

文章编号: 0253-2239(2007)01-0090-4

外延单片式激光二极管抽运被动调 Q 微激光器*

饶海波¹ 廖云¹ 成建波¹ 闫平² 王云祥^{1,2}

(¹ 电子科技大学光电信息学院, 成都 610054)
(² 清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘要: 基于液相外延工艺, 实现了一种结构新颖的单片式被动调 Q 微片激光器。采用了在激光介质 Nd³⁺:YAG 表面直接液相外延生长一层具有饱和吸收特性的 Cr⁴⁺:YAG 膜的微谐振腔的结构, 由于是同质外延生长过程, 能够确保饱和吸收体与增益介质间(Nd³⁺:YAG/Cr⁴⁺:YAG)良好的界面特性。采用光纤耦合激光二极管, 在激光二极管输出为 1 W 的抽运条件下, 实现了峰值功率近千瓦、稳定重复频率在 4 kHz 以上、脉宽 1.8 ns、TEM₀₀ 单横模式、波长 1.064 μm 的调 Q 脉冲序列输出。在对新型单片式微激光器的性能报道的基础上, 阐述了外延单片式结构及其相应工艺的潜在优势。

关键词: 激光器; 微片激光器; 液相外延; 单片式; 被动调 Q

中图分类号: TN248 文献标识码: A

Laser Diode-Pumped Passively Q-Switched Monolithic Microchip Laser Based on Liquid Phase Epitaxy

Rao Haibo¹ Liao Yun¹ Cheng Jianbo¹ Yan Ping² Wang Yunxiang^{1,2}

(¹ School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)
(² Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: A novel monolithic passively Q-switched microchip laser is presented with a microcavity by directly growing a thin Cr⁴⁺:YAG film with saturable absorption on the surface of the laser medium Nd³⁺:YAG by liquid phase epitaxy. Because of the homogeneous epitaxial process, a good interface property is achieved between active medium Nd³⁺:YAG and saturable absorber Cr⁴⁺:YAG. Pumped by 1 W output of a fiber-coupled laser diode, the novel laser produces Q-switched pulses sequence with wavelength 1.064 μm, pulse duration 1.8 ns, pulse repetition over 4 kHz, TEM₀₀ mode and peak power nearly 1 kW. Except for the detailed descriptions of the performance of the laser, the potential advantages of the structure and relevant processes are also discussed.

Key words: lasers; microchip laser; liquid phase epitaxy; monolithic; passively Q-switching

1 引言

激光二极管抽运被动调 Q 微激光器是一种用于实现短脉冲(纳秒数量级)高重复频率(kHz 以上)强功率激光脉冲输出的新型高效微型固体激光器。

由于 Cr⁴⁺:YAG 的被动调 Q 激光器具有全固化的特征, 从而使得中、小功率脉冲激光器的微型化成为了可能。二极管抽运被动调 Q 微晶片激光器就是

近来倍受重视的一类微型固体激光器^[1~4], 其微激光器谐振腔的体积仅仅是几个立方毫米的数量级。

目前国内外已有的关于激光二极管抽运被动调 Q 微激光器的报道中, 主要以具有饱和吸收特性的 Cr⁴⁺:YAG 单晶作为被动调 Q 材料, 激光介质主要以 Nd³⁺:YAG 和 Nd³⁺:YVO₄ 等晶体为主, 微激光腔的结构是普遍采用将具有毫米数量级尺寸的饱和吸收体和激光增益介质直接粘合在一起的组合式结

* 四川省科技攻关计划(01GG1901)和国家 863 激光创新基金(20030510)资助课题。

作者简介: 饶海波(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电材料与器件及显示技术的研究。

E-mail: rhb@uestc.edu.cn

收稿日期: 2006-02-14; 收到修改稿日期: 2006-06-02

构^[1~4],此种结构的优势在于,在组合前可分别将两种晶体材料进行结构与性能的优化,但此类结构中两种晶体界面间光学、热学性能的匹配则成了制约整个器件性能的瓶颈。

为此,法国 LETI 的 L. Fulbert 等^[5]提出了直接在激光增益介质 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 上外延生长 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 薄膜的新型单片式微片激光器的新构思,由于是同质外延工艺,能够保证 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 饱和吸收层与激光介质 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 间良好光学、热学性能的实现,较之组合式结构,这种外延单片式谐振腔结构应具有更加优良的界面特性,从而实现优异的激光性能。

文中对采用液相外延工艺制备的单片式被动调 Q 微片激光器进行了报道。

2 实验描述

2.1 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 饱和吸收层的液相外延生长

本课题组在 2002 年,对 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 液相外延工艺和熔料配方进行了报道^[6,7],在 $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的外延温度下, $[111]$ 取向直径 1 英寸(合 25.4 mm)的 YAG 和 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 单晶片作衬底,实现了晶格完整无缺陷厚度 $250\text{ }\mu\text{m}$ 的 $\text{Cr,Ca}:\text{YAG}$ 层的外延生长。

典型的外延 $\text{Cr,Ca}:\text{YAG}$ 光吸收谱如图 1 所示,外延 $\text{Cr,Ca}:\text{YAG}$ 层在 $0.9\sim 1.1\text{ }\mu\text{m}$ 波段有明显的 Cr^{4+} 离子特征吸收峰,且高温退火后吸收谱没有明显的改变,说明外延 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 无需提拉法工艺要求的后退火过程^[8,9]。

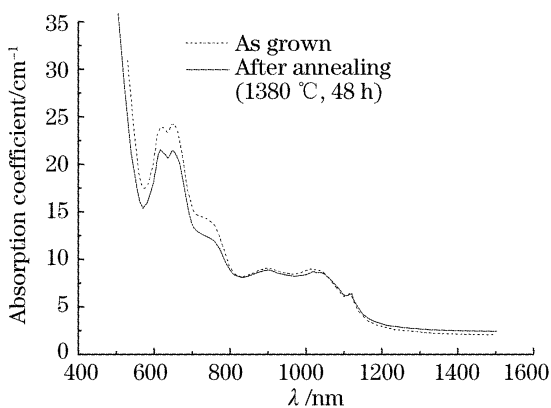


图 1 $\text{Cr,Ca}:\text{YAG}$ 外延层的吸收谱

Fig. 1 Absorption spectra of $\text{Cr,Ca}:\text{YAG}$ grown by liquid phase epitaxy

外延层典型数据为,当外延层具有 $\text{Y}_{2.97}\text{Ca}_{0.03}\text{Al}_{4.965}\text{Cr}_{0.035}\text{O}_{12}$ 的化学当量时,厚度为 $150\text{ }\mu\text{m}$ 的 $\text{Cr,Ca}:\text{YAG}$ 在 $\lambda=1.06\text{ }\mu\text{m}$ 处的可饱和吸收透射率差(即饱和与非饱和透射率之差) $\Delta T=17.5\%$,相当于国外文献中厚度 $0.5\sim 0.6\text{ mm}$ 提拉法生长的

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 单晶片的调 Q 效果^[1],因而完全能够满足腔长在毫米数量级的微片激光器被动调 Q 性能要求(由于 $\text{Cr,Ca}:\text{YAG}$ 外延层中的 Cr 离子呈现出多种价位,即有 Cr^{3+} , Cr^{4+} , Cr^{5+} 以及 Cr^{6+} 的存在^[6~8],所以,虽然能得到 Cr 离子总的掺杂原子分数为 0.035,但尚无法准确地确定 Cr^{4+} 的浓度)。

2.2 基于 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 外延层的单片式被动调 Q 微激光器

将外延有 $\text{Cr,Ca}:\text{YAG}$ 层、衬底为 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 的单晶片按常规的激光晶体加工工艺处理,即对晶片两个表面平行、抛光,然后切割成型($5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$),继而蒸镀表面介质膜,最后构成端面为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 、厚度 1 mm 左右的激光谐振腔。

实验中采用的微谐振腔典型结构参量如下:

增益介质 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 厚度 $1.1\sim 1.2\text{ mm}$,其中, Nd^{3+} 掺杂浓度为 0.03 的原子数分数(即 $\text{Y}_{2.97}\text{Nd}_{0.03}\text{Al}_5\text{O}_{12}$);

腔体加工后的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 外延饱和层厚度 $20\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ (相当于 $\Delta T\leq 2\%$),其中, Cr 离子掺杂浓度为 0.035 的原子数分数;

在微谐振腔的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 端面镀 808 nm 高透、 1064 nm 高反膜($T_{808}\geq 91\%$, $R_{1064}\geq 99.9\%$),用作抽运光入射面;另一端面($\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 外延面)镀 1064 nm 部分反射膜($R_{1064}=97.5\%$)作为激光的输出端口。

抽运源采用海特光电公司生产的光纤耦合输出激光二极管(LD),型号 A4113,光纤纤芯直径 $100\text{ }\mu\text{m}$,最大输出功率大于 2.5 W ,Agilent 54845A 型 1.5 GHz 带宽(采样率 8 GHz)示波器作脉冲波形记录仪,并配合 New Focus 14 GHz 高速光电探头,激光功率/能量计型号为 EPM2000。

2.3 激光实验结果与讨论

2.3.1 调 Q 脉冲宽度测试

在上述实验配置下,当激光二极管电流为 1.8 A 时,外延单片式微激光器开始出光,相应于阈值在 0.9 W (激光二极管抽运功率)。图 2 是在激光二极管电流为 2.5 A (输出功率为 1.4 W)时调 Q 脉冲示踪图像,脉冲半峰全宽(FWHM)为 1.8 ns ,且脉冲呈光滑的钟形,是稳定的、单一 TEM_{00} 模式振荡,说明外延微片激光器具有的稳定而良好的调 Q 性能。

当外延 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 层厚度为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 左右时,测得的 $\lambda=1064\text{ nm}$ 处初始透射率为 89% ,可饱和透射率差 $\Delta T\approx 1.5\%$,属于可饱和损耗远远小于腔体

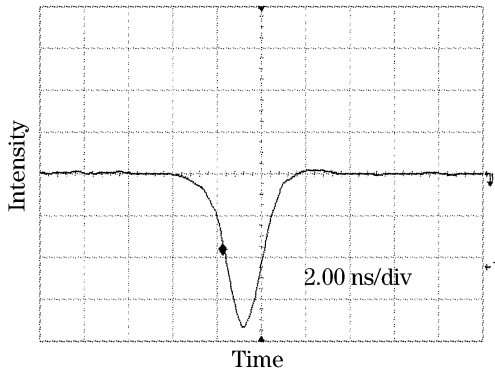


图 2 调 Q 脉冲的示踪图像

Fig. 2 Oscilloscope trace of 1.8 ns pulse

寄生损耗与腔输出耦合损耗之和的情况(即 $\gamma_{\text{par,rt}} + \gamma_{\text{op}} \gg \gamma_{\text{sat,rt}}$ [1]), 此时调 Q 脉冲宽度 (t_w) 应满足 [1]

$$t_w = 4S_P t_{rt} / \gamma_{\text{sat,rt}},$$

其中 S_P 为脉冲形状因子, 取值 0.86; t_{rt} 是腔内光线的往返渡越时间。

代入 1.2 mm 的腔长数据, 可以得到 $t_w \approx 1.4$ ns 的理论脉冲宽度值, 与实验结果是相当一致的。进一步的计算表明, 增加外延可饱和吸收层 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的厚度到 $50 \mu\text{m}$ 时, 即使系统仍处于可饱和损耗远远小于其他损耗的模式(同上), 外延微片激光器件也能实现亚纳秒级的脉冲输出。

2.3.2 脉冲重复频率稳定性实验

调 Q 激光器稳定输出的重复频率高低是其重要的性能参量指标, 受激光器结构和振荡模式选择等多方面因素的影响, 该指标在调 Q 激光器的应用上有着重要的意义。

测试表明, 外延被动调 Q 激光器能够在高达 20 kHz 的重复频率下实现稳定的输出。图 3 是激光二极管抽运电流约为 2.1 A (功率 1.1 W) 时, 外延微激光器的多脉冲序列示踪图像。脉冲序列稳定, 脉冲间幅度、间隔波动起伏小, 此时脉冲序列周期 $118 \mu\text{s}$ (即 8.5 kHz 的重复频率)。

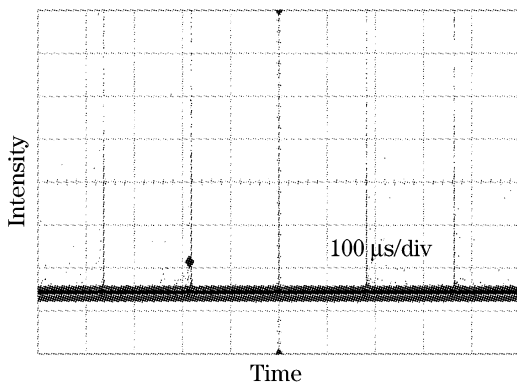


图 3 调 Q 脉冲序列的示踪图

Fig. 3 Oscilloscope trace of the pulse train

2.3.3 激光特性与抽运速率的关系

图 4 是外延微片激光器 ($\Delta T \approx 1.0\%$) 调 Q 脉冲输出特性(脉冲宽度、重复频率以及峰值功率)与激光二极管抽运电流的变化关系曲线图, 其中, 曲线 A 为脉冲峰值功率 (0.1 kW/div), 从脉冲能量、脉冲形状因子出发估算得到 [1,10]; 曲线 B 脉冲宽度 (1 ns/div); 曲线 C 脉冲重复频率 (1 kHz/div)。

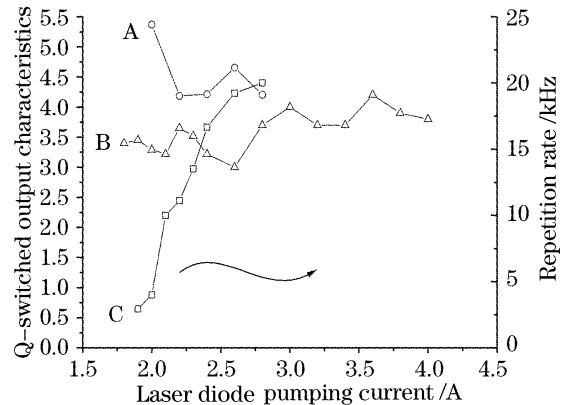


图 4 调 Q 输出与抽运电流的关系曲线

Fig. 4 Output characteristics of microchip lasers as a function of the laser diode current

调 Q 脉冲峰值功率和脉冲宽度(曲线 A 和 B)在激光二极管激励区间内(即 0.9~2.5 W 的抽运功率)基本是稳定的, 不随抽运功率增加而变化。调 Q 脉冲的重复频率(曲线 C)则随抽运电流的增加而逐渐的、稳定地增大, 直到 20 kHz 以上, 然后脉冲序列开始出现紊乱。上述激光脉冲性能的基本特点与组合式结构微片激光器的结论一致 [1]。

图中脉宽随抽运功率的升高有不规则的变化, 即波动现象, 应该归结于系统的温度变化, 由于测试时晶体没有严格的温控, 晶体温度的变化势必引起晶体增益、可饱和吸收的变化, 另外实验过程中激光二极管温度的变化也会引起激光二极管输出波长和功率的波动, 应该说诸多因素的结果造成了上述脉宽数据的波动。

图中脉宽较理论值偏大 (>3 ns) 以及峰值功率数据偏低 (≤ 500 W) 应该也是测试方式下微片激光器长时间工作的热效应现象所致。

3 结 论

通过液相外延工艺, 在激光增益介质 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 表面直接外延生长一层 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 可饱和吸收体, 从而构成了单片式被动调 Q 微激光谐振腔。

由于液相外延可实现较高的掺杂浓度, 厚度为 $150 \mu\text{m}$ 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 外延层在 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 处的

可饱和和收透射率差 $\Delta T = 17.5\%$, 相当于文献报道中提拉法工艺厚度 $0.5 \sim 0.6 \text{ mm}$ 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 单晶片的调 Q 效果, 因此, 外延微激光器能够在结构上实现更窄的腔体长度, 从而实现更窄的调 Q 脉冲输出。

采用外延工艺, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 不仅直接生长在激光增益介质 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 基片上, 保证了良好的晶体界面, 而且外延 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 无需晶体的生长后退火工艺。

外延可饱和吸收体 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 厚度为 $20 \sim 30 \mu\text{m}$, $\Delta T \leq 2\%$; 增益介质 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 厚度 $1.1 \sim 1.2 \text{ mm}$; $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 端面镀 97.5% 的部分反射膜作激光输出端口。采用光纤藕合二极管抽运, 在激光二极管输出为 1 W 时, 实现了峰值功率近 kW 、稳定重复频率在 4 kHz 以上、脉宽 1.8 ns 的波长 $1.064 \mu\text{m}$ 调 Q 脉冲序列输出, 脉冲呈稳定的 TEM_{00} 单横模状态。

参 考 文 献

- 1 J. J. Zayhowski, C. Dill III. Diode-pumped passively Q-switched picosecond microchip lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(18): 1427~1429
- 2 John J. Zayhowski. Passively Q-switched Nd:YAG microchip lasers and applications [J]. *J. Alloys and Compounds*, 2000, **303~304**: 393~400
- 3 R. Feldman, Y. Shimony, Z. Burshtein. Passive Q-switching in Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG monolithic microchip laser [J]. *Opt. l Materials*, 2003, **24**(1~2): 393~399
- 4 L. Fulbert, J. Marty, B. Ferrand *et al.*. Passively-Q-switched monolithic microchip laser [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 1995, **15**: 178
- 5 Xinning Tian, Ping Yan, Qiang Liu *et al.*. Pre-pumped passively Q-switched Nd:YAG/Cr:YAG microchip laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(9): 536~537
- 6 Rao Haibo, Cheng Jibo, Huang Zonglin *et al.*. The growth and absorption characterization of Cr, Ca:YAG by liquid-phase epitaxy [J]. *J. Crystal Growth*, 2002, **236**(1~3): 191~196
- 7 Rao Haibo, Cheng Jianbo, Gao Tao *et al.*. The growth of Cr, Ca:YAG by liquid phase epitaxy [J]. *Acta Optica Sinia*, 2002, **22**(1): 107~109 (in Chinese)
饶海波, 成建波, 高涛等. Cr, Ca:YAG 的液相外延生长 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(1): 107~109
- 8 A. Sugimoto, Y. Nobe, K. Yamagishi. Crystal growth and optical characterization of Cr, Ca:Y₃Al₅O₁₂ [J]. *J. Crystal Growth*, 1994, **140**(3~4): 349~354
- 9 Xu Ju, Deng Peizhen, Wang Siting *et al.*. Absorption and oxygen-annealing characterization of Cr in Cr, Ca:YAG crystals [J]. *Chin. J. Lasers*, 1996, **23**(4): 363~365 (in Chinese)
徐军, 邓佩珍, 王四亭等. Cr, Ca:YAG 晶体中 Cr⁴⁺ 的吸收和退火特性 [J]. *中国激光*, 1996, **23**(4): 363~365
- 10 J. J. Zayhowski, P. L. Kelly. Optimization of Q-switched lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(9): 2220~2225