

低压驱动复合腔电光调 Q 微晶片激光器

王云祥 黄磊 巩马理 张海涛

(清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘要 复合腔电光调 Q 微晶片激光器是一种集成化的固体激光器, 具有体积小、基横模、单纵模、线偏振运转, 输出脉冲重复频率高, 脉宽窄的优点, 是高重复频率、高光束质量的主振荡功率放大器(MOPA)激光系统的理想种子源。进行了低压驱动复合腔电光调 Q 微晶片激光器的实验与理论研究。根据理论分析, 增加电光晶体长度和提高端面反射率可减小标准具透射谱半宽度, 进而降低驱动电压。设计了两套激光器实验方案。实验中激光增益介质和电光晶体分别选用 Nd:YVO₄ 和 LiTaO₃, 谐振腔尺寸小于 3 mm×3 mm×2.5 mm。方案 1 主要研究增加电光晶体长度后的激光器输出特性, 在抽运功率 184 mW, 240 V 驱动电压下, 可实现 300 kHz 激光脉冲输出, 脉冲宽度 10 ns, 峰值功率 9.4 W。在方案 2 中, 通过进一步提高端面反射率, 在短时间内可输出 1 MHz 脉冲。

关键词 激光技术; 电光调 Q; 复合腔; 低压驱动; 高重复频率

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A

Low Voltage Driving Coupled-Cavity Electro-Optically Q-Switched Microchip Lasers

Wang Yunxiang Huang Lei Gong Mali Zhang Haitao

(Department of Precision Instruments and mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Coupled-cavity electro-optically Q-switched microchip lasers are integrated solid-state lasers with advantages of small size, fundamental transverse mode, single longitudinal mode, linear polarization, high repetition rate, and short pulse duration. They are ideal seed sources for high repetition rate, high beam quality MOPA systems. Experimental and theoretical study of the lasers is demonstrated. From theoretical analysis, long electric material and high end-face reflectivity lead to narrow Fabry-Pérot etalon transmission bandwidth, and low driving voltage. Two experimental setups are designed for low voltage driving. The gain medium and the electric material are Nd:YVO₄ and LiTaO₃, respectively. The cavity size is smaller than 3 mm×3 mm×2.5 mm. In the first setup, the output characteristics are studied through changing the length of electric material. Pulse repetition rates as high as 300 kHz is achieved with 184 mW pump power and 240 V driving voltage. The pulse width and peak power are 10 ns and 9.4 W, respectively. In the second setup, 1 MHz pulse rate is achieved in a short time period, by increasing the end-face reflectivity.

Key words laser technique; electro-optical Q-switch; coupled cavity; low driving voltage; high repetition rate

1 引 言

电光调 Q 激光器具有调 Q 时刻精确控制、峰值功率高、脉冲宽度窄、效率高等优点。传统电光调 Q 激光器通过改变激光的偏振方向实现调 Q, 所需半波驱动电压较高, 一般为千伏以上, 难以实现高重复频率(百千赫兹以上)运转^[1~3]。I. W. Machintosh^[4,5]

提出了基于法布里-珀罗(Fabry-Pérot, F-P)标准具的调 Q 方法, 得到 3 kHz 脉冲输出。A. I. Ritus^[6]采用标准具调 Q 技术得到了 37~123 kHz 的激光脉冲输出, 脉冲宽度小于 150 ns。之后, N. V. Baburin 等^[7]得到了 2 kW 平均功率输出, 重复频率 20~100 kHz, 脉冲宽度 60~300 ns。基于标准具调 Q 的原理,

作者简介: 王云祥(1980—), 男, 河北人, 博士研究生, 主要从事激光二极管抽运的固体激光技术方面的研究。

E-mail: yx-wang03@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 巩马理(1959—), 男, 四川人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光技术及光电子信息工程等方面的研究。

E-mail: gongml@mail.tsinghua.edu.cn

J. J. Zayhowski等^[8,9]提出了复合腔电光调Q微晶片激光器。激光器体积微小(1 mm×1 mm×2.3 mm左右),结构简单,输出重复频率达到2.25 MHz,脉宽8.8 ns,峰值功率16 W,激光器输出基横模、单纵模、线偏振^[10]。在国内,郑朝思等^[11]在理论上对复合腔电光调Q器件的选模功能及温度对器件性能的影响做了详细的讨论,并利用速率方程理论对调Q脉冲的优化进行了计算。

高压高重复频率电光驱动电源需要从国外厂家订制,价格昂贵,且电磁辐射严重。为进一步降低驱动电压,须减小标准具透射谱线宽度。本文从增加电光晶体长度和提高标准具端面反射率两个方面减小谱线宽度。报道了低压驱动复合腔电光调Q微晶片激光器的实验结果。

2 方案设计

复合腔电光调Q微晶片激光器的结构如图1所示。LiTaO₃晶体的两个通光端面严格平行,并在其上镀针对激光波长的光学介质膜,形成法布里-珀罗标准具,并以其作为微晶片激光器的输出镜。LiTaO₃晶体的x₃轴平行于激光偏振方向和外加电场方向。由于微晶片激光器纵模间隔大,可与增益谱线宽度相比拟,因而在腔中起振的纵模数较少,通常为单纵模起振。通过调节电光晶体温度和电压,可使激光波长与标准具某一透射率峰重合,此时谐振腔输出透射率最高,激光被抑制。而后瞬间对电光晶体施加一电压脉冲,造成标准具透射率峰偏离激光波长,输出透射率降低,产生激光脉冲。

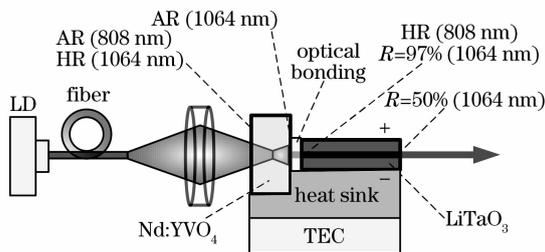


图1 复合腔电光调Q微晶片激光器结构示意图

Fig. 1 Configuration of coupled-cavity electro-optically Q-switched microchip laser

根据晶体光学原理,对于纵向应用的LiTaO₃晶体所构成的标准具,其透射率峰值波长与所加电压呈线性关系,可表示为

$$\frac{\Delta \lambda_p}{\Delta V} = \frac{n_e^3 \gamma_{33} \lambda_0}{2d}, \quad (1)$$

式中 λ_p 为标准具峰值透射率波长, V 为驱动电压, n_e

为非常光折射率, γ_{33} 为线性电光系数, λ_0 为激光波长, d 为电极间距。标准具透射谱半宽度可表示为

$$\Delta \lambda_{p/2} = \frac{\lambda_0^2 \arcsin[(1 - \sqrt{R_1 R_2})/2(R_1 R_2)^{1/4}]}{\pi n h}, \quad (2)$$

式中 R_1, R_2 分别为标准具两个端面的反射率, n 和 h 分别为LiTaO₃晶体的折射率和通光方向的长度。由(1)、(2)两式可得,通过增加电光晶体长度和提高端面反射率,可减小标准具透射谱半宽度,进而降低驱动电压。为此,针对这两个方面,设计了两套激光器实验方案。

方案1中电光晶体LiTaO₃长度为1.8 mm,在J. J. Zayhowski等的实验中,电光晶体长度为0.9 mm,因而在其他标准具参量相同的情况下,理论上驱动电压可降低到原来的一半。温控的激光二极管(LD)发射波长为808 nm,激光二极管尾纤芯径为100 μm,数值孔径为0.12,经耦合透镜聚焦后光斑芯径为50 μm左右。Nd:YVO₄和LiTaO₃采用光学胶胶合。Nd:YVO₄尺寸为3 mm×3 mm×0.5 mm,掺杂原子数分数为3%,其抽运端面的镀膜对808 nm增透,对1064 nm高反,胶合面镀膜对1064 nm增透。LiTaO₃尺寸为1 mm×3 mm×1.8 mm,胶合面镀膜对1064 nm具有97%的反射率,输出面反射率为50%,LiTaO₃上下两个面镀金膜作为电极,电极间距为1 mm。方案2中标准具朝向输出端的镀膜对激光的反射率为97%,Nd:YVO₄和LiTaO₃没有胶合,而是贴近放置,其他参量与方案1相同。

采用速率方程理论对激光器进行了仿真计算,结果表明激光器所需驱动电压大大低于传统电光调Q激光器的驱动电压,100 V以下即可得到调Q脉冲输出。图2所示为方案1的仿真结果。仿真参量为:在激光模式体积内的抽运吸收功率为30 mW,脉冲重复频率300 kHz,驱动电压90 V,激光器在低Q和高Q两个状态下的输出透射率分别为16.3%和8.2%。从图中可以看出,在抽运开始的30 μs内,由于增益不够高,激光器不起振。30 μs以后,在增益介质内积累的增益达到高Q状态下的阈值,产生激光脉冲。由于瞬态效应,在30~100 μs之间,输出脉冲峰值功率趋向稳定。在稳态下,脉冲宽度约8.5 ns,峰值功率6.5 W,脉冲波形为高斯形。翻转粒子数在高Q状态下对应的阈值附近振荡,振荡幅度与激光脉冲能量对应。当进一步降低驱动电压时,由于输出透射率提高会出现缺脉冲现象,即输出重复频率降格为150 kHz,甚至更低。而当提高驱动电压时,峰值功率先增加,脉冲宽度先变窄,而后

在一个较宽的电压范围(200~800 V)内,峰值功率和脉冲宽度基本保持不变,分别为 11 W 和 7 ns 左

右。对于方案 2,由于标准具透射谱半宽度进一步压窄,因而其驱动电压更低。

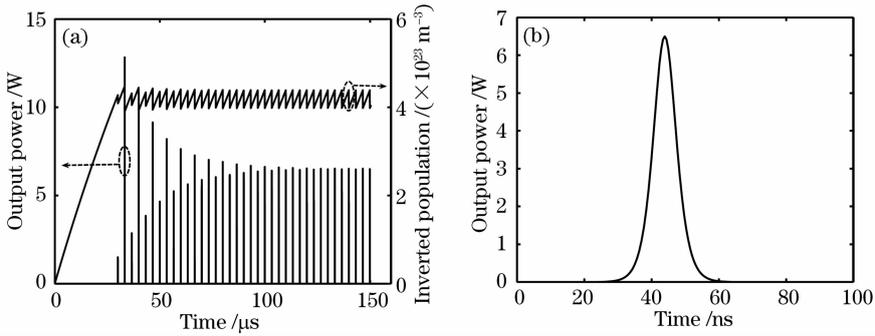


图 2 计算机仿真结果。(a)输出功率及翻转粒子数随时间的变化,(b)脉冲波形

Fig. 2 Results of computer simulation. (a) Output power and inverted population as functions of time, (b) pulse waveform

3 实验结果及分析

首先对方案 1 进行了初步实验。在实验中,首先调节 LiTaO_3 晶体的温度和驱动源的直流偏置电压,使得标准具透射率峰值波长与激光波长一致。此时,激光器输出透射率最高,阈值也最高。在实验过程中,抽运功率的改变导致增益介质内折射率和光程的改变,激光波长漂移,因此需实时调整 LiTaO_3 晶体的温度和直流偏置电压。实验中,温度调节范围为 $10\sim 30\text{ }^\circ\text{C}$,直流偏置电压可调节范围为 $-240\sim 0\text{ V}$,脉冲电压幅度可调节范围为 $0\sim 240\text{ V}$ 。为保证激光较稳定输出,激光器温度需控制在在工作点附近 $0.8\text{ }^\circ\text{C}$ 以内。激光输出脉冲宽度为 $5\sim 10\text{ ns}$,脉冲稳定性随重复频率的提高而降低,

如图 3 所示。在不同重复频率下,激光器输出性能如表 1 所示。图 4 为 300 kHz 下的单脉冲波形。在以上实验中,电压脉冲幅度为 240 V ,随着电压的降低,激光脉冲展宽,稳定性降低,在 120 V 以下,激光脉冲变得杂乱无章。

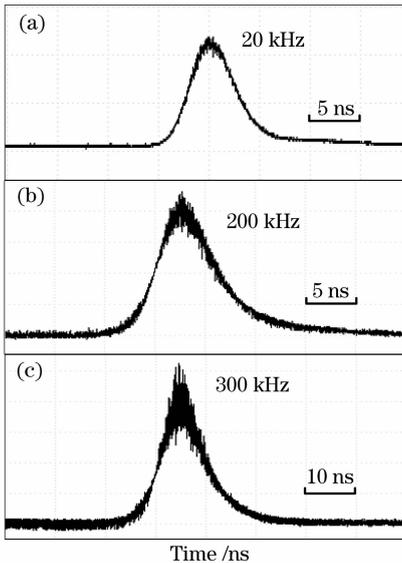


图 3 不同重复频率下的脉冲波形重叠

Fig. 3 Superposed pulses at different pulse repetition rates

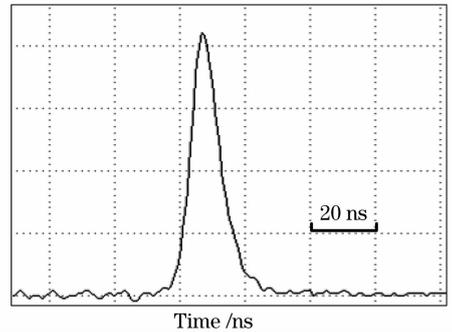


图 4 重复频率 300 kHz 下的单脉冲波形

Fig. 4 Single pulse shape at 300 kHz repetition rate

对于方案 2,由于标准具端面反射率提高,使得透射谱半宽度变窄,约为方案 1 的 $1/12$,这一方面减小了驱动电压,另一方面对激光器的温度控制也提出了很高的要求,难以得到长时间稳定输出的脉冲。但在短时间内($<1\text{ s}$)可得到高重复频率输出,图 5 为示波器采集到的 1 MHz 脉冲输出,脉冲宽度

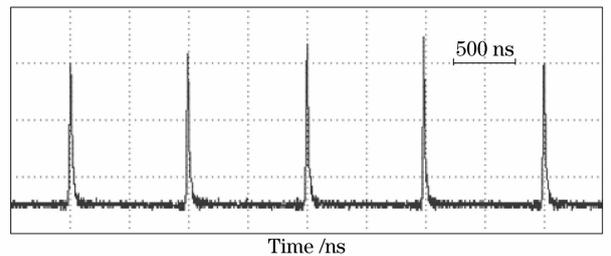


图 5 1 MHz 激光脉冲序列

Fig. 5 Pulse train at 1 MHz repetition rate

20 ns, 脉冲驱动电压为 175 V。

表 1 激光器在不同重复频率下的输出性能
Table 1 Laser performance at different pulse rates

Pulse rate /kHz	Pump power /mW	Pulse width /ns	Peak power /W	Peak power stability
20	83	6	83	±6%
200	176	6	21	±9%
300	184	10	9.4	±15%

实验中所采用的驱动电压高于理论值, 初步分析认为主要是由两方面的原因造成的, 首先, 标准具受平行度、面形等因素影响, 精细度降低。其次, 温度漂移引起激光波长漂移, 使得高 Q 情况下的输出透射率有变化, 为保证激光脉冲产生, 需加较高的电压幅值以提高谐振腔 Q 值。考虑 Nd:YVO₄, 光学胶(或空气)及 LiTaO₃ 的热光效应和热膨胀, 对胶合谐振腔, 温度改变 1 °C 与 190 V 电压的调制效果相同, 对于分立谐振腔, 温度影响与基底材料有关, 以钢为基底时, 温度改变 1 °C 与约 10 V 电压等效。为进一步提高脉冲稳定性, 需提高标准具加工精度, 并改进对激光器的温度控制。

4 结 论

对低压驱动高重复频率复合腔电光调 Q 微片激光器进行了理论和实验研究。分析了影响所需驱动电压幅度的因素, 提出通过压窄透射率谱线宽度来降低驱动电压, 并分别从增加电光晶体通光方向的长度和提高标准具端面反射率两个方面设计了两个实验方案。对方案 1, 在 240 V 驱动电压下, 得到 300 kHz 激光脉冲输出, 脉冲宽度 10 ns, 峰值功率 9.4 W。对方案 2, 在 175 V 驱动电压下, 在短时间 (<1 s) 内得到 1 MHz 脉冲输出, 脉冲宽度 20 ns。分析了实验中驱动电压高于理论值的原因, 并提出了改进措施。

参 考 文 献

1 Wang Chunyu, Li Xiaoli, Zang Huaguo *et al.*. Laser diode continuous-wave-pumped repetitive electro-optic Q-switched

- Nd:YVO₄ laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1441~1446
王春雨, 李小莉, 臧华国等. 激光二极管连续抽运电光调 Q Nd:YVO₄ 激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1441~1446
- 2 Zhang Shaojun, Tian Zhaobing, Yin Xin *et al.*. Study of a Nd:YAG laser with voltage-decreased electro-optical Q-switch of optical activity crystal La₃Ga₅SiO₁₄ [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 689~692
张少军, 田召兵, 尹鑫等. 退压式 La₃Ga₅SiO₁₄ 晶体电光调 Q Nd:YAG 激光器激光性能研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 689~692
- 3 E. Lebiush, R. Lavi, Y. Tzuk *et al.*. High repetition rate end-pumped electro-optic RTP Q-switch Nd:YVO₄ laser [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe-Technical Digest*, 2000. 52
- 4 I. W. Machintosh. Repetitive Q-switching of a continuously pumped Nd/YAG laser using a Fabry-Pérot interferometer[J]. *Phys. Lett.*, 1969, **28A**(7): 497~498
- 5 I. W. Machintosh. Double Etalon Q-switching of a continuously pumped Nd/YAG laser[J]. *Appl. Opt.*, 1969, **8**(10): 1991~1998
- 6 A. I. Ritus. Fabry-Pérot interferometer as laser modulator and controlled-reflectivity mirror [J]. *Quantum Electron.*, 1993, **23**(2): 169~171
- 7 N. V. Baburin, Yu. V. Borozdov, Y. K. Danileiko *et al.*. Q-switching of a high-power solid-state laser by a fast scanning Fabry-Pérot interferometer [J]. *Quantum Electron.*, 1998, **28**(7): 616~619
- 8 J. J. Zayhowski. Q-switched operation of microchip laser[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(8): 575~577
- 9 J. J. Zayhowski, C. Dill III. Diode-pumped microchip lasers electro-optically Q switched at high pulse repetition rates[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(17): 1201~1203
- 10 J. J. Zayhowski, C. Dill III. Coupled-cavity electro-optically Q-switched Nd:YVO₄ microchip lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7): 716~718
- 11 Zheng Chaosi, Wu Li, Zhang Shaofeng *et al.*. Diode-pumped solid-state lasers electro-optically Q-switched of tunable output loss[J]. *Chinese J. Lasers*, 1996, **A23**(7): 593~599
郑朝思, 吴砺, 张峭峰等. LD 泵浦固体激光器的输出损耗电光调 Q 技术[J]. *中国激光*, 1996, **A23**(7): 593~599