

调 Q 脉冲保偏光纤激光器的研究^{*}

任广军^{1)†} 魏 臻¹⁾ 姚建铨²⁾

1) 天津理工大学电子信息与通信工程学院, 薄膜电子与通信器件天津市重点实验室,
通信器件与技术教育部工程研究中心, 天津 300191)

2) 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 激光与光电子研究所,
光电信息科学技术教育部重点实验室, 天津 300072)

(2008 年 5 月 22 日收到, 2008 年 7 月 12 日收到修改稿)

以 808 nm 半导体激光器为抽运源, 掺钕双包层保偏光纤为增益介质, 对调 Q 脉冲保偏光纤激光器进行了理论分析和实验研究. 利用 TDS5104 型示波器探测输出脉冲激光的波形, 并用光谱分析仪得到输出脉冲激光的光谱图. 利用 F-P 腔型, 在 1060 nm 处获得平均功率为 2.55 W 的脉冲激光输出, 重复频率为 1 kHz 时, 输出单脉冲能量为 2.3 mJ, 峰值功率为 4.7 kW. 改变腔型, 把二色镜倾斜放置兼作输出镜, 最终获得了平均功率为 3.5 W 的偏振脉冲激光输出, 重复频率为 1 kHz 时, 输出单脉冲能量为 3.3 mJ, 脉冲宽度为 184 ns, 其峰值功率达 17.9 kW.

关键词: 激光技术, 光纤激光器, 掺钕保偏光纤, 调 Q

PACC: 4225J, 4255N

1. 引 言

光纤激光器以其效率高、阈值低、线宽窄、可调谐和结构紧凑等优点受到了人们的普遍关注, 特别是调 Q 技术的出现, 是激光器发展史上的重要突破. 它是将激光能量压缩到宽度极窄的脉冲中发射, 使光源的峰值功率提高几个数量级的一种技术. 调 Q 激光器可以把价格便宜的激光二极管发出的连续光作为抽运光转换成高功率的纳秒级短脉冲激光. 这种短脉冲激光在测距、通信系统、远程传感、高速全息照相、军事、医疗等方面被广泛应用. 调 Q 光纤激光器与普通的调 Q 固体激光器相比, 具有光束质量高、散热效果好、体积小等优点. 然而, 与高能量的 Nd:YAG 和 CO₂ 激光器相比, 输出激光的脉冲能量仍然较低. 因此, 在光纤中实现高光束质量、更高脉冲能量的激光是当前短脉冲光纤激光器的研究重点. 声光调 Q 激光器由于声光开关所需要的驱动调制电压较低, 故容易实现对连续激光器调 Q 获得高重复频率的脉冲输出. 利用包层抽运技术与调 Q 技术相结合, 可以得到高脉冲能量、高峰值功率的短脉冲光纤激光器. 本文利用熊猫型双包层掺钕保偏光

纤为增益介质, 对调 Q 脉冲光纤激光器进行了理论分析和实验研究, 并对保偏光纤激光器及其输出激光的偏振特性进行了实验研究, 获得了稳定的调 Q 脉冲偏振激光输出^[1-3].

2. 掺钕调 Q 光纤激光器的速率方程

掺钕调 Q 脉冲光纤激光器的理论模型如图 1 所示, 功率密度 $J = J(z, t)$ 和增益因子 $k = k(z, t)$ 与时间 t 和位置 z 有关. J^+ 和 J^- 分别为腔内正向和反向的功率密度, 它们通过边界条件和增益介质互相作用. 假设调 Q 过程非常快忽略抽运过程和自发辐射的影响, 激光腔内所有表面镀制高反模消除损耗, 与谐振腔的循环相比 Q 开关的时间非常快以及忽略增益介质的激发态吸收等, 速率方程为^[4, 5]

$$\frac{\partial J^+(z, t)}{\partial z} + \frac{1}{V} \frac{\partial J^+(z, t)}{\partial t} = [k(z, t) - \rho_m] J^+(z, t), \quad (1)$$

$$-\frac{\partial J^-(z, t)}{\partial z} + \frac{1}{V} \frac{\partial J^-(z, t)}{\partial t} = [k(z, t) - \rho_m] J^-(z, t), \quad (2)$$

$$\frac{dk(z, t)}{dt} = \frac{k(z, t) [J^+(z, t) + J^-(z, t)]}{E_s}, \quad (3)$$

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60576011)资助的课题.

[†] E-mail: rjg1@163.com

式中 $k(z, t) = n\sigma_e [\text{cm}^{-1}]$ 是激活介质的增益系数, $n = n_i - n_j [\text{cm}^{-3}]$ 是激活介质中反转离子数密度, i 是激光上能级, j 是激光下能级, $\sigma_e [\text{cm}^2]$ 是受激发

射截面, $\rho_m [\text{cm}^{-1}]$ 物质损耗系数, $V = c/n$ 是激活介质内的光速, $E_s = h\nu/\sigma_e [\text{J}/\text{cm}^2]$ 是饱和能量, 描述激光器能量的多少.

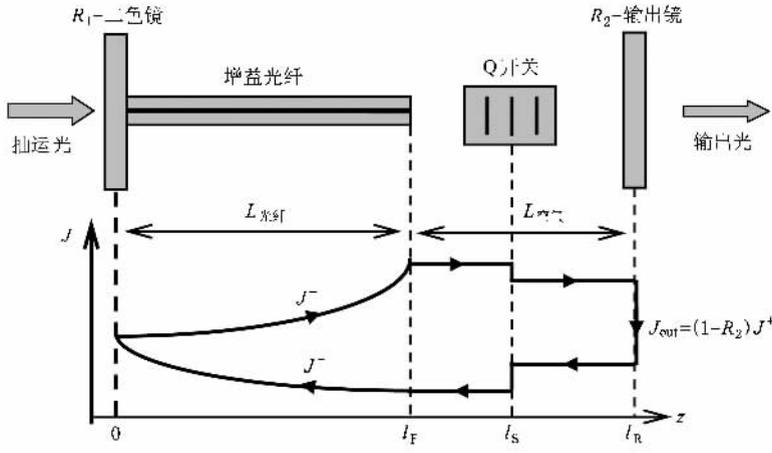


图 1 调 Q 光纤激光器谐振腔简图

解方程(1)–(3)需要调 Q 过程决定的适当边界条件. 在调 Q 过程中, 当 $t = 0$ 时 Q 开关处于关闭状态. 抽运功率增加, 当光纤激光器达到其稳定状态后, Q 开关打开调 Q 过程开始, 一个脉冲释放后, Q 开关立即关闭. 这一周期结束, 下一过程接着开始. 边界条件为

$$J^+(0, t) = R_1 J^-(0, t) = J^-(0, t), \quad (4)$$

$$J^+(l_s, t) = T_s^+(t) J^+(l_s, t), \quad (5)$$

$$J^-(l_s, t) = T_s^-(t) J^-(l_s, t), \quad (6)$$

$$J^-(l_r, t) = R_2 J^+(l_r, t), \quad (7)$$

其中 R_1 和 R_2 分别是 $z = 0, z = l_r$ 处反射镜的反射率, T_s 是 Q 开关的透射率, 当 $t \leq 0$ 时, $T_s^+(t) = 0$; $t > 0$ 时, $T_s^+(t) = 1$.

激光谐振腔的功率密度和脉冲能量为

$$J_{\text{out}} = (1 - R_2) J^+(l_r, t), \quad (8)$$

$$E_{\text{out}} = \int_{t_p}^t J_{\text{out}}(t) dt = (1 - R_2) \int_{t_p}^t J^+(l_r, t) dt, \quad (9)$$

其中 t_p 是一个脉冲持续时间的初值.

在调 Q 开始 $t_0 = 0$ 时, 功率密度和激光腔内介质中的反转离子数密度是确定的, 通过适当的边界条件可以求出方程(1)–(3)的解. 在 $t_0 = 0$ 时, 得到功率密度的准确值很不容易, 为了估算它的值必须考虑腔的结构、释放过程以及激光介质的受激发射.

与输出激光最大功率密度相比 $J^+(z, 0)$ 和 $J^-(z, 0)$ 的值不是很高, 前向和反向功率密度的初值为

$$J^+(z, 0) = J^-(z, 0) = \frac{h\nu_g}{2} \frac{k_0}{\tau\sigma_e} \frac{\Omega}{4\pi} l_F, \quad (10)$$

式中 $h\nu_g$ 为光子能量, τ 为荧光寿命, $\Omega = \pi(NA/n_c)^2$ 是立体角 (NA 是数值孔径), n_c 是激活纤芯的折射率, l_F 是激光介质长度.

当调 Q 过程开始时, 激光介质中有一个初始增益, 它依赖于吸收抽运功率的水平, 对于四能级系统的光纤激光器, 有

$$k_0(t = 0) = \frac{\sigma_e \tau \alpha_a}{h\nu_p A_{\text{clad}}} P_p(0) \exp[-(\alpha_a + \rho_p) l_F] \times [1 - \exp(-1/\tau f_r)], \quad (11)$$

式中 α_a 为抽运波长处纤芯的有效吸收系数, ρ_p 为抽运波长处增益光纤的损耗系数, A_{clad} 为光纤内包层的横截面积, $P_p(0)$ 为 $z = 0$ 处进入光纤的抽运功率, f_r 为调 Q 过程的重复频率.

3. 声光调 Q 脉冲光纤激光器的实验

声光调 Q 脉冲光纤激光器, 就是在光纤激光器的谐振腔内插入声光 Q 开关, 周期性调制腔内损耗获得调 Q 脉冲激光输出.

3.1. 直接输出腔形

使用长度为 13.5 m 的熊猫型双包层掺铒保偏

光纤(纤芯直径为 $5\ \mu\text{m}$, 内包层直径为 $125\ \mu\text{m}$)为增益介质,二色镜(HT@808 nm,HR@1060 nm)和对1060 nm 透过率分别为 22%和 51%的镜片作为输出镜,构成 F-P 光学谐振腔,声光 Q 开关为调制器件.

抽运源为半导体激光器(LD),输出中心波长为 808 nm,激光器的输出波形用 TDS5104 型示波器探测,输出功率用功率计测量,实验装置如图 2 所示^[6-8].

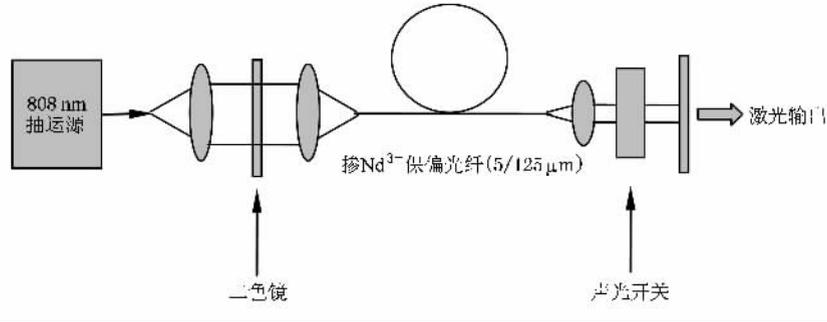


图 2 调 Q 光纤激光器装置图

在输出端用 1060 nm 透过率分别为 22%和 51%的镜片作为输出腔镜,得到了稳定的调 Q 脉冲.在 1060 nm 处获得平均功率为 2.55 W 的脉冲激光输

出,重复频率为 1 kHz 时,输出单脉冲能量为 2.3 mJ,峰值功率为 4.7 kW.输出激光波形如图 3 所示,光谱图如图 4 所示.

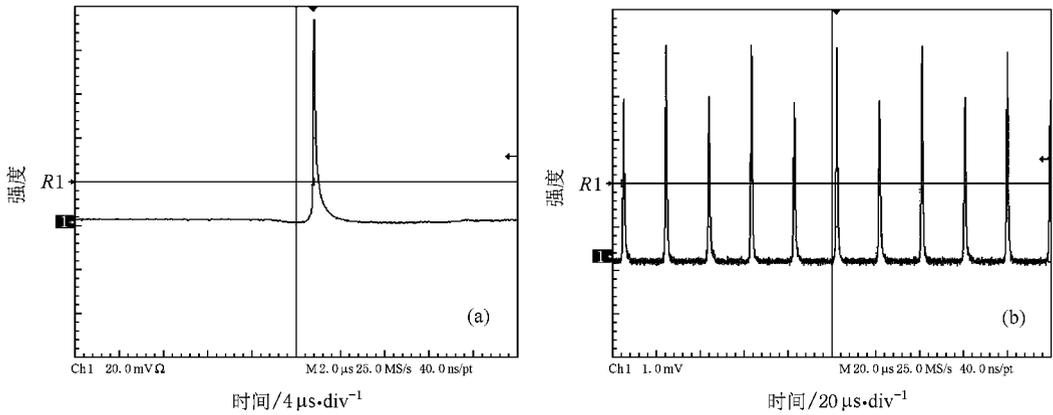


图 3 调 Q 光纤激光器输出脉冲 (a) 单个脉冲 (b) 多个脉冲

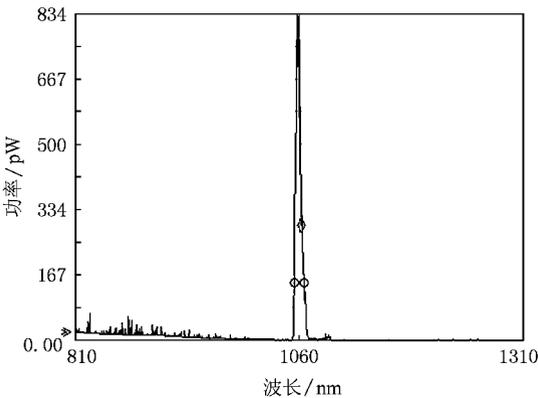


图 4 调 Q 光纤激光器输出光谱

如图 3 所示,有两种情况可以产生输出脉冲波形的高度起伏.一种是在连续抽运光的作用下,光纤激光器首先产生弛豫振荡,最后达到稳态,弛豫振荡开始时的峰值功率远大于稳态时的功率,振荡起始的时间和达到稳态的时间都与注入的抽运功率大小有关.本实验中使用的声光 Q 开关,由于长期使用导致性能下降,致使调 Q 脉冲有一定的不稳定性,在示波器上显示的波形有所波动,在抓拍波形图时,出现了波形的起伏.另一种是用脉冲抽运,在抽运脉冲较宽或抽运功率较高的情况下,抽运光脉冲抽运增益光纤中的反转粒子数不能够在一个激光脉冲中完全被消耗,导致了反转粒子数的剩余,从而产生了次脉冲.次脉冲的出现,减小了主脉冲的峰值功率.

因而在进行脉冲抽运主动调 Q 实验时,要选择合适的抽运光功率和抽运脉冲周期,使增益光纤的反转粒子数能够在一个激光脉冲中完全被消耗,以获得和脉冲抽运周期一致的高功率的调 Q 脉冲.

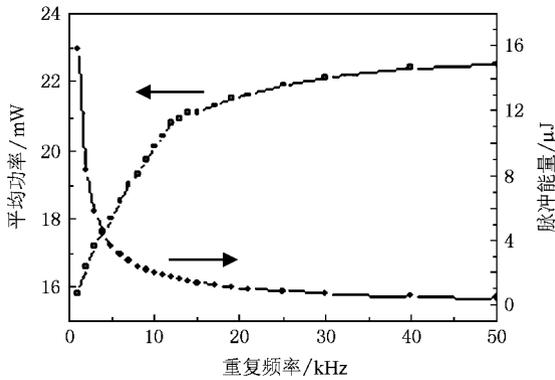


图 5 平均功率和脉冲能量随重复频率的变化

当输出镜的透过率为 22% 时,由于大部分激光被返回到谐振腔里,在腔内形成了很高的增益,有利于调 Q 脉冲的形成,比较容易得到稳定的调 Q 脉冲.此时输出光功率不是太高,可作为小功率稳定的脉冲光源.当输出镜的透过率为 51% 时,腔内增益相比于 22% 时的增益有所降低,也能形成稳定的调

Q 脉冲,但是在高功率运转时其稳定性没有前者好,此时其输出功率高,可以作为大功率的脉冲激光光源.

图 5 是激光输出功率和脉冲能量随重复频率的变化曲线,可以看出,随着重复频率的增高,输出激光的功率逐渐增高,但单脉冲能量逐渐降低,这与理论计算结果一致.

3.2. 利用二色镜 45°输出腔形

使用长度为 13.5 m 的熊猫型双包层掺铒保偏光纤(纤芯直径为 5 μm,内包层直径为 125 μm)为增益介质,二色镜对 808 nm 抽运光 45°高透、1060 nm 运转光 45°高反 和对 1060 nm 全反的反射镜作为谐振腔镜,声光 Q 开关为调制器件.抽运源为半导体激光器(LD),输出中心波长为 808 nm,激光器的输出波形用 TDS5104 型示波器探测,输出功率用功率计测量,实验装置如图 6 所示^[7,9,10].

这种腔形既容易形成稳定的调 Q 脉冲,又能获得高功率的脉冲激光输出.经过详细调整,最终获得平均功率为 3.5 W 的脉冲激光输出,重复频率为 1 kHz 时,输出单脉冲能量为 3.3 mJ,峰值功率为 17.9 kW,输出波形如图 7 所示.

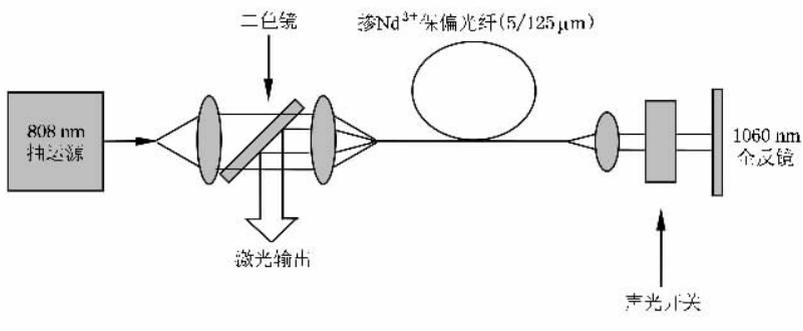


图 6 调 Q 光纤激光器装置图

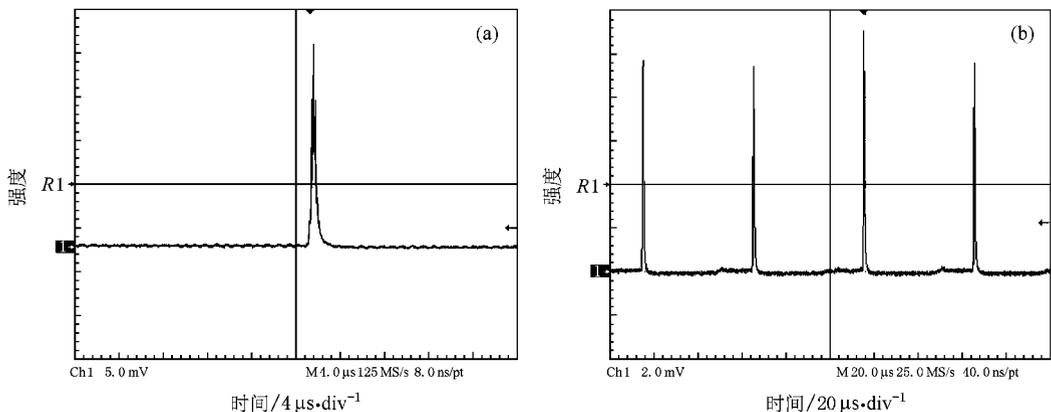


图 7 调 Q 光纤激光器脉冲波形 (a) 单个脉冲 (b) 多个脉冲

4. 结 论

本文以掺铈保偏光纤为增益介质,声光 Q 开关为调制器,利用两种腔型对调 Q 脉冲光纤激光器进

行了理论分析和实验研究,测出了调 Q 脉冲的波形图和传输脉冲激光的光谱图.通过设计腔型和各项参数,最终获得了平均功率为 3.5 W 的脉冲激光输出,重复频率为 1 kHz 时,输出单脉冲能量为 3.3 mJ,峰值功率为 17.9 kW.

- [1] El-Sherif A F ,King T A 2003 *IEEE J. Quantum Elect.* **39** 759
- [2] Offerhaus H L ,Alvarez-Chavez J A ,Nilsson J 1999 *CLEO '99* Baltimore p23—28
- [3] Chen Z J ,Grudinin A B ,Porta J 1998 *Opt. Lett.* **23** 454
- [4] Swiderski J ,Zajac A ,Konieczny P 2004 *Opt. Express* **12** 3554
- [5] Renaud C C ,Selvas-Aguilar R J ,Nilsson J 1999 *IEEE Photonic Tech. Lett.* **11** 976
- [6] Ren G J ,Zhang Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3917 (in Chinese) [任

广军、张 强 2007 物理学报 **56** 3917]

- [7] Ren G J ,Zhang Q 2007 *J. Optoelectron. Adv. Mater.* **9** 2345
- [8] Ren G J ,Zhang Q 2007 *Chin. J. Laser* **34** 1208 (in Chinese) [任广军、张 强 2007 中国激光 **34** 1208]
- [9] Ren G J 2007 *Ph. D. Dissertation* (Tianjin :Tianjin University) (in Chinese) [任广军 2007 博士学位论文(天津:天津大学)]
- [10] Zhao H M ,Lou Q H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3525 (in Chinese) [赵宏明、楼祺洪 2008 物理学报 **57** 3525]

Q-switched pulse polarization-maintaining Nd³⁺-doped fiber laser^{*}

Ren Guang-Jun^{1,2†} Wei Zhen¹⁾ Yao Jian-Quan²⁾

1) *School of Electronics Information & Communications Engineering ,Tianjin Key Laboratory of Film Electronic & Communication Devices , Engineering Research Center of Communication Devices and Technology of Ministry of Education , Tianjin University of Technology ,Tianjin 300191 ,China)*

2) *College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering ,Institute of Laser and Opto-electronics ,Key Laboratory of Optoelectric Information Science and Technology of Ministry of Education ,Tianjin University ,Tianjin 300072 ,China)*

(Received 22 May 2008 ; revised manuscript received 12 July 2008)

Abstract

The Nd³⁺-doped pulse polarization-maintaining fiber laser pumped by 808 nm semiconductor laser is investigated experimentally and theoretically. The wave form of output pulse was detected by a TDS5104 oscillograph and the spectrogram of the output pulse was obtained by using a spectrum analysis apparatus. Originally the single pulse energy of 2.3 mJ with average power of 2.55 W was generated at the repetition rate of 1 kHz. By changing the resonance cavity and making other modifications of the laser, we obtained the highest single pulse energy of 3.3 mJ with peak power of 17.9 kW at the repetition rate of 1 kHz, and the pulse width was 184 ns and the average power of the output pulse was 3.5 W.

Keywords : laser technique , fiber laser , Nd³⁺-doped polarization-maintaining fiber , Q modulation

PACC : 4225J , 4255N

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60576011).

† E-mail :rgj1@163.com