

文章编号: 1001-3806(2003)04-0282-03

DPSS 单频自调 Q 946nm Nd³⁺, Cr⁴⁺ YAG 微片激光器

杨 林 王海林 黄维玲 丘军林 刘百宁

(华中科技大学激光国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 报道了激光二极管泵浦的低阈值自调 Q 946nm Nd³⁺, Cr⁴⁺ YAG 微片激光器的实验研究。激光器实现稳定的单频、基横模和偏振输出, 输出斜率效率达到 22%。946nm 激光直接腔外倍频得到 473nm 蓝光输出, 光-光倍频转换效率达到 15%。

关键词: 激光二极管; 自调 Q; 准 3 能级系统; Nd, Cr YAG 晶体

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Diode-pumped self-Q-switched single frequency 946nm Nd³⁺, Cr⁴⁺ YAG microchip laser

Yang lin, Wang Hailin, Huang Weiling, Qiu Junlin, Liu Baining

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: A stable low-threshold self-Q-switched diode-pumped 946nm Nd³⁺, Cr⁴⁺ YAG microchip laser operating in single frequency and fundamental transversal mode is presented in this paper. The output slope efficiency of 22% is achieved. Combining the microchip and an external frequency doubler, 473nm blue laser emission is achieved with an optical conversion efficiency of 15%.

Key words: diode laser; self-Q-switched; quasi-three-level system; Nd, Cr YAG crystal

引 言

调 Q 激光器已广泛应用于遥感、激光通信和非线性光学。大多数应用场合要求激光器单横模和单频运行, 输出的激光脉宽和脉冲波形稳定。被动调 Q 因为结构简单、价钱便宜、高效率、易于生产等优点而引起人们的广泛关注。Cr YAG 具有良好的光学特性、光化学性、热稳定性以及在 0.9μm ~ 1.2μm 波长范围内有大的吸收截面, 已广泛应用作各类掺 Nd 离子激光器的被动 Q 开关^[1]。Cr 离子能被高溶度的掺杂到 YAG 晶体中, 饱和吸收体可以很薄, 因此, Cr YAG 饱和吸收体非常适合于微片激光器。通常微片被动调 Q 激光器由激光增益介质 Nd YAG (几百个微米到 1mm) 和 Cr YAG (几百个微米) 紧紧贴在一起构成谐振腔, Nd YAG 的泵浦端面镀 808nm 的增透和 1064nm 的高反膜, Cr YAG 输出端面镀 1064nm 部分反射膜。采用带尾纤输出

的激光二极管端面泵浦无需任何耦合装置因而结构十分紧凑。激光器腔长很短故脉冲宽度很小(甚至小于 1ns), 脉冲峰值功率很高从而大大提高了激光器倍频效率, 所以, 腔后可以紧贴倍频晶体 KTP 实现倍频 532nm 绿光输出, 整个激光器结构紧凑而且效率高^[2]。

Nd, Cr YAG 自调 Q 激光器结合了增益介质 Nd YAG 和饱和吸收体 Cr YAG 于一体, 除此之外, 在晶体内部还有光栅损耗效应导致激光器输出具有单横模、单纵模和偏振等优点^[3,4]。虽然 Nd, Cr YAG 双掺晶体的研究工作开展的比较早, 但主要集中在 1.06μm 谱线^[3~5]。双掺晶体中的 Nd³⁺ 有 3 条较强的荧光谱线, 它们的中心波长及对应的激光能级的跃迁各是 946nm (⁴F_{3/2}-⁴I_{9/2}), 1.06μm (⁴F_{3/2}-⁴I_{11/2}) 和 1.32μm (⁴F_{3/2}-⁴I_{13/2})。相对于 1.06μm 谱线, 946nm 谱线增益低, 阈值高起振困难, 而且 946nm 激光振荡的下能级离基态很近, 实际上它是基态能级分裂出来的一个子能级, 其能量只比基态高 857cm⁻¹, 因而该能级受热激发影响最大, 在常温下有热激发的粒子集居和重吸收。饱和吸收体增加了激光器腔内的损耗, 导致 946nm 被动调 Q 激光器的阈值提高起振更加困难。Nd YAG 946nm

作者简介: 杨 林, 男, 1975 年 1 月出生。博士研究生。主要研究方向为激光二极管泵浦固体激光器。

收稿日期: 2002-07-16; 收到修改稿日期: 2002-09-10

波长激光器倍频得到 473nm 波长的激光是全固体蓝激光最有效的手段之一。

1 实验装置

实验中采用最大输出功率为 2W 的半导体激光器(型号为 SDL2462 AW268),该激光器的发散角为 $\theta_x = 12^\circ, \theta_y = 32^\circ$ 。发光区的面积是 $1\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$,中心发射波长是 808nm。半导体激光器发出的光是像椭圆高斯光束,必须经过耦合系统整形变换成旋转对称高斯光束才能获得最佳的泵浦效果。微片激光器实验装置如图 1 所示,包括了 946nm 的腔外倍频晶体 KNbO₃。耦合系统由 F₁, F₂ 和 F₃ 3 片透镜组成, F₁ 和 F₃ 是非球面透镜, F₂ 是柱面镜,焦距分别是 4.5mm, 50mm 和 11mm。激光二极管的泵浦光经过整形和聚焦后,传输效率为 90% 左右,光斑大约是 $40\mu\text{m} \times 40\mu\text{m}$,可以实现和激光器基模的最佳匹配。实验中所用的双掺晶体为北方光电所生长,掺杂浓度为 1% 的 Nd³⁺ 和 1% 的 Cr⁴⁺。激光谐振腔由 1.5mm 长的 Nd, Cr YAG 晶体单独构成,晶体的泵浦端面镀 808nm 的增透膜和 946nm 全反膜,另一面即输出面镀反射率为 97% 的 946nm 部分反射膜。用铝箔包裹晶体放入水冷紫铜块中,保持较好的热接触,水温保持在 15℃,可以降低 Nd, Cr YAG 946nm 准 3 能级系统的阈值。腔外倍频晶体 KNbO₃ 长 6mm。用响应时间小于 1ns 的快速光电二极管探测后由 500MHz 的数字示波器记录自调 Q 脉冲波形。

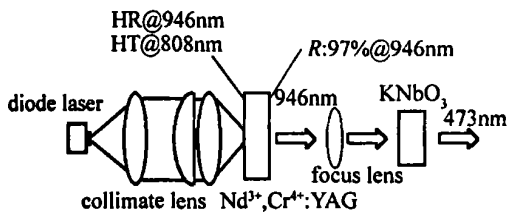


Fig. 1 Experimental setup of the self-Q-switched 946nm/473nm microchip laser

2 实验结果及讨论

调整 LD 温度,使其发射谱处于 Nd YAG 的吸收峰 808.5nm 处。实验中当吸收泵浦功率增加到 161mW 时,开始有激光输出即达到激光阈值。图 2 为 946nm 平均输出功率和脉冲重复频率随吸收泵浦功率的变化曲线。当吸收泵浦功率 184mW 时,平均输出功率为 7.9mW,脉冲重复频率是 1.8kHz,脉宽 5ns,脉冲能量为 4.4μJ,峰值功率 880W。随着泵浦功率的增加,激光输出随之增加,当吸收泵浦功

率增加到 382mW 时,946nm 激光输出功率为 48.5mW,脉冲重复频率是 11kHz,脉宽 5ns,脉冲峰值功率仍为 880W。自调 Q 946nm 激光器的斜率效率高达 22%。脉冲重复频率随着泵浦功率的增加线性增长,脉冲波形相当稳定,脉冲峰值功率波动小于 1%。图 3 是数字示波器记录的脉冲波形。用高精度的光栅光谱仪测量自调 Q 微片激光输出光谱,激光中心波长为 946.06nm,谱线宽度小于 0.02nm,测量的光谱示于图 4。946nm 激光输出,通过聚焦镜直接耦合进 6mm 长的 KNbO₃ 倍频晶体进行腔外倍频。当输入功率为 8mW 时,473nm 平均输出功率为 1.2mW,倍频转换效率为 15%,脉冲宽度为 4.1ns,相应脉冲峰值功率 48W。随着 946nm 功率的增加倍频效率有所下降,这可能是由于 KNbO₃ 晶体未采取温控所造成的。

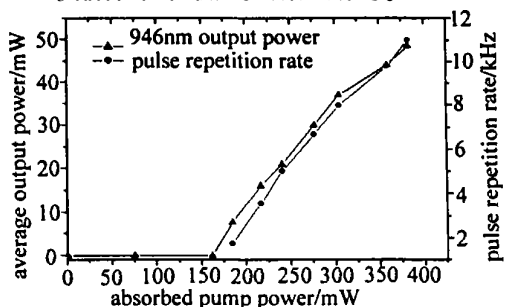


Fig. 2 Average output power and pulse repetition rate versus absorbed pump power

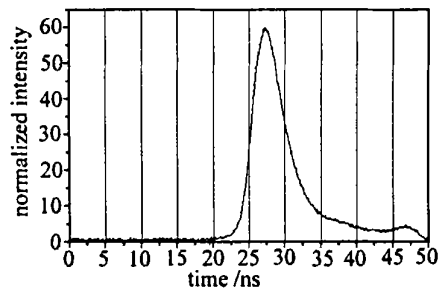


Fig. 3 Oscilloscope trace of self-Q-switched pulse

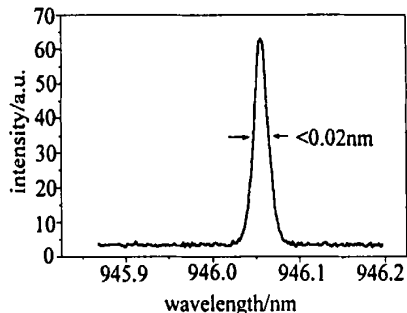


Fig. 4 Laser spectrum measured by a high resolution grating spectrometer

经检测,微片激光器的输出是 100% 的线偏光,而且偏振方向和泵浦激光二极管的偏振方向无关。

这和报道的 Nd,Cr YAG 1064nm 激光器的特性相一致。在自调 Q 激光器腔外 100cm 的远处观测它的横模分布,得到接近衍射极限的 TEM₀₀基横模。实验中作者所选用的晶体增益介质非常薄,在高功率泵浦下也没有跳模现象的发生,从而确保激光器单频运转。激光器的脉冲峰值波动小于 1%,几乎保持常数脉冲波形稳定而且没有双脉冲现象发生。

在实验过程中,发现以下因素对 Nd,Cr YAG 946nm 激光器的输出参数影响较大。

(1) 双掺晶体长度与掺杂浓度:双掺晶体长度的选择是由 946nm 的准 3 能级的特点所决定的,Nd,Cr YAG 对 808nm 的吸收系数为 6cm^{-1} ,研究表明,1.5mm 是吸收泵浦光和重吸收的最佳均衡点^[6],合适的晶体长度能够提高激光器效率。饱和吸收体的初始透过率为 80%,高的透过率降低了出光阈值,但另一方面却导致了宽的脉冲宽度和小的脉冲能量。如果提高 Cr 离子的掺杂浓度,则可提高饱和吸收体的调节深度,从而得到窄的脉宽和高的脉冲能量,当然也会提高激光器的阈值。

(2) 泵浦光斑的尺寸:如果泵浦光斑太大,则泵浦光能量密度过低就达不到起振阈值。实验中的半导体激光器的耦合系统是由两个非球面透镜和一个柱面镜组合而成。当采用另一个柱面镜和一个普通球面镜组合时,未有激光输出。说明泵浦光斑过大达不到 3 能级系统的阈值,但在相同的条件下测试 Nd YAG:Cr YAG 1064nm 被动调 Q 激光器,起振容易。另一方面光斑大还会导致无用的泵浦光的热积累,增强了晶体热透镜效应,降低了激光器输出光束质量。对于大多数二极管激光泵浦的固体激光器,最佳的 $W_p/W_1 = 1.2 \sim 1.3$ (W_p 为泵浦光斑半径, W_1 为激光器基模半径)^[7]。但在实验中采用了泵浦光斑半径小于激光器的基模半径的设计,提高泵浦光能量密度获得高的斜率效率输出。

(3) 二极管激光器的温度控制:实验中发现,LD 的温度控制对微片激光器的整体效率影响非常大,而且输出功率比 1064nm 4 能级激光器要敏感的多。图 5 给出了在一定的泵浦功率下激光器输出功率随 LD 温度变化的关系曲线。当 LD 的温度控制在 23.3 时,946nm 输出最大功率是 40.1mW;而

当温度降到 17.0 时,输出减小到 25.3mW。反之,当温度升高到 26.0 后,激光器几乎无功率输出。这是由于 946nm 准 3 能级激光器阈值高和增益晶体泵浦吸收长度很短所致,较小的泵浦波长的漂移会导致输出大幅度的变化。双掺晶体的冷却也很重要,低温能减小 3 能级激光器的阈值。946nm 腔外倍频效率为 15%,如果采用腔内倍频和优化倍频晶体长度能够进一步提高倍频效率。

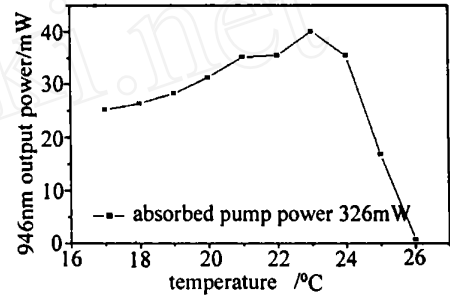


Fig. 5 946nm output power as a function versus the temperature of diode laser

3 结论

报道了激光二极管泵浦的低阈值自调 Q 946nm Nd³⁺,Cr⁴⁺ YAG 微片激光器,实现了稳定的单频、单横模和 100% 偏振输出。在吸收泵浦功率 382mW 时,946nm 激光平均输出功率为 48.5mW,脉宽为 5ns,脉冲峰值功率 880W,激光器斜率效率达到 22%。当 946nm 输入功率为 8mW 时,经腔外直接倍频 473nm 平均输出功率为 1.2mW,脉冲宽度为 4.1ns,相应脉冲峰值功率 48W,倍频转换效率为 15%。

参考文献

- [1] Wormhoudt J, Shorter J H, Cook C C *et al.* Appl Opt, 2000, 39: 4418 ~ 4424.
- [2] Zayhowski J J. Journal of Alloys and Compounds, 2000, 303/304: 393 ~ 400.
- [3] Li S Q, Zhou S H, Wang P *et al.* Opt Lett, 1993, 18(3): 203 ~ 205.
- [4] Zhou S H, Lee K K, Chen Y C *et al.* Opt Lett, 1993, 18(17): 1418 ~ 1420.
- [5] Dong J, Deng P, Lu Y T *et al.* Opt Lett, 2000, 25(15): 1101 ~ 1103.
- [6] Fan T Y, Byer R L. IEEE J Q E, 1987, QE23: 605 ~ 613.
- [7] Chen Y F, Wang S C. J O S A, 2000, B17: 1835 ~ 1840.