

文章编号: 0258-7025(2007)07-0901-07

端面抽运全固态皮秒被动锁模激光器

蔡志强^{1,2,3}, 王 鹏^{1,2,3}, 温午麒^{1,2,3}, 丁 欣^{1,2,3}, 姚建铨^{1,2,3}

¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所, 天津 300072
² 天津大学教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072
³ 南开大学、天津大学联合研究院, 天津 300072

摘要 利用国产半导体可饱和吸收镜 (SESAM), 设计了不同的腔型结构, 实现了平均功率 5 W 单路输出, 5 W 双路输出, 输出透过率可调节的半导体可饱和吸收镜线型腔连续锁模 (CWML) 激光器, 双向输出六镜环行腔连续锁模激光器等。将半导体可饱和吸收镜放在腔内的特殊位置, 利用一种新的技术方法实现了锁模激光器的频率翻倍。利用由非线性晶体 KTP 和双色镜构成的非线性镜 (NLM), 实现了端面抽运 Nd: YVO₄ 激光器的 4 W 锁模输出。

关键词 激光器; 皮秒被动锁模; 半导体可饱和吸收镜; 非线性镜

中图分类号 TN 248.1; TN 248.3⁺5 **文献标识码** A

LD End-Pumped All-Solid-State Picosecond Passively Mode-Locking Lasers

CAI Zhi-qiang^{1,2,3}, WANG Peng^{1,2,3}, WEN Wu-qi^{1,2,3}, DING Xin^{1,2,3}, YAO Jian-quan^{1,2,3}

¹ Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China
² Key Laboratory of Laser and Optoelectric Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China
³ Cooperated Institute of Nankai University and Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract With a homemade semiconductor saturable absorber mirror (SESAM), different cavities have been designed to achieve mode-locking. Linear cavity continuous-wave mode-locking (CWML) lasers of single output beam with average power of 5 W, double output beams with average power of 5 W and adjustable output transmission have been presented. Bi-directional operation ring cavity passively continuous wave (CW) mode-locked laser end-pumped by a fiber coupled laser diode has been constructed. By placing the semiconductor absorber mirror in a special location, a new mode-locking technique for multiplying the pulse repetition rate of a picosecond passively mode-locking laser was successfully demonstrated. And 4 W mode-locking output of LD end-pumped Nd: YVO₄ laser was achieved by using a nonlinear mirror, which is constituted by a combination of a KTP frequency-doubling crystal and a dichroic mirror with high reflectivity for the second harmonic and partial transmission for the fundamental.

Key words lasers; picosecond passively mode-locking; semiconductor saturable absorber mirror; nonlinear mirror

1 引 言

全固态皮秒被动锁模激光器在工业加工、非线性频率变换、光谱学、医疗诊断等领域具有广泛的应用, 具体可用于晶片检测、精细三维印刷技术、细胞

流体计数仪、染料激光器的抽运和再生放大器的皮秒种子源等^[1~4]。相对于传统的半导体激光抽运全固态调 Q 激光器, 皮秒锁模激光器的脉宽可短至几皮秒, 在相同的输出功率基础上, 可以提供更高的峰值功率以满足不同的需求。利用腔外倍频技术, 以

收稿日期: 2006-12-04; 收到修改稿日期: 2007-01-08

基金项目: 国家自然科学基金 (NSFC-10471071, NSFC-60637010) 资助项目。

作者简介: 蔡志强 (1980—), 男, 四川高县人, 博士研究生, 主要从事全固态激光器、锁模激光器及其非线性频率变换的研究。E-mail: sailor123a@163.com

导师简介: 姚建铨 (1939—), 男, 江苏无锡人, 中国科学院院士, 教授, 博士生导师, 目前从事激光及非线性频率变换方面的研究。E-mail: jqyao@tju.edu.cn

1064 nm的基频光为基础,可以实现高效的二倍频、三倍频、甚至四倍频光的输出;利用腔外倍频和频技术,可实现三基色红绿蓝的输出,为激光 RGB 电视提供光源^[5]。

相对较传统的染料锁模激光器、灯抽运激光器而言,半导体抽运的全固态锁模激光器具有结构紧凑、效率高、稳定性、可靠性好、寿命长等优点。

随着精细微加工的精度越来越高,皮秒激光器由于其较短的脉冲宽度,可以获得相对纳秒激光器更小的热烧蚀效应,因此在材料的微加工领域获得了更广泛的重视。利用再生放大的皮秒激光脉冲,可以获得更好的切割质量以及加工精度。可实现激光焊接、激光切割、激光打孔、激光雷达与大气探测、激光精细微加工、激光内雕、生物医学领域、激光快速成型超快探测/超快光谱学和半导体材料加工与修复等领域的应用。

实现全固态皮秒锁模的方法主要有:利用半导体可饱和吸收镜(SESAM)实现锁模;利用非线性晶体的级连二阶非线性锁模^[6]。本文介绍了作者在半导体可饱和吸收镜连续锁模方面取得的成果,实现了双路输出、单路输出、输出透过率可调、驻波腔、环形腔、频率翻倍等锁模激光器。同时,展示了非线性镜实现的 Nd:YVO₄连续锁模运转。

2 半导体可饱和吸收镜被动锁模激光器

可饱和布拉格反射镜(SBR)或者半导体可饱和吸收镜是采用分子束外延(MBE)或者金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术将半导体可饱和吸收体直接生长在半导体布拉格反射镜上形成的器件,1992年由在贝尔实验室工作的 Keller 等研制成功并应用于锁模激光器^[7]。与主动锁模和染料被动锁模激光器相比,半导体可饱和吸收镜被动锁模激光器具有结构简单、稳定可靠、光束质量好等特点。实验中采用的半导体可饱和吸收镜由中国科学院半导体研究所生长。该半导体可饱和吸收镜包含 25 对生长在 GaAs 基片上的高低折射率的 $\lambda/4$ 厚的 GaAs/AlAs 布拉格反射镜,15 nm厚的低温生长的 In_{0.25}Ga_{0.75}As 吸收体生长在 52 nm厚的 GaAs 层中。半导体可饱和吸收镜的调制深度小于 1%。

2.1 双路输出半导体可饱和吸收镜锁模激光器

最经典的半导体可饱和吸收镜锁模激光器结构如图 1(a)所示,采用两个曲率镜构成四镜折叠腔,

灵活地控制激光增益介质(GM)和半导体可饱和吸收镜上的光斑半径。该结构调试容易,是大多数文献所采用的结构。由于采用折叠镜作为输出镜,所以有两路锁模光输出,通常情况下,两路光功率几乎相等。实验中,采用图 1(a)的变形如图 1(b)所示,光纤输出的 808 nm 激光二极管(LD)抽运源端面抽运掺杂原子数分数为 0.5%的 *a* 切割 Nd:YVO₄ 晶体,晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 5 mm,一端镀 1064 nm高反,808 nm增透膜,另外一端镀 1064 nm增透膜,晶体用铜皮包裹,放铝制夹具内通水冷却。在臂长分别为 22 cm,31.5 cm,116 cm和 10 cm,总腔长约 180 cm的情况下,获得了 83 MHz 的锁模脉冲输出。在注入功率为 17 W 时,获得双路输出总功率 5.3 W,光-光转换效率 31.2%,斜效率 34.7%,如图 2 所示。

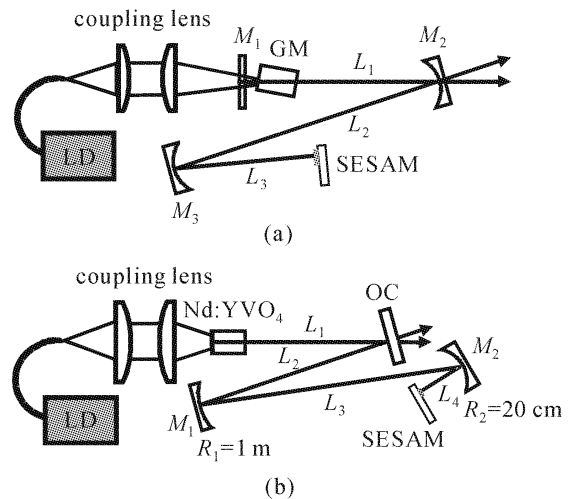


图 1 双路输出半导体可饱和吸收镜锁模激光器
Fig. 1 Double output beams mode-locked laser with SESAM

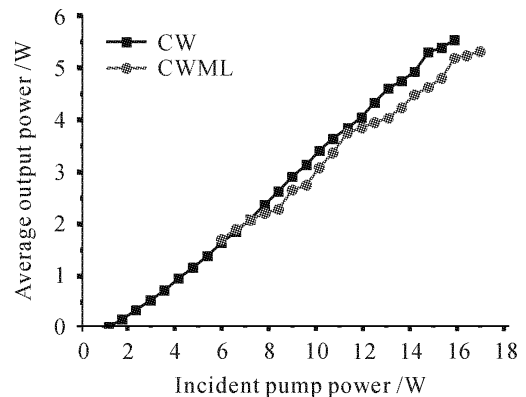


图 2 双路输出激光器输出功率曲线图
Fig. 2 Output power versus incident pump power of laser in Fig. 1(b)

2.2 单路输出半导体可饱和吸收镜锁模激光器
通常的锁模光路在折叠镜处输出,激光器具有

两路输出光,而应用时通常仅能使用其中的一路激光。使得在同样功率需求下需将抽运功率提高两倍以上,这大大增加激光系统的造价及不稳定性。为此,首先研究了一种新型结构的激光腔,实现了单端连续锁模输出,平均输出功率高于5 W。如图3所示,该激光器采用6镜折叠腔结构,腔长约165 cm。Nd:YVO₄晶体尺寸为3 mm×3 mm×6 mm,掺杂原子数分数为0.5%,腔镜一面镀1064 nm高反膜和808 nm增透膜,另一面镀1064 nm减反膜。对1064 nm高反的折叠镜曲率半径分别为1 m和30 cm,平面输出镜对1064 nm的透过率约20%,锁模激光脉冲从该输出镜单向输出。最终在注入功率为16 W时,获得了平均功率超过5.3 W单端输出的连续锁模脉冲,长时间运转没有观察到半导体可饱和吸收镜的破坏现象,其输出功率如图4所示。由于YVO₄晶体的一面作折叠镜,使得该激光器的设计和调试较为复杂。

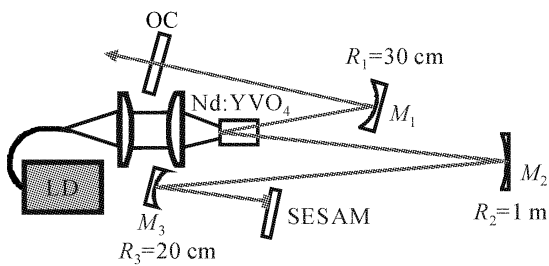


图3 单路输出半导体可饱和吸收镜锁模激光器之一
Fig. 3 First single output beam mode-locked laser with SESAM

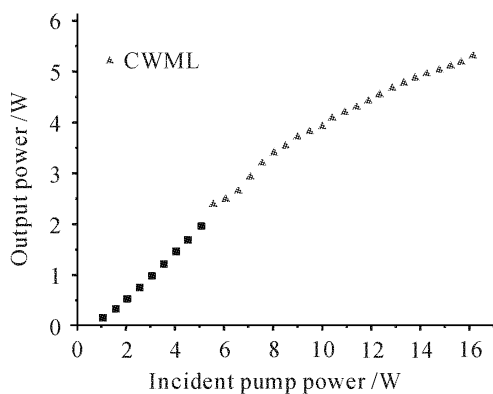


图4 图3所示谐振腔的输出功率曲线图
Fig. 4 Output power versus incident pump power of laser in Fig. 3

另一种单路输出的半导体可饱和吸收镜锁模腔如图5所示,在该结构中,同样获得了输出功率大于5 W的连续锁模输出。与图3相比,该激光器调试容易。

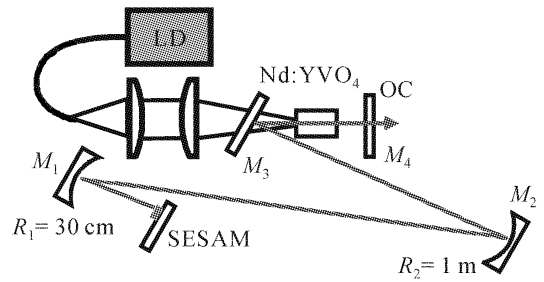


图5 单路输出半导体可饱和吸收镜锁模激光器之二
Fig. 5 Second single output beam mode-locked laser with SESAM

2.3 单路输出且透过率可调的半导体可饱和吸收镜锁模激光器

通常情况下,在一个激光器中,激光器的输出透过率由输出镜的透过率决定,一旦输出镜透过率固定,想改变激光器的透过率,必须更换输出镜。为方便激光器输出透过率的调节,获得最佳输出透过率,联合四分之一波片(QWP)和薄膜偏振器(TFP)实现锁模激光器的单路输出且输出透过率可调。旋转四分之一波片,可实现输出透过率的调节。

如图6所示,增益介质为各向异性的Nd:YVO₄晶体, M₁为平面镜, M₂, M₃曲率半径分别为1000 mm和300 mm。臂长 L₁ ~ L₅ 分别为18 cm, 31 cm, 27 cm, 78 cm和16.2 cm。四分之一波片放置于 M₁ 和 M₃ 之间,设其光轴与垂直偏振方向夹角为θ。垂直偏振的激光往返通过四分之一波片之后,其偏振方向相对于垂直偏振方向旋转2θ,该偏振方向的激光通过薄膜偏振器时,其水平偏振分量将透过薄膜偏振器作为激光器的输出,透过率为 $T = \sin^2(2\theta)$, 因此改变四分之一波片的光轴方向和垂直偏振方向的夹角可获得不同的输出透过率。在抽运功率14 W时,获得了4.8 W的锁模输出,四分之一波片的光轴方向与垂直偏振方向的最佳夹角约为12°,因此该激光器最佳透过率约为 $\sin^2 24^\circ = 16.5\%$ 。

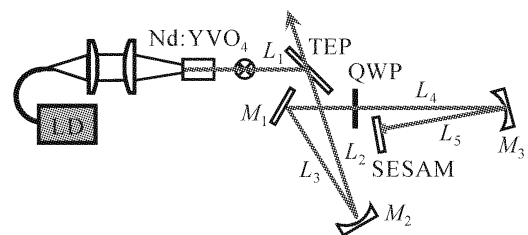


图6 单路输出透过率可调Nd:YVO₄锁模激光器
Fig. 6 Single output beam and adjustable transmission mode-locked Nd:YVO₄ laser with SESAM

如图 7 所示,增益介质为各向同性的 Nd:YAG 晶体,四分之一波片位于薄膜偏振器和增益介质之间,通过旋转四分之一波片,利用 Nd:YAG 的退偏损耗作为输出。在抽运功率为 6.37 W 时,获得了最高功率 2.3 W 的连续锁模输出。

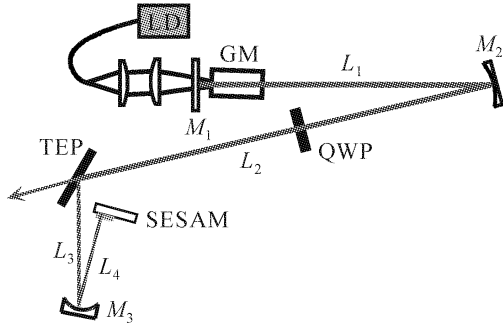


图 7 单路输出透过率可调 Nd:YAG 锁模激光器
Fig. 7 Single output beam and adjustable transmission mode-locked Nd:YAG laser with SESAM

由于在激光器中引入了布儒斯特角放置的薄膜偏振器,该类激光器有一定的调试难度。

2.4 双向输出环行腔半导体可饱和吸收镜连续锁模激光器

自半导体可饱和吸收镜发明以来,大量的研究工作都是在驻波腔中进行的,对环行腔的研究较少。与驻波腔相比,环行腔锁模的优点有^[8~10]:环行腔锁模受背向反射的锁模光脉冲影响小,在应用中,可省掉输出镜后的光学隔离器;光脉冲在激光腔内行进一个来回,只通过一次激光晶体,因此相较驻波腔,环行腔由晶体引起的色散减半,在相同晶体长度情况下,可获得更短的锁模脉冲,或者可利用更长的晶体,实现更高功率输出;双向输出的环行腔锁模激光器在超灵敏的相移探测、传感器、频标,特别在全固态激光陀螺方面具有很重要的应用^[11~13]。

实验设计的环行腔锁模激光器如图 8 所示,采用六镜环行腔结构。双面镀 1064 nm, 808 nm 增透膜的 *a* 切割的 Nd:YVO₄ 晶体由尾纤输出的 808 nm 激光二极管端面抽运。晶体尺寸为 3 mm×3 mm×5 mm,用铟皮包裹,倾斜放置以减小标准具效应。M₁ 为平面折叠镜, M₂ ~ M₅ 的曲率半径分别为 500 mm, 200 mm, 300 mm 和 1000 mm,除 M₂ 作输出镜对 1064 nm 输出透过率为 2.4% 以外,其余腔镜对 1064 nm 均高反。谐振腔长约 255 cm,对应脉冲重复频率 117 MHz。

利用 ABCD 矩阵,可计算环行腔内基模光斑半径分布如图 9 所示,激光晶体上的光斑半径约

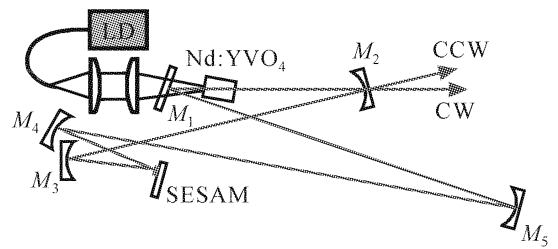


图 8 环行腔锁模结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the ring laser

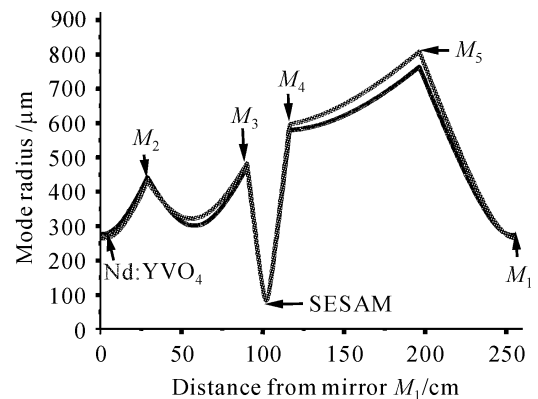


图 9 环行腔腔内光斑分布图

Fig. 9 Calculated TEM₀₀ mode profile as a function of position in the ring laser resonator

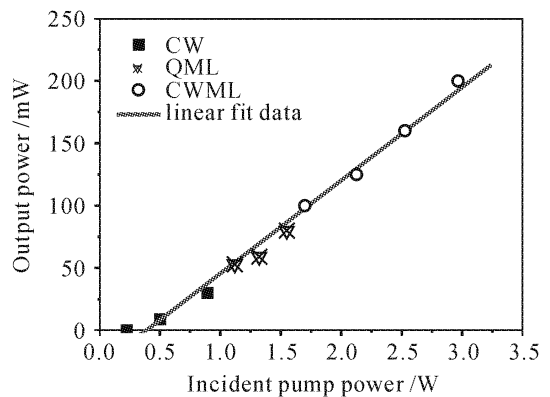


图 10 环行腔锁模输出功率曲线

QML: Q 开关锁模

Fig. 10 Average output power of clockwise circulated beam versus the incident pump power for the ring Nd:YVO₄ laser

QML: Q-switch mode locking

260 μm, 半导体可饱和吸收镜上的光斑半径约 85 μm。如图 10 所示,在抽运功率为 2 W 时,获得了连续锁模运转。在每个折叠镜后面可观测到两个等功率的 1064 nm 光束,表明激光器实现了顺时针和逆时针两个方向的双向运转。利用非共线强度自相关仪,测量了输出脉冲的强度自相关曲线如图 11 所示,假设输出脉冲为高斯脉冲,则其脉冲宽度约 81 ps。

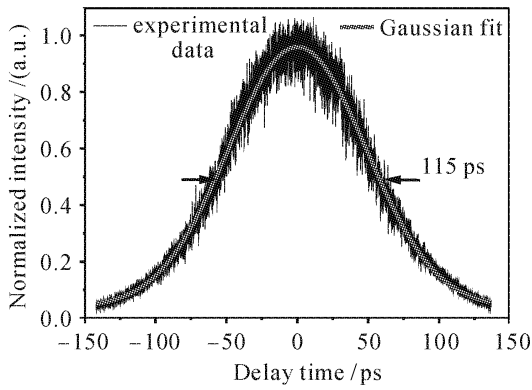


图 11 双向输出环形腔脉宽

Fig. 11 Intensity autocorrelation trace measured with a non-colinear autocorrelator, with Gaussian fit for a 81 ps pulse width

2.5 频率翻倍半导体可饱和吸收镜锁模激光器

在锁模激光器中,脉冲重复频率 f_0 通常由激光器的腔长 L 决定,即 $f_0 = c/2L$, L 越短, f_0 越高。在较长的激光器中要获得高的重复频率脉冲输出,通常采用耦合外腔法,使主腔长和外腔长之比为最简分数,通过调整外腔长来提高脉冲重复频率^[14, 15]。最近报道的一种方法是在腔内加入具有一定反射率的平面,把激光器分成两个子腔,子腔长之比为最简分数,通过调节反射率平面在腔内的位置,实现脉冲频率的翻倍^[16]。本文实现了一种频率翻倍的新方法,利用半导体可饱和吸收镜将激光腔分成两部分,腔长分别为 L_1, L_2 ($L = L_1 + L_2$), 且满足关系 $L_1/L_2 = M/N$, M 和 N 是互质数。以 $M = 2, N = 1$ 为例,如图 12(a) 所示,当脉冲 Λ_1 前向通过半导体可饱和吸收镜时,脉冲使得饱和吸收体漂白,另外一个脉冲 Λ_2 可后向通过被漂白的可饱和吸收体。 Λ_1 和 M_1 上的脉冲 Λ_3 经过相等的时间之后分别后向和前向通过半导体可饱和吸收体,同时脉冲 Λ_2 到达 M_1 。激光腔内可以形成稳定的 $M + N = 3$ 个脉冲,从而激光器的输出脉冲频率为 $(M + N)f_0$, 半导体可饱和吸收镜类似于一个脉冲种子发生器。设计的频率翻倍谐振腔如图 13 所示,增益介质采用 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 的 a 切割 Nd:YVO_4 晶体,一端切割成 0.5° 以减小标准具效应。 M_1, M_2, M_3 曲率半径分别为 $1000 \text{ mm}, 300 \text{ mm}$ 和 200 mm 。输出镜 (OC) 带 1° 楔角,对 1064 nm 输出透过率为 22% 。各臂长分别约 $52.5 \text{ cm}, 52 \text{ cm}, 15 \text{ cm}, 10.5 \text{ cm}$ 和 49 cm , 此时半导体可饱和吸收镜分割的两臂长之比约为 $2:1$, 总腔长约 179 cm , 对应单个脉冲重复频率约为 83.8 MHz 。实验获得的长时间和短时间内的锁模脉

冲如图 14 插图(a)所示,脉冲重复频率为 251 MHz 。为了验证理论的正确性,将图 13 中臂 L_5 延长,使得半导体可饱和吸收镜分割的两臂长度之比不为整数比,脉冲波形如图 14 插图(b)所示,可以看出脉冲重复频率变为由腔长决定的重复频率 76 MHz , 每一个大脉冲之后跟着两个幅度较小的脉冲。

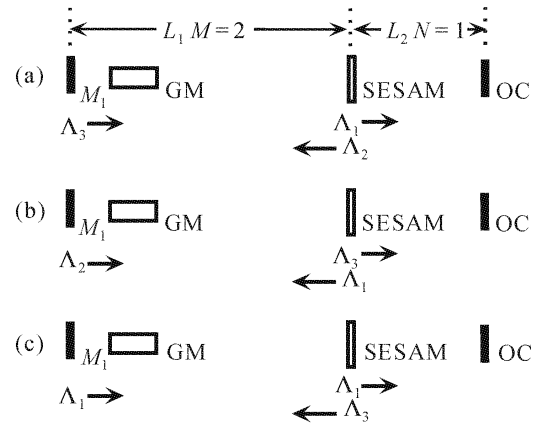


图 12 频率翻倍锁模激光器腔内脉冲形成机制分析
Fig. 12 Evolvement of pulses in the multiplying the repetition rate of passively mode-locked lasers

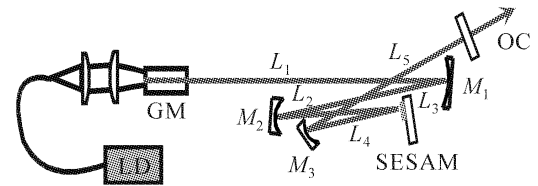


图 13 频率翻倍锁模激光器结构示意图

Fig. 13 Schematic diagram of multiplying the repetition rate of passively mode-locked lasers

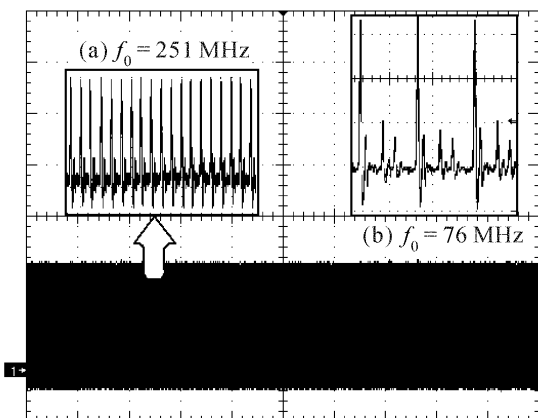


图 14 频率翻倍锁模波形

Fig. 14 Pulse trains of multiplying the repetition rate of passively mode-locked lasers

3 非线性镜锁模激光器

二阶非线性锁模基于非线性晶体的二阶非线性效应,有三种方法可以实现激光器的锁模^[17]。第一

种被称为非线性镜锁模(NLMML)^[18~24],是1988年由K. A. Stankov^[19]提出的一种新型的锁模机制,它由相位匹配放置的非线性晶体和一个对基波部分透射,对二次谐波高反的双色镜构成,其作用类似于一个快饱和吸收体,实现激光器的被动锁模。第二种被叫作级连二阶非线性克尔透镜锁模(CSMML)^[25~27],最早由V. Magni等^[27]实现,是利用相位失配的非线性晶体,对基波和二次谐波双高反的双色镜,恰当位置放置的小孔光阑将非线性晶体引起的非线性相移转变为非线性损耗实现锁模,非线性晶体和双色镜的作用类似于克尔透镜锁模。第三种方法叫偏振旋转锁模(QPSML)^[6, 28, 29],线偏振的基波入射到II类非线性晶体,分成强度差很大的o,e基波,通过晶体后,基波的偏振方向发生旋转,联合一个偏振器件,将此偏振旋转转变为非线性强度调制从而实现锁模,该锁模方法最早由V. Couderc等^[28]实现。

实验中采用的非线性锁模激光器激光腔如图15所示,非线性镜由8.79 mm长的II类相位匹配切割的KTP晶体和双色镜(DM)构成。双色镜对1064 nm反射率为78%,对532 nm反射率100%。通过调整KTP和双色镜之间的距离 L_6 以调节基波和二次谐波之间的相位。在满足一定的相位后,KTP和双色镜构成的非线性镜类似于一个快响应可饱和吸收体,入射的基波功率密度越高,反射的基波功率密度越高,从而实现被动锁模。 $M_1 \sim M_5$ 对基波高反,由于机械机构的限制,臂长 L_5 较大,采用曲率半径较大的 M_5 作为KTP的聚焦镜,其曲率半径为300 mm,导致的后果是KTP上的振荡光基模光斑半径较大。为了实现连续锁模,降低锁模阈值,在腔内插入望远镜系统以增加腔长,总腔长为3.3 m。仔细调节KTP和双色镜之间的距离和KTP的角度,在注入抽运功率为9.3 W时,获得了4 W的锁模输出,光-光转换效率高达43%,脉冲重复频率

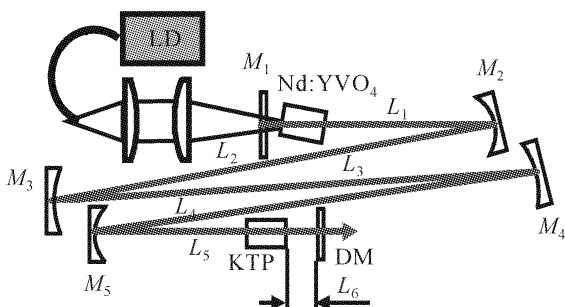


图 15 非线性镜锁模激光器结构示意图
Fig. 15 Schematic diagram of nonlinear mirror mode-locked laser

为45.5 MHz,锁模脉冲序列如图16所示。采用非共线强度自相关仪,测量的自相关曲线如图17所示,脉冲宽度约69 ps。KTP晶体引起的群速度失配,Lyot滤波器效应,KTP和Nd:YVO₄晶体引入的标准具效应都可能使得脉宽较宽。

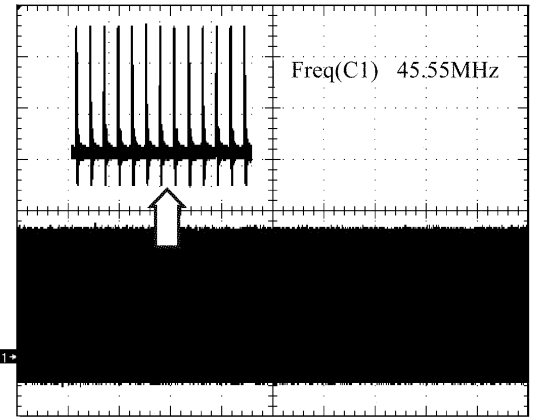


图 16 非线性镜锁模激光器连续锁模脉冲序列
Fig. 16 CWML pulse trains of the nonlinear mirror mode-locked laser

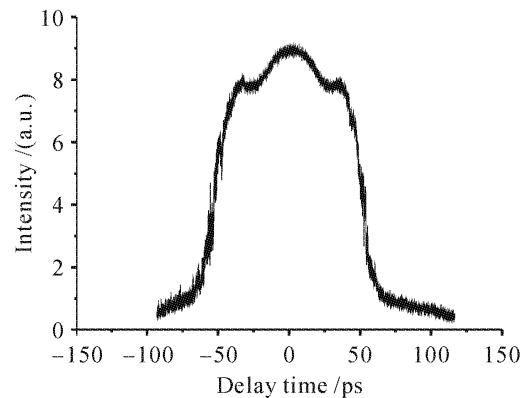


图 17 非线性镜锁模激光器强度自相关曲线
Fig. 17 Intensity autocorrelation of the nonlinear mirror mode-locked laser

4 结 论

采用国产的半导体可饱和吸收镜,分别实现了5.3 W双路连续锁模输出,>5 W单路锁模输出。利用四分之一波片和薄膜偏振片,实现了单路且输出透过率可调的激光器的设计和实验,实现了双向环行腔连续锁模输出,其在激光陀螺等方面有潜在的应用。提出将半导体可饱和吸收镜放在腔内的特殊位置可以实现频率翻倍的方法,以半导体可饱和吸收镜为界,将激光腔分成两个子腔,子腔长之比为最简分数,将激光器脉冲频率翻了3倍。利用KTP和对基波部分反射,谐波高反的双色镜构成的非线性镜,实现了Nd:YVO₄激光器的非线性镜锁模运转,在抽运功率为9.3 W时,获得了4 W的连续锁模

输出, 光-光转换效率高达 43%, 脉冲重复频率 45.5 MHz, 脉宽 69 ps。

致谢 感谢中国科学院半导体研究所王勇刚博士为实验提供的半导体可饱和吸收镜以及和作者进行的大量有益讨论。

参 考 文 献

- G. J. Spühler, T. Südmeyer, R. Paschotta *et al.*. Passively mode-locked high-power Nd:YAG lasers with multiple laser heads [J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **71**:19~25
- Zhang Bingyuan, Chen Meng, Li Gang *et al.*. Study on diode-side-pumped mode-locked laser with semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1):59~62
张丙元, 陈 檬, 李 港 等. 激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 锁模激光器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1):59~62
- Cai Zhiqiang, Wen Wuqi, Yao Jianquan *et al.*. Continuous-wave passively mode-locked diode end-pumped Nd:YVO₄ laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6):734~738
蔡志强, 温午麒, 姚建铨 等. 半导体可饱和吸收镜连续被动锁模端面抽运 Nd:YVO₄ 激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6):734~738
- Zhiqiang Cai, Wuqi Wen, Yonggang Wang *et al.*. 5.3-W Nd:YVO₄ passively mode-locked laser by a novel semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(6):342~344
- Felix Brunner, Edith Innerhofer, Sergio V. Marchese *et al.*. Powerful red-green-blue laser source pumped with a mode-locked thin disk laser [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(16):1921~1923
- V. Couderc, F. Louradour, A. Barthelemy. 2.8 ps pulses from a mode-locked diode pumped Nd:YVO₄ laser using quadratic polarization switching [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **166**:103~111
- Ursula Keller. Recent developments in compact ultrafast lasers [J]. *Nature*, 2003, **424**(6950):831~838
- W. S. Pelouch, P. E. Powers, C. L. Tang. Self-starting mode-locked ring-cavity Ti:sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(22):1581~1583
- T. Beddard, W. Sibbett, D. T. Reid *et al.*. High-average-power, 1-MW peak-power self-mode-locked Ti:sapphire oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(3):163~165
- Jesus Garduño-Mejía, Mehrdad Mohebi, Nooshin Jamasbi. Direction of propagation of the beam in a unidirectional Kerr lens mode locked Ti:sapphire ring laser [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **171**:263~269
- Vaclar Kubecek, Jean-Claude M. Diels, Andreas Stintz. Bidirectional operation of a ring diode pumped mode-locked Nd:YVO₄ laser [C]. *SPIE*, 2004, **5460**:309~314
- Michael L. Dennis, Jean-Claude M. Diels, Ming Lai. Femtosecond ring dye laser; a potential new laser gyro [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(7):529~531
- Alena Zavadilova, Vaclar Kubecek, Miroslar Cech *et al.*. Mode locked Nd:YVO₄ laser with intracavity synchronously pumped optical parametric oscillator [C]. *SPIE*, 2006, **6100**:6100G-1~6100G-7
- M. N. Kong, J. K. Chee, J. M. Liu. Passive mode locking with a nonlinear external coupled cavity at high pulse repetition rates [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(2):73~75
- U. Keller, W. H. Knox, H. Roskos. Coupled-cavity resonant passive mode-locked Ti:sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(23):1377~1379
- Tzu-Ming Liu, Franz X. Kärtner, James G. Fujimoto *et al.*. Multiplying the repetition rate of passive mode-locked femtosecond lasers by an intracavity flat surface with low reflectivity [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(4):439~441
- Václav Kubeček. Nonlinear mirror mode-locking of solid state lasers [C]. *SPIE*, 2003, **5259**:403~410
- Krassimir Stankov. Mode locking by a frequency-doubling crystal; generation of transform-limited ultrashort light pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(7):359~361
- K. A. Stankov. 25 ps pulses from a Nd:YAG laser mode locked by a frequency doubling β -BaB₂O₄ crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(20):2203~2204
- P. Faugeras, F. Diblanc, S. Louis *et al.*. Polarization effects in second harmonic generation for nonlinear mirror. Application to laser mode-locking [C]. *SPIE*, 1997, **3404**:289~294
- G. Cerullo, M. B. Danailov, S. De Silvestri *et al.*. A diode-pumped nonlinear mirror mode-locked Nd:YAG laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(19):2392~2394
- M. B. Danailov, G. Cerullo, V. Magni *et al.*. Nonlinear mirror mode locking of a cw Nd:YLF laser [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(11):792~794
- A. Agnesi, C. Pennacchio, G. C. Reali *et al.*. High-power diode-pumped picosecond Nd³⁺:YVO₄ laser [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(21):1645~1647
- Y. F. Chen, S. W. Tsai, S. C. Wang. High-power diode-pumped nonlinear mirror mode-locked Nd:YVO₄ laser with periodically-poled KTP [J]. *Appl. Phys. B*, 2001, **72**(4):395~397
- M. Zavelani-Rossi, G. Cerullo, V. Magni. Mode locking by cascading of second-order nonlinearities [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(1):61~70
- G. Cerullo, S. De Silvestri, A. Monguzzi *et al.*. Self-starting mode locking of a cw Nd:YAG laser using cascaded second-order nonlinearities [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7):746~748
- V. Magni, M. Zavelani-Rossi. Nd:YVO₄ laser mode locked by cascading of second order nonlinearities [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **152**(1):45~48
- V. Couderc, A. Albert, A. Barthélémy. Low repetition rate of a mode locked Nd:YAG laser using quadratic polarization switching [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **220**(4-6):413~417
- V. Kubecek, V. Couderc, B. Bourliaguet *et al.*. 4-W and 23-ps pulses from a lamp-pumped Nd:YAG laser passively mode-locked by polarization switching in a KTP crystal [J]. *Appl. Phys. B*, 1999, **69**(2):99~102