

文章编号: 0253-2239(2004)05-641-4

# 高重复率电光调 Q 的高光束质量 Nd:YVO<sub>4</sub>板条激光器

石 鹏<sup>1</sup> 张恒利<sup>2</sup> 汪永东<sup>2</sup> Robert Diart<sup>2</sup> 杜可明<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800  
<sup>2</sup> EdgeWave GmbH, Steinbachstr. 15, D-52074 Aachen, Germany)

**摘要:** 部分端面抽运混合腔板条激光器可以在紧凑的空间内实现大功率高光束质量的激光输出。利用这一技术并结合具有增益高、荧光寿命短等特点的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 配合新型高重复率的电光 Q 开关, 易于实现高频窄脉冲高光束质量的激光输出。在德国 EdgeWave GmbH 进行了混合腔电光调 Q 激光器的合作研究中, 实现了高重复率近衍射极限的输出; 在以 5 kHz 的高重复率运转时, 获得了单脉冲能量 7.2 mJ, 脉宽 5.7 ns, 平均功率约 36 W 的脉冲; 当重复率高达 50 kHz 时, 输出的激光脉冲的参量是单脉冲能量 1.6 mJ, 脉宽 9.5 ns, 平均功率超过 80 W。实验所测的光束质量因子  $M^2$  小于 2。

**关键词:** 应用光学; 半导体抽运固体激光器; 电光调 Q; 板条激光器; Nd:YVO<sub>4</sub>; 光束质量

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

## High Repetition Rate Electro-Optically Q-Switched Nd:YVO<sub>4</sub> Slab Laser with High Beam Quality Output

Shi Peng<sup>1</sup> Zhang Hengli<sup>2</sup> Wang Yongdong<sup>2</sup> Robert Diart<sup>2</sup> Du Keming<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and fine Mechanics, The Chinese Academy of Science, Shanghai 201800  
<sup>2</sup> EdgeWave GmbH, Steinbachstr. 15, D-52074 Aachen, Germany)

(Received 20 May 2003; revised 30 June 2003)

**Abstract:** Partially end-pumped slab laser using hybrid resonator is a favourable concept to scale high power with high beam quality in compact dimension. Nd:YVO<sub>4</sub> have the advantages of large laser cross section and short fluorescence lifetime. These features are required in high repetition rate short pulse length applications. A electro-optically Q-switched slab laser with hybrid resonator has been realized. High repetition rate pulse with high beam quality output was measured. At 5 kHz operation, Q-switched laser with pulse energy of 7.2 mJ and pulse width of 5.7 ns was obtained. The energy and width were 1.6 mJ and 9.5 ns respectively when the repetition rate reached 50 kHz. The beam quality factor  $M^2$  was lower than 2.

**Key words:** applied optics; diode-pumped solid-state laser; electro-optically Q-switching; slab laser; Nd:YVO<sub>4</sub>; beam quality

大功率半导体抽运固体激光器由于具有高效、长寿、体积小、使用与维护方便等优点, 得到了越来越广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。在激光铣床、打标、抛光等应用领域中, 需要调 Q 运转的脉冲激光。重复率、脉宽、

光束质量等因素都会直接影响到加工的精度和效率。在固体激光器的设计中, 激光晶体中热畸变极大地限制了激光器在大功率下高光束质量的能力。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体作为一种阈值低、效率高的增益介质, 备受人们关注, 又由于其发射截面大、荧光寿命短等优点, 适合于高效率高重复率的调 Q 运行<sup>[3-6]</sup>。但同时 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体又有热导差、抗损伤阈值低

E-mail: shipeng@siom.ac.cn

收稿日期: 2003-05-20; 收到修改稿日期: 2003-06-30

等缺点,限制了其在大功率下的应用。

德国夫琅和费激光技术研究所的杜可明等<sup>[7]</sup>提出了部分端面抽运混合腔板条激光器的方案,可以在紧凑的空间内实现在大功率高光束质量的激光振荡输出<sup>[7~9]</sup>。板条激光器优异的散热性能使Nd:YVO<sub>4</sub>运行于高平均功率输出成为可能。另外,由于混合腔只需很短的腔长就能实现大功率高光束质量的输出,有利于缩短脉宽。因此,用部分端面抽运的混合腔Nd:YVO<sub>4</sub>板条激光器进行电光调Q运转,易于得到大功率、高重复率、窄脉冲激光。本文介绍这一技术在德国EdgeWave GmbH开展合作研究的实验结果。

混合腔由一凸一凹两个全反柱面镜M<sub>1</sub>和M<sub>2</sub>放置于共焦位置组成(见图1)。其中作为输入镜的凹镜M<sub>1</sub>的曲率半径为R<sub>1</sub>,输出镜为凸镜M<sub>2</sub>,其曲率半径为R<sub>2</sub>,于是有R<sub>1</sub>>R<sub>2</sub>。而腔长则为L=(R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub>)/2。它们的柱面轴都位于竖直平面内。于是,在水平面内,它们构成了一个共焦非稳腔(图1),在竖直平面内则构成平-平腔[图2(a)]。

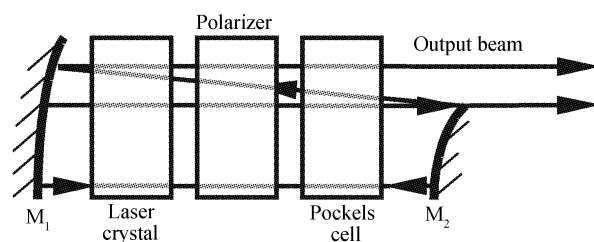


Fig. 1 Confocal unstable resonator

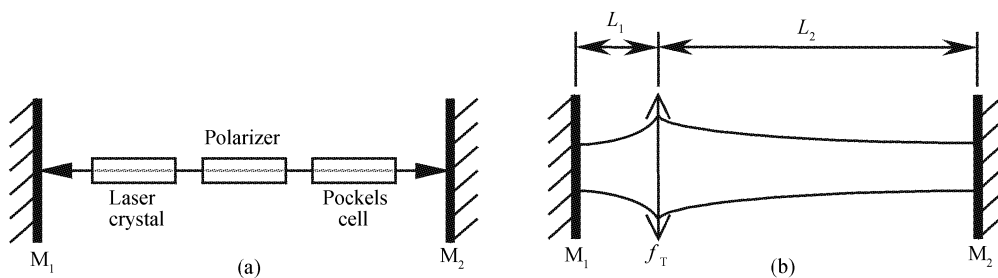


Fig. 2 Stable resonator. (a) Flat-flat cavity; (b) Equivalent cavity

把激光晶体水平放置于混合腔内靠近输入镜M<sub>1</sub>的位置,以便进行端面抽运。同时,晶体的大尺寸方向也就位于非稳腔方向,因此,可以利用非稳腔抑制高阶模,从大尺寸的增益介质中得到接近衍射极限的光束输出。而在晶体的小尺寸方向上则可以按照类似传统端面抽运的棒状激光器来设计。

在水平方向上所采用的共焦非稳腔是非稳腔中最常用的一种结构,这是由于在共焦非稳腔的设计中从输入腔镜往输出腔镜传播的激光振荡会被输入腔镜自动准直,即输出激光自动准直。显然,非稳腔方向上的热透镜会直接地影响输出光束质量的,因此,必须在非稳腔方向上实现均匀的抽运从而消除在该方向上的热梯度。共焦结构按照其g因子是否大于零还可以分为正支非稳腔与负支非稳腔两类。相比而言,正支结构不会在腔内产生振荡激光的焦点<sup>[10]</sup>,同时在相同腔长下腔内的激光发散角也较小,这些优点都利于电光调Q,因此我们选用了正支谐振腔。

在竖直方向上,抽运光并不会象传统板条激光器那样充满整个晶体端面,而只是集中于晶体中央,故称为部分端面抽运。这种抽运方式会在晶体内产生一个热透镜,此时的腔则等效为图2(b)所示。选

择合适的腔参量,当抽运功率在工作范围内变化时,均保证以下条件成立

$$0 < \left(1 - \frac{L_1}{f_T}\right) \left(1 - \frac{L_2}{f_T}\right) < 1$$

则竖直方向上的腔始终保持处于热稳状态。

因此,我们的混合腔是由一个方向上的正支共焦非稳腔和另一个方向上的平-平热稳腔组成。这种设计具有象端面抽运的棒状激光器那样的高重合率,以及象薄片激光器和传统板条激光器一样的良好的散热能力,在文献[7~9]中都利用这种设计实现了大功率近衍射极限的激光输出。

电光Q开关要求数千伏的高压脉冲驱动,因此高重复率很难达到。千赫兹以上的高重复率调Q通常要使用声光Q开关。而声光Q开关属于慢开关,难以得到几十纳秒以下的窄脉冲。并且由于它是基于衍射损耗的机理,应用于短腔时的效果大打折扣。我们用电光系数和抗损伤阈值都比较高的偏硼酸钡(BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, BBO)晶体加工成板条状制作泡克耳斯(Pockels)盒,使电光Q开关的工作电压大大降低(本实验中λ/4电压不到3000V,并有望降至1500V以下),并能用于高平均功率窄脉冲激光器。

同时研制了能够以几十千赫的高重复率产生几千伏高压脉冲的高速高压脉冲开关电路来驱动它,组成了一种新颖的电光 Q 开关(详细情况将另文介绍)。

泡克耳斯盒放置于在谐振腔内靠近输出镜的位置。在增益介质与泡克耳斯盒之间加入了检偏器。Nd:YVO<sub>4</sub> 输出激光的偏振方向在水平方向上,与检偏器的方向一致。在泡克耳斯盒上未加电压时,激光振荡可以正常产生。当给泡克耳斯盒加上  $\lambda/4$  电压时,理想状态下,从激光晶体产生的水平偏振的振荡激光经过泡克耳斯盒后,再由输出镜 M<sub>2</sub> 反射回来再次通过泡克耳斯盒,偏振状态旋转 90°,成为竖直方向上的偏振,被检偏器损耗掉,从而抑制激光振荡的产生。但由于在非稳腔方向上从 M<sub>2</sub> 向 M<sub>1</sub> 传播的激光是发散的,这样并不是全部激光的偏振状

态都会正好旋转 90° 成为竖直方向上的线偏振光,结果导致损耗降低,并有可能造成关不住的情况。我们采用正支非稳腔减小了发散角,在本实验的条件下,能够保证正常的调 Q 运行。

整体实验装置如图 3 所示。抽运源采用了由 8 个线列阵半导体激光器组成的半导体激光器堆(LD Stack)。每个线列阵半导体激光器前都装有微柱透镜对输出激光的快方向进行准直,使其在快方向基本为平行光。由于混合腔要求在激光晶体上的热分布为准一维的分布,即在非稳腔方向上抽运光的分布要均匀,故把抽运光用两个柱面镜在水平方向上会聚到一个平波导中进行均匀混合,从而得到水平方向上均匀分布的抽运线,再用由柱透镜和球面镜组成的成像系统耦合到增益介质上。

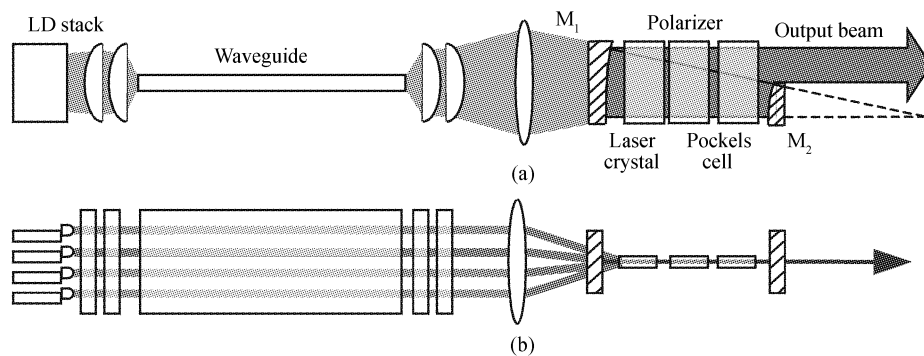


Fig. 3 Experimental setup. (a) Horizontal direction; (b) Vertical direction

实验采用了 Nd 掺杂离子数分数为 0.003, 尺寸为 1 mm×10 mm×12 mm 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体作为增益介质。两个 10 mm×12 mm 的大面安装微通道热汇进行有效水冷,两个 1 mm×12 mm 的端面抛光并镀上 808 nm 和 1.06  $\mu$ m 的增透膜。两个全反柱面腔镜的曲率半径分别为  $R_1 = 500$  mm 和  $R_2 = 350$  mm,腔长约为 80 mm 左右,输出耦合约为 30%。

实验结果如图 4~图 7 所示,它们给出了不同重复率下的功率曲线、单脉冲能量曲线和脉宽曲线,以及典型的调 Q 脉冲波形。连续输出时,当抽运为

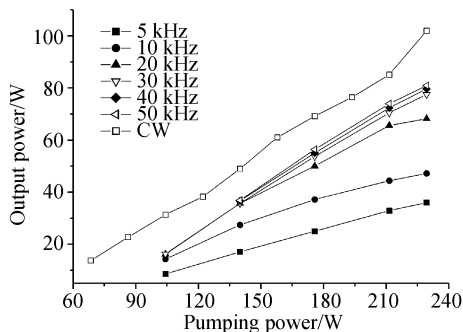


Fig. 4 Pumping power vs output power

229 W 时得到了 102 W 的输出,斜率效率约为 52%,光-光效率约为 45%。连续抽运调 Q 输出时,以 5 kHz 的高重复率输出了脉宽 5.7 ns 的窄脉冲,单脉冲能量 7.2 mJ,平均功率达到了 36 W;当重复率高达 50 kHz 时脉宽为 9.5 ns,单脉冲能量 1.6 mJ,平均功率超过 80 W。

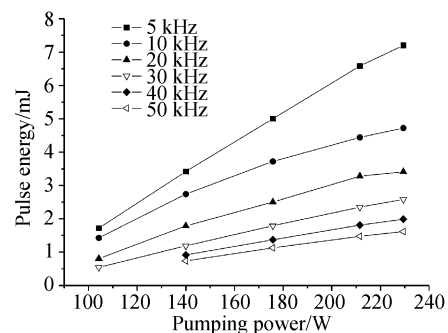


Fig. 5 Pulse energy

图 8 为连续输出时光束的远场分布,在稳腔与非稳腔两个方向上都是典型的高斯分布,在非稳腔方向上,由于输出耦合镜的边缘引起的硬边衍射在

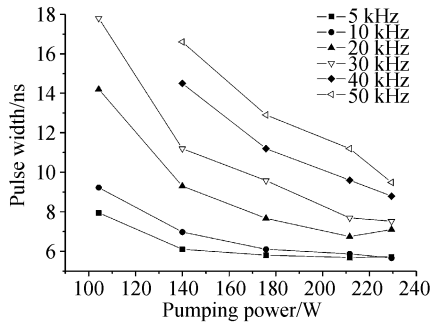


Fig. 6 Pulse width

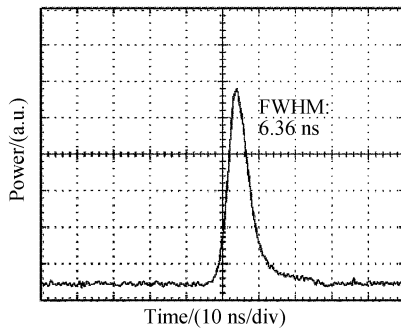


Fig. 7 Typical pulse profile

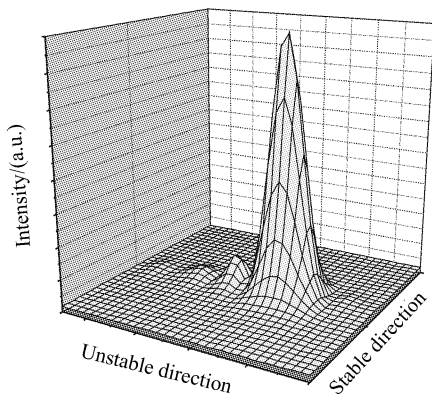


Fig. 8 Far-field distribution with side lobes

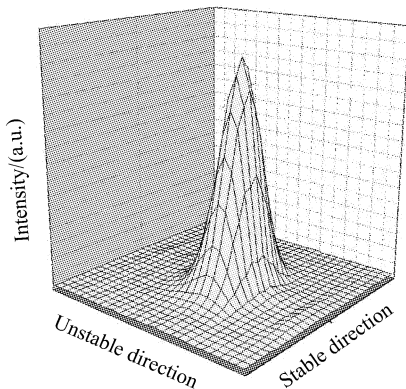


Fig. 9 Far-field distribution after spatial filter

远场分布里形成了一系列小旁瓣。图 9 为利用空间

滤波器切除了非稳腔方向上的旁瓣后振荡激光的远场分布。在文献[9]中测量了连续输出时这两种情况下的光束质量,在切除旁瓣前,非稳腔方向上  $M^2=1.3$ ,稳腔方向上  $M^2=1.5$ ;在经过空间滤波后,光束传播因子  $M^2$  分别为 1.09 和 1.2。在调 Q 运行时,检测到的调 Q 脉冲的光强分布与连续运转时的分布没有明显变化。

**结论** 综上所述,我们用电光调 Q 的端面抽运混合腔 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条激光器,获得了高平均功率近衍射极限的高重复率窄脉冲激光输出,在 5 kHz 运转时,得到了 7.2 mJ、5.7 ns 的窄脉冲;重复率高达 50 kHz 时脉宽为 9.5 ns,输出平均功率超过 80 W,单脉冲能量 1.6 mJ。

**致谢** 感谢德国 BMBF/DLR 为在 EdgeWave GmbH 进行的合作研究提供资助。

#### 参 考 文 献

- 1 Du K, Biesenbach J, Ehrlichmann D *et al.*. Lasers for materials processing: Specifications and trends. *Opt. Quantum Electron.*, 1995, **27**(12):1089~1102
- 2 Rutherford T S, Tulloch W M, Gustafson E K *et al.*. Edge-pumped quasi-three-level slab laser: design and power scaling. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(2):205~219
- 3 Jin Tianfeng, Yuan Yiqian, Miao Tongqun *et al.*. High efficiency 1.064  $\mu\text{m}$  output in diode pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(5):598~600 (in Chinese)
- 4 Li Jian, He Jingliang, Hou Wei *et al.*. Performance of a laser-diode pumped high efficient Nd:YVO<sub>4</sub> laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(4):484~488 (in Chinese)
- 5 Damzen M J, Trew M, Rosas E *et al.*. Continuous-wave Nd:YVO<sub>4</sub> grazing-incidence laser with 22.5 W output power and 64% conversion efficiency. *Opt. Commun.*, 2001, **196**(1~6):237~241
- 6 Hua Renzhong, Liao Yan, Franjic Kresimir *et al.*. A 49.5 W Nd:YVO<sub>4</sub> laser using the disc-anvil configuration. *Advanced Solid-State Lasers, Technical Digest*, Quebec city, Canada, OSA. 2002. TuC1
- 7 Du Keming, Wu Nianle, Xu Jiandong *et al.*. Partially end-pumped Nd:YAG slab laser with a hybrid resonator. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(5):370~372
- 8 Schnitzler C, Schmidt G, Hofer M *et al.*. A 500 W high brightness diode end pumped Nd:YAG slab laser. *Advanced Solid-State Lasers, Technical Digest*, Quebec City, Canada, OSA. 2002. WE2
- 9 Shi Peng, Zhang Hengli, Li Daijun *et al.*. Diode end-pumped high power Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser. *Proc. SPIE*, 2002, **4914**:146~149
- 10 Koechner W. *Solid-State Laser Engineering*, 5th rev. and updated ed., Berlin: Springer Press, 1999. 217~279