVO₄ lasers and the experimental results are almost in accordance with the theoretical calculation results.

Key words: lasers; high repetition; short pulse; acousto-optically Q-switched

引言

目前, 基于盖革模式雪崩光电二极管 (Geiger-mode avalanche photo diode, GM-APD) 面阵探测器组件的非扫描式激光主动成像雷达是国际公认的最具发展潜力的 3 维成像探测技术^[1]。由于激光主动成像雷达要求具有高的距离分辨率, 而成像雷达的测距定时电路集成于 APD 面阵探测器组件内, 受电路集成度影响, 要求照射激光脉冲具有窄的脉冲宽度; 同时, 基于 GM-APD 面阵探测器的非扫描式激光主动成像雷达要求多脉冲累计成像探测, 因此需要具有高重频、窄脉冲

输出特性的激光光源^[2-3]。由于 Nd:YVO₄ 晶体具有较短的荧光寿命及较大的受激发射截面, 因此特别适合作为高重频、窄脉冲固体激光器的增益介质。

国内外在高重频、窄脉冲、调 Q 固体激光器领域已经开展了大量研究^[4-15]。其中, ZAYHOWSKI 和 DILL 等人于 1992 年利用电光调 Q 实现了重频 5kHz、脉宽 270ps、单脉冲能量 6.85μJ 激光输出^[4]。1993 年, PLAESSMANN 和 YAMADA 等人采用总长为 7mm 的谐振腔、3.2mm 厚的 TeO₂ 声光开关用于实现高重频、窄脉冲激光脉冲输出^[5]。2003 年, 美国林肯实验室基于被动调 Q 微片固体激光器成功开发了激光主动成像系统用的三代高重频、窄脉冲激光器, 其输出激光指标为数千赫瓦、单脉冲能量数十微粒、脉冲宽度为亚纳秒量级^[6]。2016 年, 中国科学院西安光学精密机械研究所 WANG 等人报道了 LD 端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体 RbTiOPO₄ (RTP) 电光调 Q 激光器, 在重复频率

作者简介: 李燕凌 (1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 现主要从事高重频固体激光器的研究。

* 通讯联系人。E-mail: emperorgxs@sina.com

收稿日期: 2017-03-09; 收到修改稿日期: 2017-04-01

5kHz 时,获得了脉宽 1.0ns、平均功率 1.22W 的窄脉冲输出;在重复频率 20kHz 时,获得了脉宽 2.2ns,平均功率 2.67W 的调 Q 脉冲输出^[7]。

本文中设计的高重频、窄脉冲激光器采用了主振荡功率放大(master oscillator power amplifier, MOPA)结构。振荡级采用半导体激光器(laser diode, LD)端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体,通过短腔长、声光调 Q 方案实现了具有高光束质量的高重频、窄脉冲种子激光输出;放大级采用 LD 双端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体,种子激光单次通过 Nd:YVO₄ 晶体,最终获得了重复频率 25kHz、脉冲宽度 2.26ns、平均功率 14.6W 的激光输出。

1 高重频窄脉冲激光器设计

1.1 振荡级设计

由于 Nd:YVO₄ 晶体具有较大的发射截面,且荧光寿命较短,因此特别适合作为高重频、窄脉冲固体激光器的增益介质。增益介质对抽运功率的吸收满足如下关系:

$$P_{ab} = P_0 [1 - \exp(\alpha l)] \quad (1)$$

式中, P_0 代表注入抽运功率, P_{ab} 表示增益介质吸收的抽运功率, α 为吸收系数, l 为增益介质吸收长度。对于掺杂原子数分数为 0.005 的 Nd:YVO₄ 晶体,其吸收系数约为 15.8cm^{-1} @ 808nm;而对于掺杂原子数分数为 0.01 的 Nd:YVO₄ 晶体,其吸收系数约为 31.4cm^{-1} @ 808nm。由此可知,选用长度为 3mm 的、掺杂原子数分数为 0.005 的 Nd:YVO₄ 晶体或长度为 1.5mm 的、掺杂原子数分数为 0.01 的 Nd:YVO₄ 晶体,便可实现对抽运功率的充分吸收。本文中选用尺寸为 $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 3\text{mm}$ 的、掺杂原子数分数为 0.005 的 Nd:YVO₄ 晶体,其好处在于可以使得增益介质内部抽运分布较为均匀,并且增大了散热面积,有利于激光晶体长时间可靠工作。同时,考虑到端面晶体具有更佳的热性能,因此,作者设计中在 Nd:YVO₄ 晶体后端面键合了厚度为 1mm 的 YVO₄ 晶体。

调 Q 固体激光器主要通过短腔长及高功率密度抽运的方式实现窄脉冲激光输出。为了缩短谐振腔长度,在键合晶体的前端面镀 HR@1064nm、AR@808nm 膜层作为谐振腔腔镜;为了提高抽运光注入功率密度,采用带尾纤 LD 端面小口径抽运 Nd:YVO₄ 晶体。同时,为了获得高重频激光输出,并提高激光脉冲的能量稳定性,作者采用主动声光调 Q 方案。因此,振荡级由 808nm 带尾纤 LD、抽运光束整形系统、键合 Nd:YVO₄ 晶体、声光开关及输出耦合平面镜所构成,谐振腔光程长度为 35mm,其原理图如图 1 所示。

Nd:YVO₄ 晶体的 1064nm 波段可以用四能级系统

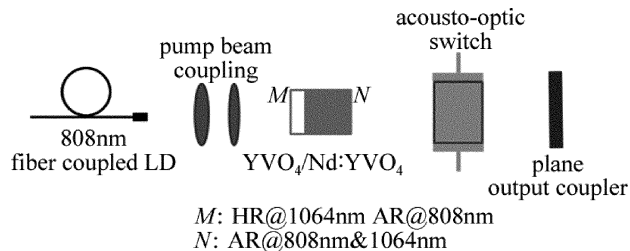


Fig. 1 Sketch of master oscillator

描述,其反转粒子数密度 n 和腔内光子数 ϕ 随时间演化的过程由一组联立的微分方程给出^[16]:

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = -cn\phi\sigma_{21} - \frac{n}{\tau_f} + \omega_p(n_0 - n) \\ \frac{d\phi}{dt} = cn\phi\sigma_{21} - \frac{\phi}{t_c} \end{cases} \quad (2)$$

式中, c 为光速; σ_{21} 为激光发射频率处的受激发射截面; τ_f 为荧光寿命; n_0 为总掺杂粒子数密度; ω_p 为抽运速率。假设抽运光在增益介质内部传输时满足瑞利长度条件,则将抽运速率在长度方向求平均,即可得 $\omega_p = I_0 / (h\nu_p n_0 L)$, 其中 I_0 为抽运功率密度, ν_p 为抽运光频率, h 为普朗克常数, l 为增益介质吸收长度,此处即为晶体长度。 $t_r = 2l/c$ 为光在谐振腔内传输的往返时间; $t_c = t_r / [1 + \ln(1/R)]$ 为腔内光子寿命,其中 L 为谐振腔固有损耗, R 为输出耦合镜反射率。由于要进行声光调制,因此腔内损耗还应包括声光开关的衍射损耗, $\beta(t) = \beta_0 \exp[-(t/t_0)^2]$, 其中 β_0 为声光开关衍射效率, t_0 为渡越时间。

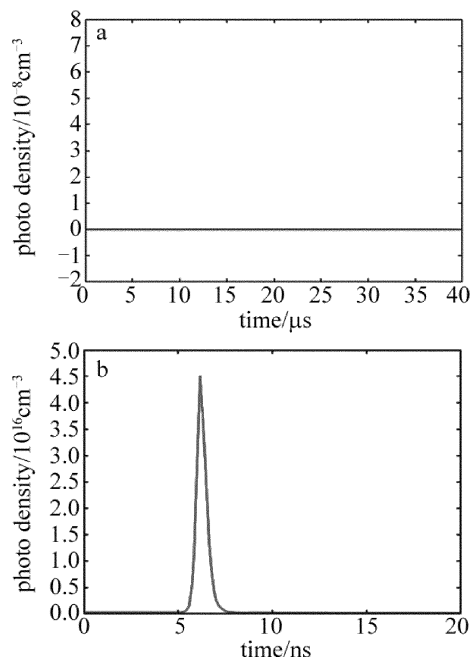


Fig. 2 Pulse waveform with pump intensity of 3500W/cm²
a—energy storage b—excitation

由于声光开关封锁能力有限,因此利用 4 阶龙格-库塔方程求解(2)式,用以模拟声光开关的封锁效果。

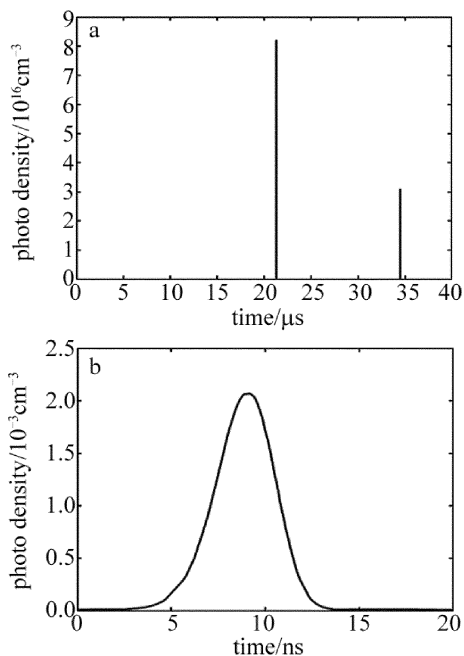


Fig. 3 Pulse waveform with pump intensity of 4000W/cm²
a—energy storage b—excitation

计算参量为:掺杂原子数分数为 0.005 的 Nd:YVO₄ 晶体,其掺杂晶体长度 3mm,谐振腔光程长 35mm,输出耦合镜反射率 60% @ 1064nm,声光开关的衍射效率 80%,开关频率 25kHz,渡越时间 20ns。在抽运功率密度分别为 3500W/cm² 和 4000W/cm² 的情况下,振荡级输出激光的时间波形如图 2 与图 3 所示。

对比图 2 和图 3 可看出,当抽运功率密度为 3500W/cm² 时,声光开关在抽运储能环节可以实现良好的封锁作用;在激发阶段随着腔内 Q 值提高,大量反转粒子被快速消耗,形成巨脉冲输出,此时脉冲宽度为 1.69ns。而当抽运功率密度增至 4000W/cm² 时,声光开关在抽运阶段无法对谐振腔进行有效封锁,在储能环节便有无序脉冲输出;而在激发阶段,由于无序脉冲串消耗了大量的反转粒子,造成激励阶段腔内光子数密度接近于 0,无法获得稳定的输出激光。

由于谐振腔长度较短,为了获得高光束质量种子激光,要求谐振腔内通光口径较小。因此,在设计中作者通过控制增益介质内部的抽运光斑尺寸从而达到控制谐振腔通光口径的目的。由于抽运光斑较小,因而增益介质会产生严重的热焦距。将图 1 中的键合晶体 M 面作为参考面,谐振腔的 ABCD 方程可近似表示为^[17]:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_{th} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_{th} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, L₁ 表示增益介质的光程长度, L₂ 为谐振腔剩余

光程长度, f_{th} 为热焦距。已知键合晶体总长度为 4mm, 因此 L₁ ≈ 10mm, L₂ ≈ 25mm。根据高斯光束 ABCD 定律,晶体内部基模 (TEM₀₀) 与拉盖尔-高斯光束 (TEM_{pl}) 的束腰半径由下式给出:

$$\begin{cases} w_0^2 = \pm \frac{\lambda B \sqrt{4 - (A + D)^2}}{2\pi(1 - AD)} \\ w_{pl}^2 = (2p + l + 1)w_0^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中, w₀ 代表基模束腰半径, w_{pl} 为拉盖尔-高斯光束的束腰半径, p 与 l 代表拉盖尔-高斯光束的阶数, λ = 1.06μm 为激光波长。

图 4 中给出了谐振腔第一稳区内晶体热焦距与束腰半径之间的关系曲线。从图中可知,基模束腰半径在 90μm ~ 117μm, TEM₀₁ 模的束腰半径在 130μm ~ 178μm。将晶体内的抽运光斑半径控制在 120μm ~ 130μm,可以较好地抑制 TEM₀₁ 模式起振,从而获得高光束质量种子激光。综上所述,在声光开关频率 25kHz、衍射效率 80%、输出耦合镜反射率 60% 的情况下,为了获得高光束质量的种子激光,抽运最大功率不能超过 2W。

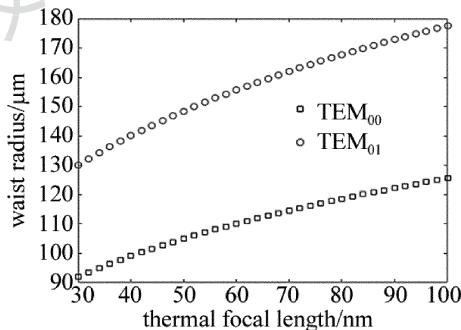


Fig. 4 Relationship between waist radius and thermal focus length

同时,作者分析了抽运功率 2W 时,种子激光脉宽、单脉冲能量与输出耦合镜反射率之间的关系,计算结果如表 1 所示。

Table 1 Parameters of output coupler reflectivity, pulse width and energy

output coupler reflectivity/%	pulse width/ns	energy/μJ	average power/W
50	1.66	35.2	0.88
60	1.69	34.1	0.85
70	1.84	32.4	0.81

1.2 放大级设计

考虑到种子激光的脉冲能量较小,其放大过程属于小信号放大,不利于放大级能量提取。因此,作者仍采用受激发射截面较大的 Nd:YVO₄ 晶体作为放大级的增益介质。为了获得较好的放大效果,作者采用长度较长的低掺杂 Nd:YVO₄ 晶体,其具体参量为:掺杂原子数分数为 0.003,晶体尺寸为 3mm × 3mm × 20mm。为了减小晶体内部的热应力,在晶体两端分别

键合厚度为 2mm 的 YVO₄。由于采用单程放大方案,其光路结构相对简单,如图 5 所示。808nm 带尾纤 LD 经光束整形后双端抽运 Nd:YVO₄ 晶体,种子激光通过转折镜进入放大光路,再由另一块转折镜输出;两块转折镜镀膜法线方向 45° 的 AR@808nm、HR@1064nm 膜层。

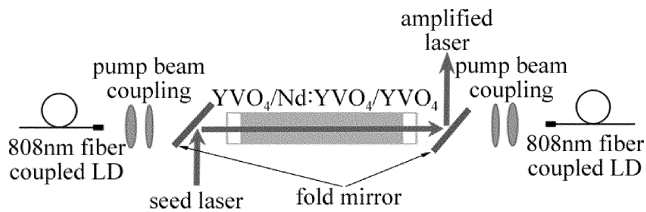


Fig. 5 Sketch of power amplifier

激光放大过程可由 Franz-Nodvik 方程描述^[18]:

$$\begin{cases} E_{out} = \frac{E_s}{M} \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{ME_{in}}{E_s} \right) - 1 \right] \exp(M\sigma N_0) \right\} \\ N_{TE} = - \left(\frac{1}{M\sigma} \right) \ln \left\{ 1 - [1 - \exp(-M\sigma N_0)] \times \exp \left(- \frac{ME_{in}}{E_s} \right) \right\} \\ N_{TS} = N_0 \left[1 - \exp \left(\frac{-1}{f\tau} \right) \right] + N_{TE} \exp \left(\frac{-1}{f\tau} \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中, E_{out} 为输出能量通量, E_{in} 为种子脉冲能量通量, E_s 为饱和能量通量, $M=1$ 为放大次数, N_0 , N_{TS} , N_{TE} 分别为对长度积分的初始反转粒子数密度、脉冲放大前的反转粒子数密度和脉冲放大后的反转粒子数密度, f 为重复频率, σ 为受激吸收截面。

作者计算了抽运功率分别为 70W、90W 对应不同抽运光斑面积下,放大激光的单脉冲能量,如图 6 所示。种子激光参量为:重复频率 25kHz,单脉冲能量 35μJ。在计算过程中,作者假定种子脉冲光斑与抽运光斑完全重合。

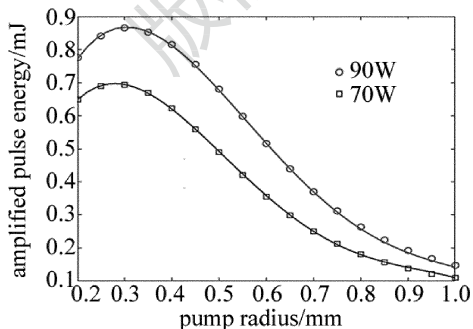


Fig. 6 Relationship between amplified pulse energy and pump radius

图 6 中可以看出,要获得较大的提取效率,抽运光斑半径应考虑在 0.3mm 附近选取。当抽运总功率为 90W、抽运光斑半径为 0.3mm 时,此时放大后的单脉冲能量达到了 0.86mJ,平均功率为 21.5W,能量提取效率为 23.9%;而当抽运光斑半径持续增大时,输出

脉冲能量不断减小,这是由于抽运功率太过分散,导致放大级增益较小。

2 实验研究

按照前面的设计参量,作者搭建了高重频窄脉冲 Nd:YVO₄ 调 Q 激光器,如图 7 所示。其中,声光开关选用了衍射效率 85%、厚度 7mm 的 TeO₂ 微型声光开关,这样便将谐振腔的光程长度控制在了 35mm 之内;抽运模块选用了 JENOPTIK 公司的 808nm 带尾纤 LD,其中振荡级 LD 芯径 200μm,数值孔径为 0.22;放大级 LD 芯径 400μm,数值孔径为 0.22,额定功率为 45W;输出耦合镜反射率为 60% @1064nm。

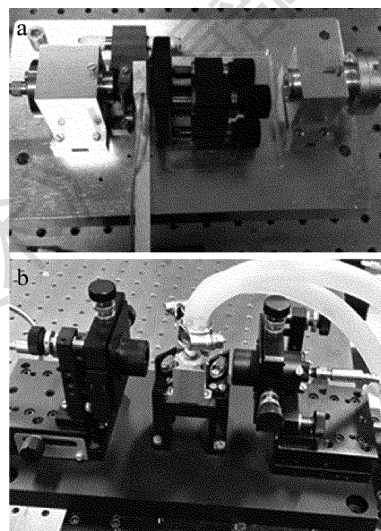


Fig. 7 Picture of Nd:YVO₄ Q-switched laser
a—master oscillator b—power amplifier

图 7a 中的器件从左至右分别为 LD 抽运模块、抽运光束整形系统、键合 YVO₄/Nd:YVO₄ 晶体、输出耦合镜及种子激光耦合系统。通过一对等效焦距分别为 9mm 和 12mm 的透镜组将抽运光斑耦合入键合晶体,在抽运功率 2.3W 的情况下,声光晶体能够实现有效封锁,最终获得了重复频率 25kHz、单脉冲能量 22.4μJ、脉冲宽度 2.19ns、光束质量因子 $M^2 < 1.2$ 的基模种子激光输出,测试结果如图 8 所示。

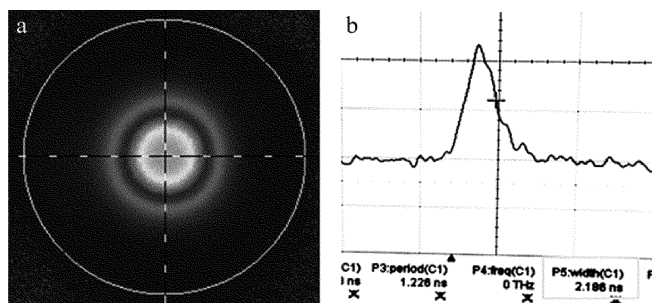


Fig. 8 Measurement of master oscillator
a—laser spot b—waveform

从振荡级实验结果可以看出,最大抽运注入功率

超过了理论值。作者认为造成这种现象的原因是：(1) 实验中选用的声光开关衍射效率为 85%，大于计算设定值；(2) 整形后增益介质内抽运光斑半径大于 130 μm ，导致抽运功率密度降低，因此可注入更大的抽运功率。而获得的脉冲宽度实验值比计算值要大，作者认为这是由于抽运功率密度降低及声光开关渡越时间等诸多因素共同决定的。

在放大级实验中，作者采用了两套带尾纤 LD 双端抽运，总抽运功率为 90W，通过抽运光束整形系统使其在增益介质内的光斑半径为 300 μm 。实验中获得了重复频率 25kHz、单脉冲能量 585 μJ 、脉冲宽度 2.26ns、光束质量因子 $M^2 < 1.7$ 的激光输出，测试结果如图 9 所示。

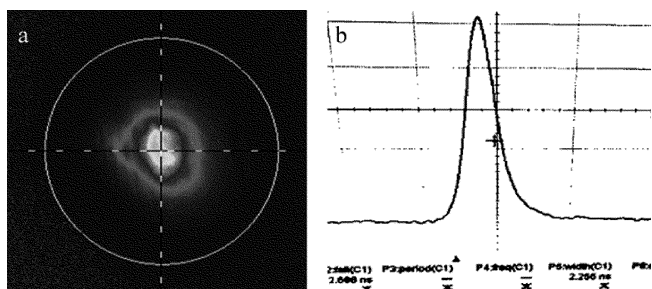


Fig. 9 Measurement of power amplifier
a—laser spot b—waveform

从放大级实验结果来看，放大后输出激光的单脉冲能量低于理论值。这是由于注入种子激光的单脉冲能量较低，导致其在放大光路中消耗反转粒子数的能力较弱，因此其对抽运功率的提取效率较低。同时，由于实验中种子激光能量较小，因而其放大倍率应大于理论放大倍率，这与作者的实验结果相符。

3 结 论

本文中设计并搭建了高重频窄脉冲 Nd:YVO₄ 声光调 Q 激光器。通过短腔长、高功率密度端面抽运的方式获得高光束质量窄脉冲种子激光，进而通过单程放大的方式获得较高平均功率激光输出。在出光实验中，振荡级获得了重频 25kHz、单脉冲能量 22.4 μJ 、脉冲宽度 2.19ns、光束质量因子 $M^2 < 1.2$ 的种子激光，光光转换效率为 24.3%；放大级获得了重频 25kHz、单脉冲能量 585 μJ 、脉冲宽度 2.26ns、光束质量因子 $M^2 < 1.7$ 的激光输出，提取效率为 15.6%。由于放大级抽运功率较大及散热均匀性等原因，导致输出激光光束质量的恶化，下一步将开展提高放大级提取效率及优化光束质量等方面的研究。

参 考 文 献

[1] ZHAO H L, FAN Y Ch, SUN Y Ch, *et al.* Review about 3-D laser

ra-dar system based on Geiger-mode APD array[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(10): 1083-1088(in Chinese).

[2] WANG F. Researches on performance and range accuracy of laser imaging system based on Geiger mode detectors[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 7-14(in Chinese).

[3] MARIUS A A, BRIAN F A, DANIEL G F, *et al.* Three-dimensional imaging laser radars with Geiger-mode avalanche photodiode arrays[J]. *Mit Lincoln Laboratory Journal*, 2002, 13(2): 351-370.

[4] ZAYHOWSKI J J, DILL L C. Diode-pumped microchip lasers electro-optically Q switched at high pulse repetition rates[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(17): 1201-1203.

[5] PLAESSMANN H, YAMADA K S, RICH C E. Subnanosecond pulse generation from diode-pumped acousto-optically Q-switched solid-state lasers[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(33): 6616-6619.

[6] MARINO R M, STEPHENS T, HATCH R E, *et al.* A compact 3-D imaging laser radar system using Geiger-mode APD arrays: system and measurements[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2003, 5086: 1-15.

[7] WANG X, SUN Zh, CHENG G H. High repetition rate and short pulse width electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 0601007(in Chinese).

[8] DONG J, UEDA K, SHIRAKAWA A, *et al.* Composite Yb:YAG / Cr⁴⁺:YAG ceramics picosecond microchip lasers[J]. *Optics Express*, 2007, 15(22): 14516-14523.

[9] CAI H, ZHOU J, ZHAO H M, *et al.* Continuous-wave and Q-switched performance of an Yb:YAG/YAG composite thin disk ceramic laser pumped with 970nm laser diode[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(11): 852-854.

[10] DU K M, LI D J, ZHANG H L, *et al.* Electro-optically Q-switched Nd:YVO₄ slab laser with a high repetition rate and a short pulse width[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(2): 87-89.

[11] DU Ch L, LIU J H, WANG Zh P, *et al.* LD-pumped acousto-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser with high repetition rates and short pulse width[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29(6): 489-491(in Chinese).

[12] ROBERT D S, VICTOR L, KALIN S. Short pulse, high-repetition rate, passively Q-switched Er:yttrium-aluminum-garnet laser at 1.6 microns[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(24): 24118.

[13] WANG J G, SUN Z, JIANG M H, *et al.* A high-power 1ns Nd:YAG laser system[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, 23(7): 1257-1262(in Chinese).

[14] ZHANG D Y, XU L J, ZHAO H, *et al.* Small-sized and A-O Q-switched DPL with high repetition rate and short pulse duration[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 790-793(in Chinese).

[15] ZHONG G Sh, MAO X J, BI G J, *et al.* Lasers with narrow pulse width and high beam quality[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(6): 766-768(in Chinese).

[16] WALTER K. Solid-state laser engineering[M]. New York, USA: Springer, 2006: 11-37.

[17] LÜ B D. Laser optics: laser beam propagation and beam quality control[M]. Chengdu: Press of Sichuan University, 1992: 35-44(in Chinese).

[18] PEARCE S, IRELAND C L, DYER P E. Simplified analysis of double-pass amplification with pulse overlap and application to Nd:YVO₄ laser[J]. *Optics Communications*, 2005, 255(4): 297-303.