

文章编号: 0258-7025(2002)09-0769-04

用布氏片实现有效连续和脉冲单频绿光输出

郑 权¹, 赵 岭², 檀慧明¹, 钱龙生¹⁽¹⁾ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130022; ⁽²⁾ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提要 通过对布氏片实现选频的理论分析, 采用腔内插入双布氏片和布氏片与 Q 开关相结合的方法, 分别实现了较大功率单频绿光的连续和脉冲稳定输出。在注入抽运功率为 1.3 W 时, 连续单频输出平均功率达到 124 mW, 脉冲单频输出峰值功率达到 108 W。

关键词 布氏片, 双折射滤光片, 单频, Q 开关, 绿光

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Single-frequency CW and Pulse Operation of Diode-pumped Green Lasers

ZHENG Quan¹, ZHAO Ling², TAN Hui-ming¹, QIAN Long-sheng¹

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130022

² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

Abstract By analyzing the effects of a Brewster plate inserted a KTP intra-cavity frequency-doubling green laser, by using multi-Brewster plates or combining a Brewster plate with a Q-switch, a high power single frequency green laser stable output is achieved. When incident pump power is 1.3 W, CW SLM green laser with average power of 124 mW and Q-switched SLM green laser with peak power of 108 W are obtained, respectively.

Key words Brewster plate, birefringent filter, single frequency, Q-switch, green laser

1 引 言

二极管激光器(LD)抽运 Nd:YVO₄/KTP, Nd:YAG/KTP 结构的 532 nm 绿光激光器在很多领域有广泛的应用。但这种激光器通常为多纵模状态运转, 在腔内倍频过程中, 腔内各振荡纵模的合频产生和空间烧孔效应引起的各纵模交叉饱和两个非线性过程共同作用, 导致光能量在各个纵模间不断转换, 产生绿光输出功率的波动, 即所谓的“绿光问题(green problem)”^[1], 这在快速印刷、图像处理、数据读写等一些很重要的应用中是不允许的。

解决“绿光问题”的一个直接方法就是迫使激光器单频运转^[2]。对于 1064 nm 基波激光器, 只要谐振腔长度小于 1 mm 就可以实现。但对腔内倍频的二次谐波绿光激光器, 缩短腔长是很困难的, 于是人

们提出了腔内插入损耗元件(如标准具、四分之一波片、双折射滤光片)、短程吸收和环形腔等方法来实现单频输出。这些方法各有局限性: 插入标准具或四分之一波片元件会引起较大的损耗; 短程吸收则要求激光工作物质很短, 无法得到较高的抽运吸收效率; 环形腔是目前大功率单频绿光激光器所采取的主要结构, 但存在效率低、结构复杂, 成本高的缺点; 尽管双折射滤光片引入的损耗很小, 但其选频能力有限, 不容易保证大功率单频绿光的稳定输出^[3]。

文献[4]报道了一种腔内插入布氏片, 使其与倍频用的 KTP 双折射晶体结合形成“双折射滤光片”实现选频的方法。该文用 LD 抽运 5 mm 长, 掺杂 1.1 at.-% 的 Nd:YAG 晶体, 在抽运功率 350 mW 时, 获得了 3.1 mW 的连续单频绿光输出。我们通过对比布氏片选频理论的深入分析, 用布氏片实现了

收稿日期: 2001-06-25; **收到修改稿日期:** 2001-09-10

基金项目: 国家 863 高技术计划资助项目(863-307-13-02)。

作者简介: 郑权(1973—), 男, 博士后, 主要从事激光器件与非线性频率转换技术的研究。E-mail: zhengquan ok@163.com

近 50 mW 的单频绿光连续稳定输出。继续加大抽运功率,采用腔内插入多布氏片和布氏片与 Q 开关相结合等方法,分别实现了较大功率单频绿光的连续和脉冲稳定输出。

2 布氏片选频

光波从一种介质进入另一种介质时,其反射率大小取决于入射光的电场矢量方向、入射角和两介质的相对折射率。根据 Fresnel 定律,可以把入射光的电矢量分解为平行和垂直于入射面的 p 波和 s 波,它们的反射率 R_p 和 R_s 分别为^[5]

$$R_p = \tan^2(\alpha - \beta) / \tan^2(\alpha + \beta) \quad (1)$$

$$R_s = \sin^2(\alpha - \beta) / \sin^2(\alpha + \beta) \quad (2)$$

式中 α , β 分别为入射角和折射角,可以由折射定律求出。图 1 给出了光波从空气入射到玻璃表面时两分量的反射率曲线(空气的折射率按 1,玻璃的折射率按 1.52 计算)。图中虚线表示两条实线的平均。图 1 曲线最明显的特征是有个约 57° 的布氏角 i_B ,此时对电场矢量在入射面内的 p 波的反射率为零,而对电场矢量垂直于入射面的 s 波,在玻璃表面约有 15% 的反射率。

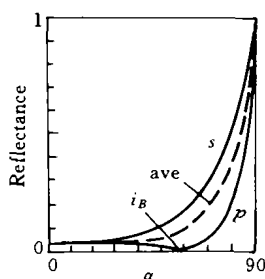


图 1 光波在玻璃表面的反射率

Fig. 1 Surface reflectance of glass ($n = 1.52$)

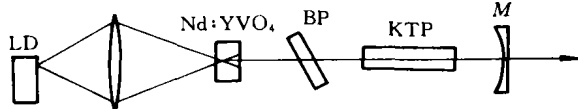


图 2 插入布氏片的 LD 抽运 Nd:YVO₄/KTP 腔内倍频绿光激光器

Fig. 2 A LD-pumped Nd:YVO₄/KTP green laser with a Brewster plate

下面分析插入布氏片的绿光激光器的运转情况^[6]。图 2 中, Nd:YVO₄ 的左端面镀 808 nm 增透和 1064 nm 高反膜作为谐振腔的高反镜,右端面镀

1064 nm 增透膜;谐振腔输出镜 M 左凹面(曲率半径 50 mm)镀 1064 nm 高反和 532 nm 增透膜,右平面镀 532 nm 增透膜;KTP(Ⅱ类临界位相匹配)两端均镀 1064/532 nm 增透膜。布氏片采用 K₉ 玻璃,厚度为 0.5 mm。LD, Nd:YVO₄ 和 KTP 均采取了严格的温控措施。

Nd:YVO₄ 发出的光为线偏振光,由 Fresnel 定律可知,只有当其偏振方向与布氏片 BP 的 p 偏振面重合时损耗才为零。对Ⅱ类临界位相匹配双折射晶体 KTP,作倍频使用时其光轴与晶体平行并与入射基频光的偏振方向成 45° 角。当基频线偏振光通过 KTP 时分解为 o 光和 e 光,位相差 δ 为

$$\delta = 2\pi d(n_o - n_e) / \lambda \quad (3)$$

式中, d 为 KTP 的长度, n_o 和 n_e 分别为不同纵模对应下 o 光和 e 光在 KTP 中的折射率, λ 为不同纵模对应下真空中的波长。根据上面的分析,只有对 $\delta = m\pi$, 即返回到 BP 片的光偏振方向与原方向相同的纵模,布氏片对其损耗才为零。对其他纵模,则存在不同的损耗。

可见,腔内的布氏片有两个作用:一是对不同频率纵模布氏角略有不同,对某一纵模为布氏角时,对其他纵模的 p 分量有一定的反射损耗;二是不同频率纵模往返经过 KTP 时偏振方向会发生偏转,布氏片对存在 s 分量的纵模也会引起反射损耗。显然,后者是主要的。在激光器中,有时百分之几的损耗就可以完全抑制该纵模形成了,布氏片恰好通过对各纵模的选择性损耗实现了选频。

显然,该单频激光器的理想运转情形为:选取的纵模应是增益曲线中心频率纵模;该中心频率纵模光波偏振方向与 BP 片 p 偏振面重合;振荡纵模偏振方向应与 KTP 晶体光轴呈 45° ;KTP 晶体的长度或折射率满足(3)式。这样,才会获得具有最大增益的单纵模绿光输出。同时还应该使用较短的激光晶体和缩短谐振腔长来减少纵模数和增加纵模间隔,为布氏片选频创造良好的前提。

使用图 2 所示的装置,用 500 mW 的 LD 抽运掺杂浓度 3.0 at.-%,厚度 0.7 mm 的 Nd:YVO₄,谐振腔长约 13 mm,用 9 mm 的 KTP 腔内倍频,通过精细地调节布氏片的角度和 KTP 的温控,可获得最大的连续单频绿光输出为 46 mW。

3 较大功率连续波单频绿光激光器

很显然,单个布氏片的选频能力有限,在较高的

抽运功率下还会形成多纵模。若几个布氏片组合起来形成类似“玻璃堆”的结构, 则对入射光波 p 分量和 s 分量的反射率都有提高, 尤其是对 s 分量, 会成倍地增加反射损耗。而对所选择的中心频率, 因其始终是严格地以 p 波的偏振方向并按布氏角通过各布氏片, 理论上“玻璃堆”对该纵模损耗仍为零, 确保了高抽运功率下的高效率、大功率的单频绿光输出。图 3 给出了两个布氏片组合的情形。

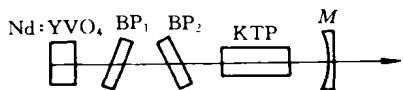


图 3 两个布氏片组合选模

Fig. 3 Mode selection with couple Brewster plates

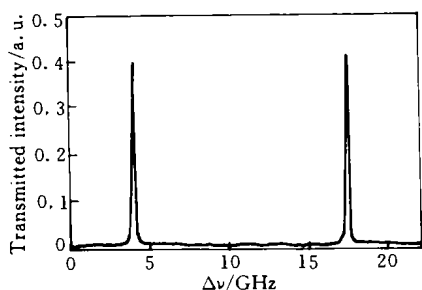


图 4 连续单频绿光激光器纵模扫描

Fig. 4 Fabry-Perot scan of the CW SLM green laser

图 3 中谐振腔长 15.5 mm, 输出镜 M 曲率半径为 50 mm。用 1.3 W 的 LD 抽运掺杂浓度 3.0 at.-%, 厚度 1.0 mm 的 Nd:YVO₄, 用 9 mm 的 KTP 腔内倍频, 在未加布氏片时, 绿光功率 180 mW, 10 个左右的纵模间相互耦合, 激光器输出功率不稳, 噪声很大; 当加入布氏片 BP₁ 后, 绿光功率为 139 mW, 除中心频率外还出现相对较弱的 4 个纵模, 但纵模间相对稳定, 激光器处于低噪声运转状态; 加入布氏片 BP₂ 后, 绿光功率 124 mW, 单纵模稳定振荡。图 4 为 Fabry-Perot 扫描出的单纵模情况。

可见, 加入 BP₁ 时抑制了较多的纵模, 激光器输出功率下降较大; 而加入 BP₂ 时只是抑制掉了除中心频率外的几个较弱纵模, 功率下降很小。可以预见, 继续加大抽运功率情况下若再加入布氏片, 完全可以获得 200 mW 的单频绿光输出。

4 被动调 Q 脉冲单频绿光激光器

在图 2 装置中加入两面镀 1064 nm 增透膜的可

饱和吸收体——Cr:YAG 晶片, 可以实现绿光的调 Q 输出。谐振腔结构如图 5 所示。

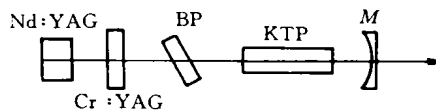


图 5 脉冲单频绿光激光器谐振腔

Fig. 5 Resonator of Q-switched SLM green laser

用 1.3 W 的 LD 抽运掺杂浓度 1.0 at.-%, 厚度 2.0 mm 的 Nd:YAG, 用 9 mm 长的 KTP 腔内倍频, 在未加 BP 片时, 绿光功率在 160 mW 以上, 13 个左右的纵模间相互耦合导致激光器输出功率不稳, 噪声很大; 加入 BP 片后, 绿光功率为 116 mW, 除中心频率外还出现相对较弱的 3 个纵模, 激光器处于低噪声连续运转状态; 加入 Cr:YAG ($T_{0(1064\text{ nm})} = 87\%$) 后, 实现了单频调 Q 脉冲绿光的稳定输出, 平均功率为 69 mW, 峰值功率达到 108 W, 重复频率高达 17 kHz。图 6 为单频绿光 Q 脉冲的序列。表明即使是对被动调 Q, 单频绿光脉冲的振幅和周期稳定性也是相当好的。图 7 是输出激光经标准具形成的干涉环, 表明是很好的单频。

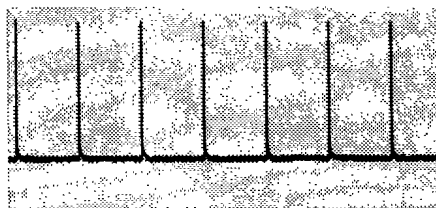


图 6 调 Q 单频绿光脉冲序列

Fig. 6 Pulse series of Q-switched SLM green laser

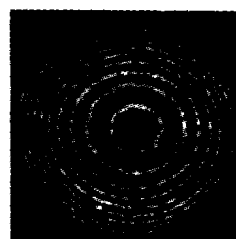


图 7 标准具干涉环

Fig. 7 Interference pattern of Q-switched SLM green laser by an etalon

该实验表明, Cr:YAG 晶体在被动调 Q 过程中还起到了选模的作用。一方面, Cr:YAG 的慢饱和吸收漂白性质形成的“动态光阑”效果实现了横模的选

择;另一方面,由于不同纵模形成振荡的难易程度有差别,相对较弱的纵模仅在阈值附近振荡,形成激光振荡所需的时间较长,而调 Q 脉冲持续时间很短,因此最终形成并充分放大的仅是增益最大的单纵模。当中心频率的纵模形成激光振荡后, Q 开关即被打开,从而获得了单频脉冲绿光输出。

5 结 论

通过对布氏片与 KTP 组合实现选频的理论分析,采用腔内插入多布氏片和 Q 开关结合等方法,分别实现了大功率单频绿光的连续和脉冲稳定输出。在注入抽运功率为 1.3 W 时,连续单频输出平均功率达到 124 mW,脉冲单频输出峰值功率达到 108 W。与常见的环行腔大功率激光器产品相比,具有效率高、体积小、装调方便、器件成本低的优点及很好的市场前景。

参 考 文 献

- 1 Sten Helmfrid, Kimio Tatsuno. Stable single-mode operation of intracavity-doubled diode-pumped Nd:YVO₄ lasers: theoretical study [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**(3):436~445
- 2 T. Baer. Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG lasers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1989, **3**(9):1175~1180
- 3 A. L. Bloom. Modes of a laser resonator containing tilted birefringent plates [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **64**(4):447~452
- 4 Hideo Nagai, Masahiro Kume, Issey Ohka *et al.*. Low-noise operation of a diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG laser using a Brewster plate [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(6):1164~1168
- 5 M. Young. Optics and Laser [M]. Beijing: Advanced Education Press, 1983. 190~194 (in Chinese)
- 6 Zheng Quan, Tan Huiming. Study of a LD-pumped all-solid-state single-frequency Nd:YVO₄/KTP green laser [J]. *Laser & Infrared (激光与红外)*, 2001, **31**(4):208~209 (in Chinese)