

文章编号: 0258-7025(2008)04-0483-05

掺镱包层光纤激光器的全光纤调 Q 技术

宁继平 张伟毅 尚连聚 范国芳 韩 群 周 雷

(天津大学精密仪器与光电子工程学院教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072)

摘要 从理论和实验两方面对掺镱包层全光纤调 Q 激光器进行了研究。建立了相应的理论模型, 根据调 Q 光纤激光器的速率方程理论, 用基于“能量利用率与初始反转粒子数关系”求解剩余反转粒子数的新方法, 得出了调 Q 光纤激光器的初始参数诸如抽运功率、纤芯直径、光纤长度、输出透过率等影响脉冲宽度和脉冲能量的规律, 进一步明确了压缩脉冲宽度和提高脉冲能量的方法; 优化了相关参数, 为同类调 Q 光纤激光器的设计提供参考。实验用半导体激光器(LD)作为抽运源, 增益光纤为 D 形双包层掺镱光纤。谐振腔高反端串接一个带尾纤的声光 Q 开关, 实现了重复频率在 10 Hz~100 kHz 范围内可调声光调 Q 掺镱全光纤激光器的实验运转; 在重复频率 500 Hz 时, 脉冲宽度为 3 μ s, 脉冲能量达到 2.94 mJ。

关键词 激光技术; 声光调 Q; 全光纤激光器; 速率方程; 掺镱包层光纤

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

All-Fiber Q-Switched Ytterbium-Doped Double-Clad Laser

Ning Jiping Zhang Weiyi Shang Lianju Fan Guofang Han Qun Zhou Lei

(Key Laboratory of Optoelectronics Information Science and Technology, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract Q-switched ytterbium-doped double-clad fiber laser has been studied in both theory and experiment, and theory model is built. A novel method based on 'the relationship between the energy utility ratio and the initial particle inversion' to solve the final particle inversion remaining is advanced. According to the rate-equation theory of the Q-switched fiber laser, the general law that some important initial parameters, such as pump power, fiber core diameter, fiber length, output transmittance and fiber inherent loss influence the pulse width and energy is worked out. The analysis of these parameters is of important reference to designing the kindred Q-switched fiber lasers. In the experiment, a D-shape ytterbium-doped double clad gain fiber pumped by laser diode is used. A pigtailed acoustooptic Q-switch is inserted between the totally reflected fiber Bragg grating (FBG) and the combiner's signal port. During the experiment, the operation of the acoustooptic Q-switched Yb³⁺-doped all-fiber laser is realized. The repetition rate can be adjusted continuously between 10 Hz and 100 kHz. The 3 μ s pulse width and the 2.94 mJ pulse energy are obtained at the repetition rate of 500 Hz.

Key words laser technique; acoustic-optic Q-switching; all-fiber laser; rate equation; ytterbium-doped double-clad fiber

1 引 言

全光纤调 Q 激光器具有高功率和高效率、结构紧凑和携带方便等优点, 在军事、工业、生物医学、非线性频率变换、遥感和空间通信等领域有广阔的应用前景^[1~5]。目前, 用于光纤激光器的 Q 开关大致分为光纤型 Q 开关和非光纤型 Q 开关两类。非光纤型 Q 开关均为体 Q 开关, 使用中需要透镜和双色镜等

元件辅助, 结构复杂, 光路失调灵敏度较高。光纤型 Q 开关主要有基于受激布里渊散射(SBS)效应的被动型 Q 开关、基于可饱和吸收光纤的被动型 Q 开关、基于双光束干涉原理的主动型 Q 开关、带尾纤的声光 Q 开关、基于光纤布拉格光栅(FBG)的调节耦合效率的 Q 开关和基于光纤布拉格光栅的磁弹性 Q 开关^[6~8]等。

收稿日期: 2007-08-16; 收到修改稿日期: 2007-11-02

作者简介: 宁继平(1945—), 女, 山东人, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子技术与现代光通信领域的教学和科研工作。

E-mail: jpnning@tju.edu.cn

本文从理论和实验两方面对掺镱包层全光纤调 Q 激光器进行了研究。建立了掺镱全光纤调 Q 激光器的理论模型, 得出了调 Q 光纤激光器的初始参数影响脉冲宽度和脉冲能量的规律, 优化了相关参数。在实验结构中通过在谐振腔的高反端串接一个带尾纤的声光 Q 开关, 实现了声光调 Q 掺镱全光纤激光器的实验运转。

2 调 Q 光纤激光器原理

假设 Q 开关的厚度非常薄(认为光纤长度 L 即为腔长), 反转粒子数密度 $\Delta N(x, y, z, t)$ 和第 i 模的腔内光子数 S_i 随时间变化的速率方程^[9,10] 分别表示为

$$\frac{d[\Delta N(x, y, z, t)]}{dt} = -\frac{c\sigma}{n} \times \sum_{j=1}^m S_j(x, y, z, t) \Delta N(x, y, z, t), \quad (1)$$

$$\frac{dS_i}{dt} = \frac{c\sigma}{n} \times \iiint_{MV} S_i(x, y, z, t) \Delta N(x, y, z, t) dx dy dz - \frac{S_i}{\tau_c}, \quad (2)$$

式中 z 轴与光纤纵轴重合, $S_i(x, y, z, t)$ 表示第 i 模的腔内光子数密度, c 为真空中光速, σ 为受激发射截面, n 为纤芯对信号光的折射率, m 为纤芯中模的个数; $\tau_c = 2nL/c$ δ_i 为腔内光子寿命, δ_i 为第 i 模的高 Q 腔往返损耗; MV 表示对整个增益介质体积积分。

假定调 Q 光纤激光器为单模运转。若光子数和调 Q 脉冲初始反转粒子数分别用 S 和 ΔN_{in} 表示, 调 Q 脉冲结束时的剩余反转粒子数为 ΔN_f , 阈值粒子反转数为 ΔN_t , ΔN_f 满足表达式

$$\frac{\Delta N_f}{\Delta N_{in}} = 1 + \frac{\Delta N_t}{\Delta N_{in}} \cdot \ln \frac{\Delta N_f}{\Delta N_{in}}, \quad (3)$$

调 Q 光纤激光器的瞬时输出功率、峰值功率、脉冲总能量及脉冲宽度分别为

$$P_0 = S \cdot h\nu_s \cdot \frac{cT}{2nL}, \quad (4)$$

$$P = h\nu_s \cdot \frac{cT}{2nL} \cdot \left[\Delta N_t \ln \frac{\Delta N_t}{\Delta N_{in}} - (\Delta N_t - \Delta N_{in}) \right], \quad (5)$$

$$E = h\nu_s \cdot \frac{T}{\delta} \cdot (\Delta N_{in} - \Delta N_f), \quad (6)$$

$$\Delta t = \frac{E}{P} = \tau_c \cdot \frac{\Delta N_{in} - \Delta N_f}{\Delta N_t \ln \frac{\Delta N_t}{\Delta N_{in}} - (\Delta N_t - \Delta N_{in})}, \quad (7)$$

初始反转粒子数 ΔN_{in} 与抽运功率 P_{abs} 的关系为

$$\Delta N_{in} = \frac{\tau_s}{h\nu_p} \cdot P_{abs}. \quad (8)$$

在数值计算中, 对于特定的调 Q 光纤激光器, ΔN_{in} 和 ΔN_t 可以根据抽运功率和初始参数确定, 但是 ΔN_f 只能通过方程(3) 计算出来。根据能量利用率 $\mu = 1 - \Delta N_f / \Delta N_{in}$ ^[2] 的表达式和方程(3), 比较容易得到 μ 依赖于 $\Delta N_{in} / \Delta N_t$ 的基本规律, 如图 1 所示。比值 $\Delta N_{in} / \Delta N_t$ 越大能量利用率 μ 越高。当 $\Delta N_{in} / \Delta N_t$ 等于 6.0 时, 能量利用率约为 99.7%, 也就是 $\Delta N_f / \Delta N_{in}$ 约为 0.3%; 此时, 比值 $\Delta N_f / \Delta N_{in}$ 可以认为等于零。仅需要求解 $1.0 < \Delta N_{in} / \Delta N_t < 6.0$ 条件下的数值解即可; 当 $\Delta N_{in} / \Delta N_t \geq 6.0$ 时, 直接令 $\Delta N_f = 0$ 作为方程(4) 的解; 当 $\Delta N_{in} / \Delta N_t \leq 1.0$ 时, 激光器未达到阈值。

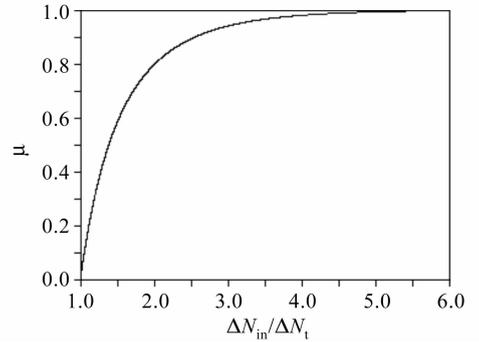


图 1 能量利用率随初始反转粒子数的变化曲线
Fig. 1 Energy utility ratio as a function of initial population reversion

利用方程(7)和(8), 可以得到脉冲宽度和脉冲能量与激光器的初始参数(抽运功率、纤芯直径(d)、光纤长度(L)、输出透过率(T)和光纤固有损耗(α_s)的基本规律。

抽运功率影响脉冲宽度和脉冲能量的基本规律如图 2(a)所示。当抽运功率高于阈值不多时, 脉冲宽度很宽; 随着抽运功率的增加, 脉冲变窄; 继续增大抽运功率时, 脉冲宽度将趋于一个常数, 那就是腔内光子寿命。图 2(a)虚线表明, 脉冲能量随抽运功率的增加基本上呈线性规律增长。计算中用到的一些具体参数为 $d = 30 \mu\text{m}$, $L = 11.0 \text{ m}$, $T = 96\%$, $\alpha_s = 0.075 \text{ dB/m}$ 。

图 2(b)中的实线和虚线分别代表脉冲宽度和脉冲能量随纤芯直径的变化曲线。脉冲宽度随纤芯直径的增大而略有展宽, 这是因为纤芯变粗时抽运光子分布的非均匀性有所增加所致。脉冲能量随纤芯直径的增大也略有上升, 因纤芯直径增大时, 在同样的抽运功率下初始反转粒子数相对增多, 但同时信号光在纤芯中的损耗系数也随之增加, 脉冲能量随纤芯直径的增大逐渐趋于平缓。计算中用到的一

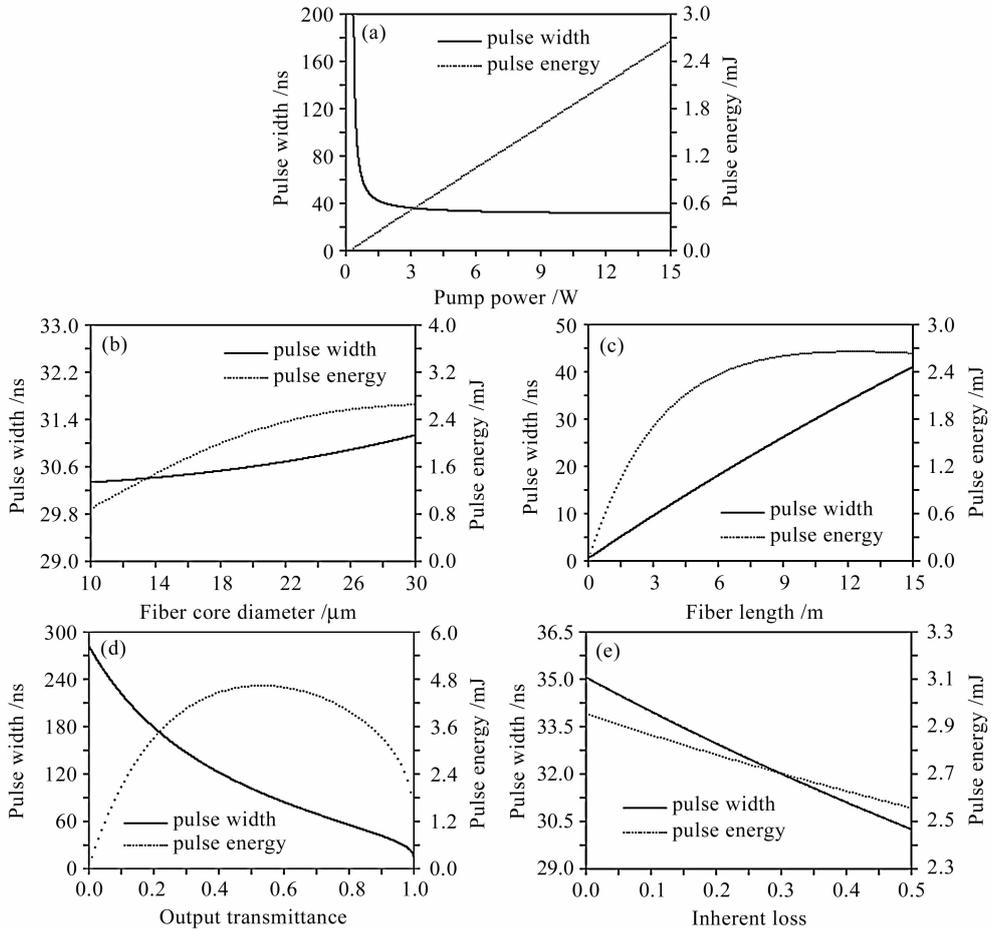


图 2 脉冲宽度和脉冲能量随抽运功率(a), 纤芯直径(b), 光纤长度(c), 输出透过率(d)和光纤固有损耗(e)的变化曲线

Fig. 2 Pulse width and energy as functions of pump power (a), fiber core diameter (b), fiber length (c), output transmittance (d) and inherent loss (e)

些具体参数为 $P_{in} = 15.0 \text{ W}$, $L = 11.0 \text{ m}$, $T = 96\%$, $\alpha_s = 0.075 \text{ dB/m}$ 。

缩短光纤长度能有效地压窄脉冲宽度。图 2(c)中的实线给出了光纤长度影响脉冲宽度的规律。随着光纤长度的增加, 抽运光子分布的非均匀性加强, 导致在激活介质的不同位置脉冲建立的时间不同; 输出脉冲往往是多脉冲叠加的结果。当抽运功率一定时存在使脉冲能量最大的光纤长度如图 2(c)虚线所示, 光纤长度为 $11 \sim 13 \text{ m}$ 时脉冲能量达到最大值。计算中用到的具体参数为 $P_{in} = 15.0 \text{ W}$, $d = 30 \mu\text{m}$, $T = 96\%$, $\alpha_s = 0.075 \text{ dB/m}$ 。

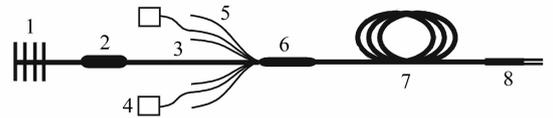
输出透过率是影响脉冲宽度的一个重要因素。如图 2(d)实线所示。当其他参数一定时, 输出透过率存在一最佳值。输出透过率的选取应折中考虑。计算中用到的具体参数为 $P_{in} = 15.0 \text{ W}$, $d = 30 \mu\text{m}$, $L = 11.0 \text{ m}$, $\alpha_s = 0.075 \text{ dB/m}$ 。

光纤固有损耗是腔往返损耗的一部分, 表示为 $2\alpha_s L$ 。光纤固有损耗对脉冲宽度的影响如图 2(e)实

线所示, 随着固有损耗的增大, 脉冲宽度缓慢变窄。光纤固有损耗对脉冲能量的影响如图 2(e)虚线所示, 脉冲能量与光纤固有损耗基本上成反比关系。计算中用到的一些具体参数为 $P_{in} = 15.0 \text{ W}$, $d = 30 \mu\text{m}$, $L = 11.0 \text{ m}$, $T = 96\%$ 。

3 声光调 Q 掺镱全光纤激光器实验

声光调 Q 掺镱全光纤激光器的实验结构如图 3



1. FBG 2. acoustic-optic modulator (AOM) with pigtail fiber 3. signal end of multi-mode coupler; 4. LD; 5. pump inputting end of multi-mode coupler; 6. multi-mode coupler; 7. Yb-doped double-clad fiber; 8. output end of fiber laser

图 3 半导体激光器抽运的声光调 Q 掺镱双包层全光纤激光器

Fig. 3 LD pumped acoustic-optic Q-switched Yb-doped double-clad all-fiber laser setup

所示。半导体激光器(LD)作为抽运源, $(6+1) \times 1$ 多模光纤耦合器将抽运光引入到掺镱包层光纤中的内包层。光纤布拉格光栅用作谐振腔的高反镜, 激光器的输出端为增益光纤的自由端面, 利用了端面的菲涅耳(Fresnel)反射率。增益光纤是D形的双包层掺镱光纤。纤芯直径为 $30 \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.07; 内包层直径为 $350 \mu\text{m}/400 \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.49, 光纤对 975 nm 抽运光的吸收系数为 1.2 dB/m。在谐振腔的高反端串接一个带尾纤的声光 Q 开关, 实现了声光调 Q 掺镱全光纤激光器的实验运转; 在重复频率 500 Hz 时, 脉冲宽度为 $3 \mu\text{s}$, 图 4 为调 Q 脉冲序列波形。脉冲能量达到 2.94 mJ; 并实现了重复频率在 10 Hz~100 kHz 范围内可调。

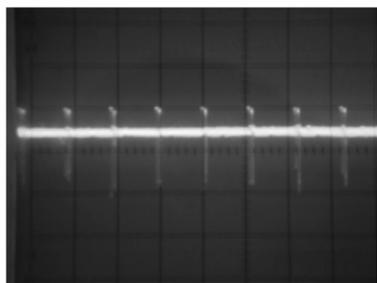


图 4 声光调 Q 掺镱双包层全光纤激光器的脉冲序列
Fig. 4 Pulse sequence of acoustic-optic Q-switched Yb-doped double-clad all-fiber laser

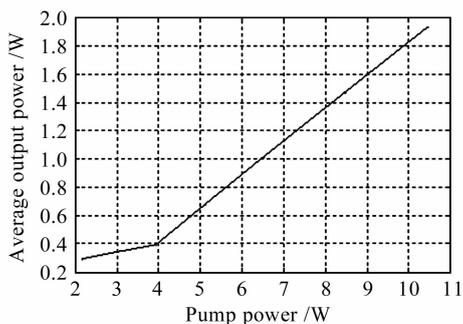


图 5 声光调 Q 掺镱双包层全光纤激光器的输出功率随抽运功率的变化曲线

Fig. 5 Output power of acoustic-optic Q-switched Yb-doped double-clad all-fiber laser as a function of pump power

声光调 Q 光纤激光器的平均功率随抽运功率变化的关系曲线如图 5 所示, 图 6 为光谱仪显示的光谱图, 激光中心波长为 1083 nm, 恰好与 FBG 的中心反射波长相吻合, 激光谱线宽度 (FWHM) 为 2 nm; 波长为 975 nm 的光是剩余抽运光。调节声光 Q 开关的重复频率或降低抽运功率, 激光波长未发生变化。

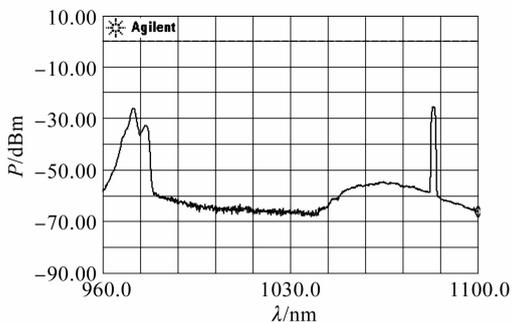


图 6 声光调 Q 掺镱双包层全光纤激光器的输出光谱
Fig. 6 Output spectrum of acoustic-optic Q-switched Yb-doped double-clad all-fiber laser

实验得到的脉冲宽度大于理论值, 这是因为声光 Q 开关的插入损耗较大, 开关时间稍长, 所用光纤较长, 增益光纤的纤芯较粗, 输出脉冲可能为多脉冲叠加。

在声光 Q 开关和多模耦合器的信号端串接了一段 2 km 的单模通信光纤, 利用光纤型声光 Q 开关和单模光纤中的受激布里渊散射效应进行了混合调 Q 掺镱全光纤激光器的实验研究。激光器输出的脉冲宽度进一步压缩, 在重复频率 50 kHz 时获得了脉冲宽度 150 ns 的稳定脉冲输出, 如图 7 所示。

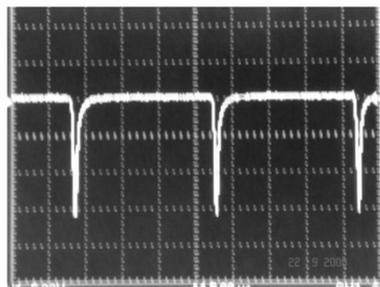


图 7 混合调 Q 掺镱双包层全光纤激光器的脉冲序列
Fig. 7 Pulse sequence of compound Q-switched Yb-doped double-clad all-fiber laser

4 结 论

用基于“能量利用率与初始反转粒子数关系”解剩余反转粒子数的新方法, 得出了调 Q 光纤激光器的初始参数影响脉冲宽度和能量的规律, 优化了有关参数。在实验中实现了声光调 Q 掺镱全光纤激光器的运转; 重复频率 500 Hz 时, 脉冲宽度为 $3 \mu\text{s}$, 脉冲能量达到 2.94 mJ; 实现了重复频率在 10 Hz~100 kHz 范围内可调, 不同重复频率下脉冲宽度变化不大。最后进行了混合调 Q 实验, 激光器输出的脉冲宽度进一步压缩, 在重复频率 50 kHz 时获得了脉冲宽度 150 ns 的稳定脉冲输出。

参 考 文 献

- 1 Gan Yu, Xiang Wanghua, Zhou Xiaofang *et al.*. Passive Q-switching and modelocking Yb³⁺-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8):1021~1024
甘雨, 向望华, 周晓芳等. 被动调 Q 锁模掺镱光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(8):1021~1024
- 2 Yanming Huo, Peter K. Cheo. Modeling of passively Q-switched Er³⁺/Yb³⁺-codoped clad-pumped fiber lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11**(3):658~666
- 3 Feng Xiaoxing, Chen Bai, Zhu Yi *et al.*. Study of self mode-locking in Q-switched and continuous working Yb-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7):873~877
冯小星, 陈柏, 朱毅等. 调 Q 及连续掺 Yb 光纤激光器中的自锁模研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(7):873~877
- 4 Yong Wang, Alejandro Martinez-Rios, Hong Po. Analysis of a Q-switched ytterbium-doped double-clad fiber laser with simultaneous mode locking [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **224**:113~123
- 5 Lianju Shang, Jiping Ning, Guofang Fan *et al.*. Effective methods to improve pulse energy of Q-switched fiber laser [J]. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2006, **8**(3):1254~1257
- 6 A. Piper, A. Malinowski, K. Furusawa *et al.*. High-power, high-brightness, mJ Q-switched ytterbium-doped fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(15):928~929
- 7 Ding-Wei Huang, Wen-Fung Liu, C. C. Yang. Q-switched all-fiber laser with an acoustically modulated fiber attenuator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(9):1153~1155
- 8 P. Pérez-Millán, A. Diez, M. V. Andrés *et al.*. Q-switched all-fiber laser based on magnetostriction modulation of a Bragg grating [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(13):5046~5051
- 9 C. J. Gaeta, M. J. F. Digonnet, H. J. Shaw *et al.*. Pulse characteristics of Q-switched fiber lasers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1987, **LT-5**(12):1645~1651
- 10 Ashraf F. El-Sherif, Terence A. King. High-energy, high-brightness Q-switched Tm³⁺-doped fiber laser using an electro-optic modulator [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **218**:337~344