

蓬勃发展的高重复频率固体锁模激光器

刘京徽 田金荣 胡梦婷 宋晏蓉

北京工业大学应用数理学院, 北京 100124

摘要 介绍了高重复频率锁模激光技术的发展和研究现状,着重举例分析了近年来国内外高重复频率固体锁模激光器的发展水平和动向。固体锁模激光器具有输出功率高、重复频率高和稳定性好等优点,提高其重复频率,不仅可以促进光频标的发展,提供新的时间频率基准,还可应用于空间通信、激光雷达等领域。

关键词 激光器; 固体激光器; 高重复频率; 锁模

中图分类号 TN248.1 文献标志码 A doi: 10.3788/LOP51.120001

Burgeoning Developments in High Repetition Rate Mode Locked Solid-State Laser

Liu Jinghui Tian Jinrong Hu Mengting Song Yanrong

College of Applied Science, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract The state of the art of high repetition rate mode-locking technology is introduced. Recent developments of high repetition rate mode-locked solid-state laser are described briefly, followed by a detail review of examples. Mode-locked solid-state lasers are known with high output power, high repetition rate and good stability. Scaling up the repetition rate of solid-state lasers may not only benefit optical metrology and provide a new time-frequency reference, but also find applications in space communications, laser radar and other research fields.

Key words lasers; solid-state laser; high repetition rate; mode locking

OCIS codes 140.3460; 140.3580; 140.4050

1 引言

高功率、高重复频率的激光光源,已经成为激光技术发展的重要方向,并有望在多个研究领域中获得应用。例如光频标中,频率的比对是通过相邻频梳之间的拍频完成的。拍频结果的对比度与激光波长的能量紧密相关。高重复频率锁模激光器的单波长能量大,拍频对比度高,因此高重复频率的锁模激光器已成为频标中的重要工具。此外,高重复频率锁模激光器在高速激光通信、国防、工业加工、医疗保健等领域也有重要的应用。早期人们对固体激光器的输出指标局限于高功率,高能量,短脉宽。随着从连续激光到锁模脉冲激光的输出实现,重复频率这项指标,已逐渐引起广泛的重视。

产生的高重复频率锁模激光脉冲有多种方式,例如光纤激光器可以利用谐波锁模做到几百吉赫兹,但此类型产生的激光脉冲稳定性差,输出的光能量低(约1 pJ),且具有较大的量子噪声。因此,就获得单脉冲能量大、稳定性好、量子噪声小的高重复频率锁模脉冲序列来说,固体激光器是最好的选择。

1965年在红宝石激光器中以染料为可饱和吸收体首次实现固体激光器的锁模^[1]。1966年, Maria等^[2]用钕玻璃被动锁模激光器产生皮秒脉冲输出。20世纪60年代,人们以连续抽运的Nd:YAG主动锁模激光器和Nd:glass被动锁模激光器作为产生皮秒的标准光源^[3-4]。此后研究人员相继从各种激光材料中实现了锁模运转,同时锁模技术及锁模器件也得到了深入而广泛的研究。与之相应,锁模脉冲激光的各种指标如脉冲

收稿日期: 2014-05-07; 收到修改稿日期: 2014-06-03; 网络出版日期: 2014-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(61177047)、北京市教委科技计划(KM201010005007)

作者简介: 刘京徽(1991—),女,硕士研究生,主要从事固体锁模激光器方面的研究。

E-mail: liujinghui@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 田金荣(1975—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事全固态激光技术和飞秒激光技术等方面的研究。

E-mail: jrtian@bjut.edu.cn(通信联系人)

宽度、峰值功率、重复频率、脉冲能量、平均功率等也迅速提高。对于各种类型的锁模激光实验已见于众多报道。本文将重点介绍重复频率为吉赫兹量级的高重复频率连续锁模固体激光器的研究进展。

2 主动锁模激光器

主动锁模可以分为振幅调制锁模和相位调制锁模。即通过调制激光振幅或相位,产生超短激光脉冲序列,实现锁模。1990年贝尔实验室的Weingarten等^[6]利用主动锁模技术,实现了重复频率2 GHz的Nd:YLF锁模激光器,波长为1.047 μm ,脉冲宽度为7 ps,该锁模激光器利用声光调制器实现,其结构如图1所示。

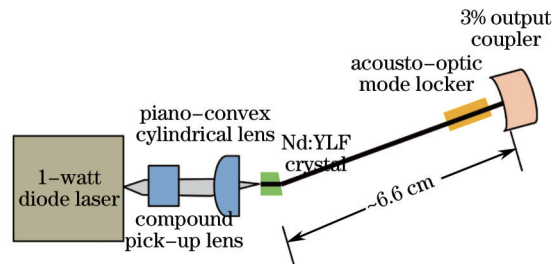


图1 2 GHz主动锁模Nd:YLF激光器示意图

Fig.1 Schematic of 2 GHz actively mode-locked Nd:YLF laser

1991年,Ferguson课题组^[6]第一次利用频率调制技术,实现了Nd:YAG激光器的稳定锁模运转,重复频率为1 GHz。随后,人们采用主动锁模技术相继实现了高重复频率、短脉冲激光的输出。如2.85 GHz、4.5 ps的Nd:YLF锁模激光器^[7],5 GHz、13 ps的主动锁模Nd:YLF激光器^[8],20 GHz、3.9 ps的谐波锁模Nd:BEL($\text{La}_2\text{Be}_2\text{O}_5$)激光器^[9],40 GHz、0.5 pJ的固体主动锁模激光器^[10]运转。上述20 GHz和40 GHz的高重复频率激光器基于谐波锁模,这是通过将调制器的驱动频率设置为基波激光频率的整倍数而获得的。虽然高重复频率输出指标可以通过谐波锁模获得,但谐波锁模会受到由频率和时间的抖动引起的噪声影响,从而使激光系统工作不稳定,并且其噪声对于提高频标测量的对比度非常不利。

随着激光技术的发展,被动锁模逐渐发展起来。研究人员发现被动锁模比主动锁模更容易实现高重复频率激光脉冲输出,因为主动锁模激光器需要一个快速电子驱动,不仅使光路复杂,难于将激光器小型化,而且输出的激光脉冲宽度较大。比较而言,被动锁模由于可以将锁模器件做得很小,容易缩短激光的腔长,因此可以大幅度地提高锁模脉冲的重复频率。对于各种类型吉赫兹重复频率的激光器,进展最快的是克尔透镜锁模^[11-12]和半导体可饱和吸收体(SESAM)^[13-15]锁模的固体激光器。

3 被动锁模激光器

3.1 克尔透镜锁模(自锁模)激光器

克尔透镜锁模是利用固体中的克尔透镜效应实现锁模的。所谓克尔透镜效应指的是激光在材料中的折射率与光强有关,即 $n=n_0+n_2I$,其中 n 为折射率, n_0 为零场折射率, n_2 为非线性折射率系数。当激光很强时,非线性折射率的存在导致晶体类似于透镜,会对激光形成聚焦,造成激光尺寸的变化,导致损耗的变化,从而起到饱和吸收的作用,可以实现锁模运转。克尔透镜锁模中,激光增益介质既提供增益,又具有锁模的功能,因此可以不借助于其他锁模器件实现锁模,因此也被称为自锁模。

1991年,Spence等^[16]利用钛蓝宝石(Ti:sapphire)中的克尔效应成功实现了钛蓝宝石激光器的自锁模运转。同时,国内对自锁模的研究也迅速展开。1992年,中国科学院上海光学精密机械研究所樊立明等^[17]在Nd:YAG激光器中观察到自锁模现象。同年,Liu等^[18]利用激光二极管抽运Nd:YAG晶体,首次实现了克尔透镜锁模。1993年,天津大学超快实验室首次实现掺钛蓝宝石自锁模运转,脉冲宽度达到184 fs^[19],此后相继将脉冲宽度缩短至10 fs^[20-23]。1996年,中国科学院上海精密机械研究所利用钛蓝宝石实现自锁模及放大,研制成功2 TW,45 fs钛蓝宝石激光系统^[24]。2000年,中国科学院物理研究所魏志义又相继实现了镁橄榄石被动锁模皮秒激光器^[25]和Nd:LuVO₄锁模皮秒激光器^[26]的自锁模运转,以及Yb:YAG激光器和Yb:GYSO激光器的飞秒脉冲输出^[27]。2013年,华北光电技术研究所实现了紧凑型高功率被动锁模激光器^[28]。

通过缩短腔长,可以将自锁模激光脉冲的重复频率提高至吉赫兹量级。1994年,Ramaswamy等^[29]用棱

镜补偿色散的方法,成功实现了1 GHz 钛蓝宝石锁模激光器运转。

1998年,Mellish等^[30]报道了可生成高重复频率锁模脉冲序列的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YLF}$ 自锁模激光器。实验光路如图2所示,其中 L 为透镜,晶体两端镀有增透膜作为激光腔镜, M_1 为入射端,晶体另一端为输出, M_2 为曲率半径75 mm的高反镜, M_3 为布儒斯特角切割的BK7玻璃基板。当用 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 激光器抽运时,在重复频率为520 MHz下,可产生平均输出功率为280 mW,脉冲宽度为75 fs的激光脉冲;在重复频率为1 GHz下,脉冲宽度为150 fs,可输出功率为110 mW。当抽运源是由二极管抽运的掺镱光纤激光器时,在重复频率为525 MHz下,脉宽为106 fs,最大平均输出功率为88 mW。从实验结果可以看到,发展光纤激光器抽运的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YLF}$ 锁模激光器,可用作超快光源。在未来的科学应用方面,将有重要的研究意义。

固体激光器锁模脉冲的重复频率受制于腔长。对线形腔来说,其重复频率 f_r 与腔长 L 满足关系: $f_r=c/(2L)$,其中 c 为光速。因此如果要提高重复频率,需要尽量缩短激光的腔长,这就对激光材料和光学元件的放置提出了更高的要求。如对于常规的钛蓝宝石激光器,其腔长约为2 m,则对应的重复频率为75 MHz。而如果要获得大于1 GHz的重复频率,需要腔长为15 cm的线形腔。但是如果采用环形腔,其重复频率 f_r 与腔长 L 满足另一关系: $f_r=c/L$ 。由此可见,在同等腔长下,采用环形腔获得锁模脉冲的重复频率是线形腔的2倍。因此采用环形腔也成为提高锁模脉冲重复频率的一种重要方式。如1999年,Bartels等^[31]报道了重复频率为2 GHz的钛蓝宝石飞秒激光器,如图3所示。该激光器就采用环形腔,获得的脉冲宽度为23 fs。这是当下同时获得最高重复频率和最短脉冲宽度的锁模激光器。此后,他们进一步缩短腔长至3 cm,实现了10 GHz环形腔钛蓝宝石飞秒激光器,脉冲宽度为42 fs^[32]。

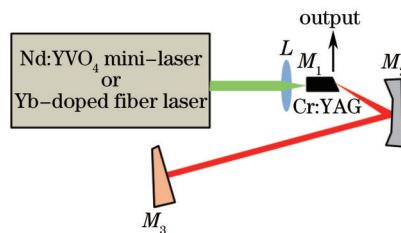


图2 高重复频率 $\text{Cr}^{4+}:\text{YLF}$ 自锁模激光器示意图

Fig.2 Schematic of high-repetition-rate self-mode-locked $\text{Cr}^{4+}:\text{YLF}$ laser

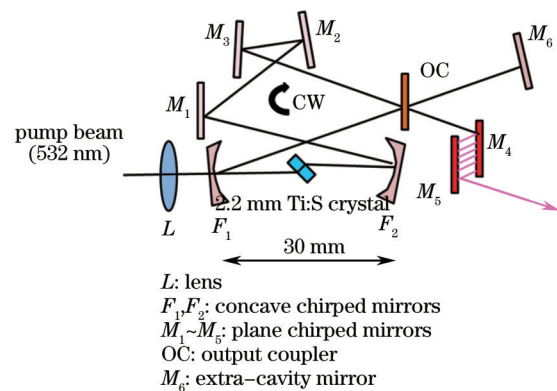


图3 2 GHz 钛蓝宝石飞秒激光器示意图

Fig.3 Cavity design of 2 GHz Ti:sapphire laser

随着锁模脉冲重复频率的不断提高,其谐振腔越来越紧凑。同时在平均功率不变的情况下,单脉冲能量也会下降。因此激光器锁模的稳定性也会变差,因此需要对光束尺寸和谐振腔进行优化以获得稳定的锁模脉冲序列。前者可以增强克尔效应,后者有利于在横向和纵向上获得光束质量良好的锁模脉冲。

2011年,Huang等^[33]报道了高功率自锁模 $\text{Nd}:\text{LuVO}_4$ 固体激光器,其重复频率高达9.52 GHz。研究发现 $\text{Nd}:\text{LuVO}_4$ 晶体的三阶非线性效应,在无任何器件作用下,可以有效实现稳定的自锁模。通过实验测量,最后在抽运功率为2.6 W时,输出功率为0.59 W,脉冲宽度为7.9 ps,重复频率为9.52 GHz。在实验中,选择 $\text{Nd}:\text{LuVO}_4$ 晶体的原因是 $\text{Nd}:\text{LuVO}_4$ 的吸收截面和发射截面比其他晶体大,最重要的是其三阶非线性效应强,有利于自锁模。

随后,Huang等^[34]在2012年用高功率半导体激光器抽运 $\text{Nd}:\text{YLF}$ 晶体,实现自锁模固体 $\text{Nd}:\text{YLF}$ 激光器的运转,其重复频率可达数个吉赫兹。在抽运功率为6.93 W时,获得1053 nm的 σ 偏振方向激光和1047 nm的 π 偏振方向激光,输出功率分别为2.15 W和1.35 W。该实验的创新在于有效地选择并控制输出偏振态,获得在重复频率为2.717 GHz下, TEM_{00} 模式自锁模的稳定输出。实验装置如图4所示。此外,实验还发现通过缩短输入镜与晶体之间的距离,可以压缩脉冲,获得更短的脉冲宽度。

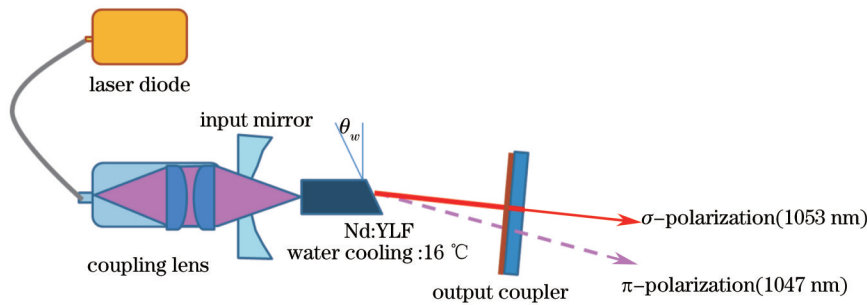


图4 自锁模 Nd:YLF 激光器

Fig.4 Self-mode-locked Nd:YLF laser

同年, Endo 等^[11]用 Yb:KYW 的三阶非线性效应获得重复频率为 4.6 GHz 的自锁模激光器。该激光器采用环形腔结构, 由 750 mW 半导体激光器抽运, 产生 14.6 mW 的平均输出功率, 在中心波长为 1046 nm 处, 光谱宽度达 11 nm, 实现了飞秒激光脉冲输出。Yb:KYW 晶体是获得高重复频率锁模脉冲的优良选择, 比 Ti:Sapphire 晶体有更高的非线性折射率 (Yb:KYW: $8.7 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$, Ti:sapphire: $3.1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$)^[35] 和热导系数。自锁模 Yb:KYW 激光器的紧凑性和低相位噪声, 以及产生短脉冲等优势, 有望取代钛蓝宝石激光器。

3.2 饱和和吸收体辅助锁模的被动锁模激光器

近年来, 饱和和吸收体辅助锁模的固体锁模激光器发展也十分迅速。虽然 1991 年实现的克尔透镜锁模技术简单、可靠, 即使在没有任何腔外脉冲压缩情况下, 也可获得短至 5.8 fs 的激光脉冲输出^[36-37]。但是克尔透镜锁模也存在不足之处: 1) 为了增强克尔透镜效应, 谐振腔应处于稳定区边缘, 因此锁模对光学元件的位置非常敏感, 实现锁模需要长时间的调节过程; 2) 克尔透镜锁模难于自启动, 对非专业人员来说维护困难。因此寻找可以实现锁模或辅助锁模的器件, 成为锁模技术的一个重要研究方向。迄今, 人们已经开发的辅助锁模器件包括 SESAM, 碳纳米管, 石墨烯等, 其中技术最为成熟且应用广泛的是 SESAM。

1999 年, Keller 课题组^[38]实现了 13 GHz 重复频率的被动锁模 Nd:YVO₄ 激光器。在 13 GHz 的重复频率下, 平均输出功率为 310 mW, 脉冲宽度为 9.5 ps。此外, 用半导体激光器替代钛蓝宝石激光器作抽运源, 获得 12.61 GHz 重复频率的连续锁模脉冲序列, 平均输出功率为 198 mW, 脉冲宽度为 8.3 ps。该实验通过优化腔长、激光晶体和 SESAM 有效地抑制了调 Q 锁模。可以看到, 抽运源的发展制约着固体激光器输出指标的提高。

2002 年, Keller 课题组^[39]用高亮度、高功率的 Ti:sapphire 激光器抽运 Nd:YVO₄ 晶体, 获得重复频率高达 157 GHz 的连续锁模脉冲序列。他们将谐振腔缩短至微米量级, 即晶体长度 (440 μm) 为腔的总长度。晶体一端被设计成曲面, 另一端为平面, 两端镀有增透膜, 如图 5(a) 所示。晶体与 SESAM 之间只有几微米的间隙。最后, 在抽运功率为 500 mW、重复频率为 157 GHz 时, 得到平均输出功率为 45 mW, 脉冲宽度为 2.7 ps 的连续锁模脉冲。约 160 GHz 的高重复频率锁模脉冲已经达到当时实验结果的极限。这是由于激光晶体的增益带宽和 SESAM 调制深度及弛豫时间限制了重复频率的提高。他们还用半导体激光器抽运 Nd:YVO₄ 晶体, 光路如图 5(b) 所示。在 10 GHz 重复频率下, 获得 2.1 W 的锁模脉冲输出, 这也是第一次使用半导体激光器作为抽运源, 实现固体锁模激光器高平均功率输出的实验。

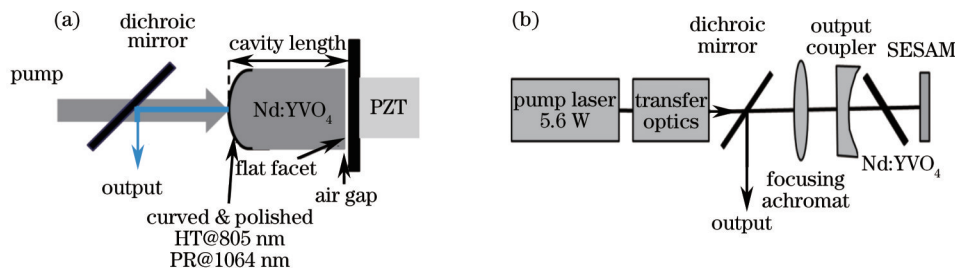


图5 高重复频率 Nd:YVO₄ 激光器。(a) 钛蓝宝石激光器抽运的微型 Nd:YVO₄ 激光器; (b) 半导体抽运 10 GHz、2 W-Nd:YVO₄ 激光器

Fig.5 Schematic of high-repetition-rate Nd:YVO₄ laser. (a) Ti:sapphire-pumped miniature Nd:YVO₄ laser; (b) diode-pumped 10 GHz, 2 W Nd:YVO₄ laser

进一步提高重复频率受到了抽运源的限制,要想获得超过 13 GHz 重复频率的锁模脉冲,半导体激光器的功率及波长不足于抽运高功率的激光器,因此仍需要 Ti:sapphire 激光器抽运,这是因为当时的钛蓝宝石固体激光器已经非常成熟,它具有高亮度,高功率和光束质量好等优势。但随着半导体激光器的发展,这一问题已得到解决。2005 年, Keller 等对比 2002 年的研究,为了在相同重复频率下,对输出功率和脉冲宽度之间的关系进行权衡,而改进了实验装置。他们在 2002 年两种腔型基础上,以半导体激光器为抽运源,通过优化腔长分别获得了 39 GHz 和 40 GHz 重复频率的锁模激光脉冲输出^[40]。39 GHz 短脉冲 Nd:YVO₄ 激光器,是将原 440 μm 厚的晶体改为 1.74 mm,获得 60 mW 平均输出功率和 2.7 ps 的短脉冲。对于 40 GHz-Nd:YVO₄ 激光器,将抽运源换为 2 W 高亮度的半导体激光器,还将谐振腔腔长优化为 3.11 mm。最后,在 40 GHz 重复频率、抽运光 1.83 W 时,得到最大平均输出功率为 288 mW,脉冲能量 7.2 pJ,脉冲宽度 6.5 ps。实验发现,通过减少 SESAM 的饱和通量可以提高锁模脉冲的重复频率,增加 SESAM 的调制深度可以缩短脉冲的脉冲宽度。

近年来, Keller 课题组实现了多吉赫兹重复频率,波段在 1.5 μm 的铒镱共掺玻璃被动锁模激光器。2002 年,他们实现了 10 GHz^[41]的 Er:Yb:glass 被动锁模激光器;随后,将重复频率提升至 25 GHz^[42]、40 GHz^[43],甚至是 50 GHz^[44],如图 6 所示。

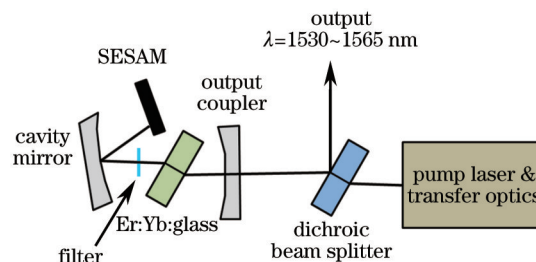


图 6 10、25、40、50 GHz 被动锁模 Er:Yb:glass 激光器示意图

Fig.6 Schematic of 10, 25, 40, 50 GHz passively mode-locked Er:Yb:glass laser

2010 年, Oehler 等^[45]创造了锁模 Er:Yb:glass 激光器高重复频率记录,其重复频率为 101 GHz,脉冲宽度为 1.1 ps,这种激光可用于高速归零数据传输系统、波分复用(WDM)系统和超高速正交频分多路复用技术(OFDM)发射机。虽然目前 Er:Yb:glass 激光器已经达到数吉赫兹重复频率,但由于其低热导系数限制了功率的输出,同时,它的激光发射截面低,容易产生调 Q 现象,影响锁模的稳定性。随着新型增益介质 Cr:YAG 的出现,对 Cr:YAG 高重复频率锁模激光器也有报道。目前,已报道了重复频率为 1 GHz 的 Cr:YAG 锁模固体激光器^[46],单脉冲能量为 200 pJ。虽然 Cr:YAG 提供了高的激光发射截面,但迄今为止 Cr:YAG 锁模激光器的最高重复频率为 4 GHz^[47]。

在皮秒领域,全固态激光器已经被证明可以在几十吉赫兹重复频率下运转^[48-49]。随着激光技术的提高和新型激光器件的研发,吉赫兹重复频率和飞秒脉冲宽度相结合的半导体激光器抽运的固体激光系统已出现,如:研究者通过掺 Yb 晶体,先后获得了 1 GHz、200 fs 自锁模激光器^[50], 2.8 GHz、162 fs^[13]被动锁模激光器和 4.8 GHz、396 fs^[15]锁模激光器。实验证明掺 Yb 晶体可获得高效率^[14]、高重复频率^[15]的锁模脉冲输出^[11,51]。2013 年, Keller 课题组^[52]报道了 Yb:KGW 固体锁模振荡器,在无任何附加放大器和脉冲压缩器件下,产生重复频率为 1.06 GHz、脉宽为 125 fs 激光脉冲输出,其平均输出功率为 3.43 W,对应脉冲能量 3.2 nJ,峰值功率为 22.7 kW。

目前为止, SESAM 是应用最广泛、技术最为成熟的辅助锁模器件。但 SESAM 本身也存在不足之处。因为 SESAM 是利用半导体材料制备而成,受半导体材料带隙的限制,其工作波长范围比较窄,不适用于宽带可调谐脉冲激光器,且其制造工艺复杂,成本较高。近年来出现了单壁碳纳米管(SWCNT)、石墨烯^[53]等新型的可饱和吸收材料,具有带宽大,制造工艺简单,成本低等特点,在固体激光器中有很大的应用前景。

SWCNT 被认为是辅助固体激光器实现锁模的优良器件,锁模铒镱共掺光纤激光器已经实现 20 GHz 重复频率和飞秒脉冲输出。然而,大多数的 SWCNT 辅助锁模固态飞秒激光器报道的重复频率小于 100 MHz^[54-58],脉冲宽度在皮秒范围(8 ps)。直到 2012 年, Yang 等^[51]实现了半导体抽运的单臂碳纳米管可饱和吸收体锁模 Yb:KYW 激光器,如图 7 所示,其重复频率为 1.2 GHz、半峰全宽为 168 fs,中心波长在

1047 nm。此激光器是SWCNT辅助锁模固体激光器目前获得重复频率最高的激光器。第一次达到了吉赫兹范围。他们认为,将透射型SWCNT可饱和吸收体放置环形腔中,可以将重复频率提升到几个吉赫兹,同时为了提高效率和输出功率,可以通过在曲面镜两侧增加抽运,以找到最佳的输出耦合比,从而降低SWCNT的非饱和损耗。

同时,新型可饱和吸收体和激光增益介质的出现,也为被动锁模激光器高重复频率、窄脉宽等输出指标提供了发展空间。

2006年,Grange等^[59]使用AlGaAsSb可饱和吸收体锁模,实现了稳定的被动锁模掺铟、镜玻璃激光器,其输出波长为1.5 μm ,重复频率为10 GHz。

2010年,Li等^[60]通过运转被动锁模Cr:LiSAF激光器,在重复频率为1 GHz下,获得110 mW,55 fs短激光脉冲输出。

2012年,Keller课题组^[61]报道了1.55 μm 量子点SESAM锁模高重复频率激光器。他们在GaAs基板上制作InGaAs量子点,并将其纳入SESAM上,实现了1.55 μm ,10 GHz重复频率的量子点SESAM锁模掺铟玻璃激光器。其结构如图8所示。量子点SESAM在高重复频率激光器中提供了潜在的优势,这样的可饱和吸收体饱和通量低,具有更宽的带宽和更好的波长灵活性。而且,量子点结构具有高点密度区域和强光发射,可以有更广泛的应用。

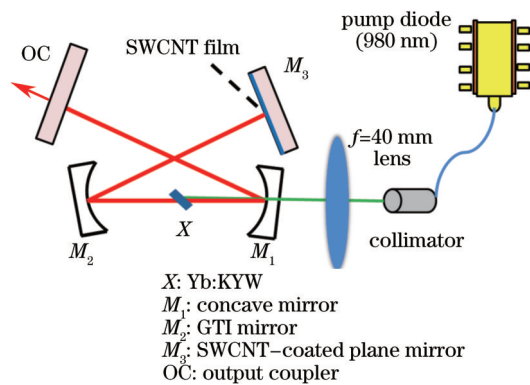


图7 1.2 GHz-Yb:KYW 激光器结构图

Fig.7 Schematic of 1.2 GHz-repetition-rate

Yb:KYW laser

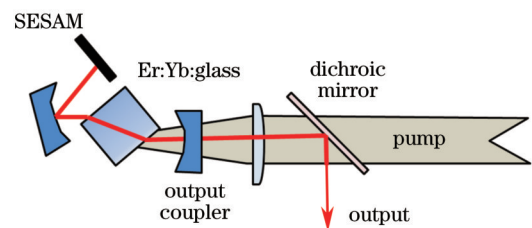


图8 Er:Yb:glass量子点锁模激光器

Fig.8 Quantum-dots SESAM mode-locked

Er:Yb:glass laser

4 结 论

纵观近十几年的发展可以看到,锁模固体激光器的重复频率由几十兆赫兹发展到几十吉赫兹,提升了三个数量级。这不仅得益于激光技术的发展,如对于克尔透镜锁模、饱和吸收体锁模的物理机制的研究;也得益于性能优良的光学元器件,如高增益激光晶体、啁啾镜、SESAM等的技术进步。但由于高重复频率固体激光器往往结构非常紧凑,不方便在腔内插入光学元件改善激光性能,因此在脉冲宽度、峰值功率、平均功率方面与传统的锁模固体激光器还有差距,这也说明高重复频率激光器还有很大的发展空间。由于锁模激光器的重复频率反比于腔长,因此提高重复频率必须将腔长缩短,这就要求腔内光学元器件小型化,如小尺寸的激光晶体。同时在高重复频率情况下,单脉冲能量较低,导致非线性效应较弱,热效应会对锁模的稳定性造成影响,需要精确控制。激光重复频率的提高,伴随着非线性效应的减弱,实现自锁模可能性很小,需要性能更为精良的SESAM启动锁模。同时为了获得更短的脉冲,需要采用啁啾镜对腔内色散进行精确的补偿。在这些因素获得改善的情况下,实现重复频率更高和性能更为优越的固体激光输出是很有希望的。高重复频率固体激光的进步会推动光频标、光通信、激光光谱学、激光加工等领域的发展。

参 考 文 献

- 1 Mocker H A, Collins R J. Mode competition and self-locking effects in a Q-switching ruby laser[J]. Appl Phys Lett, 1965, 17(10): 270-273.

- 2 Maria A J D, Stetser D A, Heynau H. Self-mode-locking of lasers with saturable absorbers[J]. Appl Phys Lett, 1966, 8(7): 174-176.
- 3 Duguay M A, Shapiroand S L, Rentzepis P M. Spontaneous appearance of picosecond pulses in ruby and Nd:glass lasers [J]. Phys Rev Lett, 1967, 19(18): 1014-1016.
- 4 Statz H, Tang C L J. Phase locking of modes in lasers[J]. J Appl Phys, 1965, 36(12): 3923-3927.
- 5 Weingarten K J, Shannon D C, Wallace R W, *et al.*. Two gigahertz repetition-rate, diode-pumped, mode-locked Nd:YLF laser[J]. Opt Lett, 1990, 15(17): 962-964.
- 6 Zhou Feng, Malcolm G P A, Ferguson A I. 1-GHz repetition-rate frequency-modulation mode-locked neodymium lasers at 1.3 μm [J]. Opt Lett, 1991, 16(14): 1101-1103.
- 7 Weingarten K J, Godil A A, Gifford M. FM modelocking at 2.85 GHz using a microwave resonant optical modulator[J]. IEEE Photonic Tech L, 1992, 4(10): 1106-1109.
- 8 Schulz P A, Henion S R. 5-GHz mode locking of a Nd:YLF laser[J]. Opt Lett, 1991, 16(19): 1502-1504.
- 9 Godil A A, Hou A S, Auld B A, *et al.*. Harmonic mode locking of a Nd:BEL laser using a 20-GHz dielectric resonator/optical modulator[J]. Opt Lett, 1991, 16(22): 1765-1767.
- 10 Vieira A J C, Herczfeld P R, Contarino V M. Microchip laser for microwave and millimeter-wave generation[C]. Proceedings SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference. New York, 1997. 333.
- 11 Endo M, Ozawa A, Kobayashi Y. Kerr-lens mode-locked Yb:KYW laser at 4.6-GHz repetition rate[J]. Opt Express, 2012, 20(11): 12191-12197.
- 12 Wasylczyk P, Wunk P, and Radzewicz C. Passively mode-locked, diode-pumped Yb:KYW femtosecond oscillator with 1 GHz repetition rate[J]. Opt Express, 2009, 17(7): 5630-5635.
- 13 Yamazoe S, Katou M, Adachi T, *et al.*. Palm-top-size, 1.5 kW peak-power, and femtosecond (160 fs) diode-pumped mode-locked Yb³⁺:KY(WO₄)₂ solid-state laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. Opt Lett, 2010, 35(5): 748-750.
- 14 Schratwieser T C, Leburn C G, and Reud D T. Highly efficient 1 GHz repetition-frequency femtosecond Yb³⁺:KY(WO₄)₂ laser[J]. Opt Lett, 2012, 37(6): 1133-1135.
- 15 Pekarek S, Klenner A, Sdüemeyer T, *et al.*. Femtosecond diode-pumped solid-state laser with a repetition rate of 4.8 GHz [J]. Opt Express, 2012, 20(4): 4248-4253.
- 16 Spence D E, Kean P N, Sibbert W. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser[J]. Opt Lett, 1991, 16(1): 42-44.
- 17 Fan Liming, Zhu Guoying, Chen Shisheng, *et al.*. Self-mode-locking in Nd:YAG laser[J]. Acta Optica Sinica, 1992, 12(1): 16-20.
樊立明, 朱国英, 陈时胜, 等. Nd:YAG 激光器中的自锁模[J]. 光学学报, 1992, 12(1): 16-20.
- 18 Liu K X, Flood C J, Walker D R, *et al.*. Kerr lens mode locking of a diode-pumped Nd:YAG laser[J]. Opt Lett, 1992, 17(19): 1361-1363.
- 19 Wang Qingyue, Dai Jianming, Xiang Wanghua, *et al.*. Femtosecond pulse generation of self-mode-locked Ti:sapphire laser by self-focusing[J]. Acta Optica Sinica, 1993, 13(1): 93-34.
王清月, 戴建明, 向望华, 等. 掺钛蓝宝石激光器实现飞秒级自聚焦锁模运转[J]. 光学学报, 1993, 13(1): 93-34.
- 20 Xing Qirong, Li Peng, Zhang Weili, *et al.*. 62 fs self-mode-locked Ti:sapphire laser[J]. Chinese J Lasers, 1993, 20(8): 584.
邢岐荣, 李 鹏, 张伟力, 等. 62 fs 掺钛蓝宝石自锁模激光器[J]. 中国激光, 1993, 20(8): 584.
- 21 Dai Jianming, Shen Yuzhen, Liu Xin, *et al.*. Self-mode-locked ring cavity Ti:sapphire laser[J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(8): 1056-1059.
戴建明, 沈宇震, 刘 新, 等. 环形腔自锁模掺钛蓝宝石激光器[J]. 光学学报, 1996, 16(8): 1056-1059.
- 22 Wang Qingyue, Dai Jianming, Zhang Weili, *et al.*. Low power pumped 15 fs self-mode-locked Ti:sapphire laser[J]. Chinese J Lasers, 1997, 24(12): 1057-1060.
王清月, 戴建明, 张伟力, 等. 15 fs 低功率低功率抽运的自锁模掺钛蓝宝石激光器[J]. 中国激光, 1997, 24(12): 1057-1060.
- 23 Song Youjian, Hu Minglie, Wang Yanzhi, *et al.*. Studies on mode-locking features of sub-10-fs Ti:sapphire oscillator with domestic chirped mirror for intra-cavity desperation compensation[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3215-3220.
宋有建, 胡明列, 王胭脂, 等. 基于国产啁啾镜色散补偿的近 10 fs 钛宝石激光器锁模特性的研究[J]. 光学学报, 2010, 30

- (11): 3215–3220.
- 24 Huang Feng, Lou Qihong. Progress on the self-mode-locking femtosecond Ti:sapphire laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 1999, 36(8): 13–18.
黄峰, 楼祺洪. 自锁模飞秒钛宝石激光技术进展[J]. *激光与光电子学进展*, 1999, 36(8): 13–18.
- 25 Wei Zhiyi, Kobayashi, Yohei, *et al.*. Generation of two-color femtosecond pulses by self-synchronizing Ti:sapphire and Cr:forsterite lasers[J]. *Opt Lett*, 2001, 26(22): 1806–1806.
- 26 Zhang Chi, Wei Zhiyi, Zhang Ling, *et al.*. Passively mode-locked Nd:GdVO₄ laser at 912 nm[J]. *Chin Phys Soc*, 2006, 15(11): 2606–2608.
- 27 Wei Zhiyi, Zhong Xin, Zhou Binbin, *et al.*. Frequency extending of ultrashort laser pulse with linear and nonlinear processes[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 987–992.
魏志义, 钟欣, 周斌斌, 等. 超短脉冲激光频率的线性与非线性扩展[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(6): 987–992.
- 28 Mao Xiaojie, Bi Guojiang, Pang Qingsheng, *et al.*. 20 MHz compact high power passively mode-locked Nd:YVO₄ laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1002004.
毛小洁, 秘国江, 庞庆生, 等. 20 MHz紧凑型高功率被动锁模Nd:YVO₄激光器[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1002004.
- 29 Ramaswamy M, Fujimoto J G. Compact dispersion-compensating geometry for Kerr-lens mode-locked femtosecond laser[J]. *Opt Lett*, 1994, 19(22): 1756–1758.
- 30 Melish R, Chernikov S V, French P M W, *et al.*. All-solid-state compact high repetition rate modelocked Cr⁴⁺:YLF laser[J]. *Electron Lett*, 1998, 34(6): 552–553.
- 31 Bartels A, Dekorsy T, and Kurz H. Femtosecond Ti:sapphire ring laser with a 2-GHz repetition rate and its application in time-resolved spectroscopy[J]. *Opt Lett*, 1999, 24(14): 996–999.
- 32 Bartels A, Heinecke D, and Diddams S A. Passively mode-locked 10 GHz femtosecond Ti:sapphire laser[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(16): 1905–1908.
- 33 Huang Y J, Liang H C, Chen Y F, *et al.*. High-power 10-GHz self-mode-locked Nd:LuVO₄ laser[J]. *Laser Phys*, 2011, 21(10): 1750–1754.
- 34 Huang Y J, Tzeng Y S, Tang C Y, *et al.*. Tunable GHz pulse repetition rate operation in high-power TEM₀₀-mode Nd:YLF lasers at 1047 nm and 1053 nm with self-mode-locking[J]. *Opt Express*, 2012, 20(16): 18230–18238.
- 35 Yumashev K, Posnov N, Prokoshin P, *et al.*. Z-scan measurements of nonlinear refraction and Kerr-lens mode-locking with Yb³⁺: KY(WO₄)₂[J]. *Opt Quant Electron*, 2000, 32(1): 43–48.
- 36 Spühler G J, Paschotte R, Keller U, *et al.*. Diode-pumped passively mode-locked Nd:YAG laser with 10-W average output power in a diffraction-limit beam[J]. *Opt Lett*, 1999, 24(8): 528–530.
- 37 Zhang Z G, Tadashi Nakagawa, Kenji Torizuka, *et al.*. Self-starting mode locked Cr:YAG laser with a broadband semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Opt Lett*, 1999, 24(23): 1768–1770.
- 38 Krainer L, Paschotta R, Aus der Au J, *et al.*. Passively mode-locked Nd:YVO₄ laser with up to 13 GHz repetition rate[J]. *Appl Phys B*, 1999, 69(3): 245–247.
- 39 Krainer L, Paschotta R, Lecomte S, *et al.*. Compact Nd:YVO₄ laser with pulse repetition rate up to 160 GHz[J]. *IEEE J Quantum Elect*, 2002, 38(10): 1331–1339.
- 40 Lecomte S, Kalisch M, Krainer L, *et al.*. Diode-pumped passively mode-locked Nd:YVO₄ lasers with 40-GHz repetition rate[J]. *IEEE J Quantum Elect*, 2005, 41(1): 45–53.
- 41 Krainer L, Paschotta R, Spühler G J, *et al.*. Tunable picosecond pulse-generating laser with a repetition rate exceeding 10 GHz[J]. *Electron Lett*, 2002, 38(5): 225–227.
- 42 Spühler G J, Golding P S, Krainer L, *et al.*. C-band tunable 25 GHz passively mode-locked Er:Yb:glass laser[J]. *Electron Lett*, 2003, 39(10): 778–780.
- 43 Zeller S C, Krainer L, Spühler G J, *et al.*. Passively mode-locked 40-GHz Er:Yb:glass laser[J]. *Appl Phys B*, 2003, 76(7): 787–788.
- 44 Zeller S C, Krainer L, Spühler G J, *et al.*. Passively mode-locked 50-GHz Er:Yb:glass laser[J]. *Electron Lett*, 2004, 40(14): 875.
- 45 Oehler A E H, Suedmeyer T, Weingarten K J, *et al.*. 100-GHz, 1.1-ps pulse train at 1.5 μm from a passively modelocked Er:Yb:Glass laser[C]. *Opt Comm. (ECOC)*. 36th European Conference and Exhibition on, IEEE, 2010. 1–3.
- 46 Keller U, Nelson L E, Chiu T H. Diode-pumped high repetition rate, resonant passive mode-locked Nd:YLF laser[C].

- Advanced Solid-State Lasers Optical Society of America, 1992. SL5.
- 47 Leburn C G, Lagatsky A A, Brown C T A, *et al.*. Femtosecond Cr⁴⁺:YAG laser with 4 GHz pulse repetition rate[J]. *Electron Lett*, 2004, 40(13): 805–807.
- 48 Oehler A E H, Südmeyer T, Weingarten K J, *et al.*. 100 GHz passively mode-locked Er:Yb:glass laser at 1.5 μm with 1.6 ps pulses[J]. *Opt Express*, 2008, 16(26): 20930–21935.
- 49 Oehler A E H, Stumpf M C, Pekarek S, *et al.*. Picosecond diode-pumped 1.5 μm Er:Yb:glass lasers operating at 10–100 GHz repetition rate[J]. *Appl Phys B*, 2010, 99(1–2): 53–62.
- 50 Wasylczyk P, Wnuk P, Radzewicz C. Passively mode-locked, diode-pumped Yb:KYW femtosecond oscillator with 1 GHz repetition rate[J]. *Opt Express*, 2009, 17(7): 5630–5635.
- 51 Yang H W, Kim C, Choi S Y, *et al.*. 1.2-GHz repetition rate, diode-pumped femtosecond Yb:KYW laser mode-locked by a carbon nanotube saturable absorber mirror[J]. *Opt Express*, 2012, 20(28): 29518–29523.
- 52 Klenner A, Golling M, Keller U. A gigahertz multimode-diode-pumped Yb:KGW enables a strong frequency comb offset beat signal[J]. *Opt Express*, 2013, 21(8): 10351–10358.
- 53 He Jingliang, Hao Xiaopeng, Xu Jinlong, *et al.*. Ultrafast mode-locked solid-state lasers with graphene saturable absorber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900138.
何京良, 郝霄鹏, 徐金龙, 等. 基于石墨烯可饱和吸收被动锁模超快全固体激光器的研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900138.
- 54 Schmidt A, Rivier S, Cho W B, *et al.*. Sub-100 fs single-walled carbon nanotube saturable absorber mode-locked Yb-laser operation near 1 micron[J]. *Opt Express*, 2006, 17(22): 20109–20116.
- 55 Baek I H, Choi S Y, Lee H W, *et al.*. Single-walled carbon nanotube saturable absorber assisted high power mode-locking of Ti:sapphire laser[J]. *Opt Express*, 2011, 19(8): 7833–7838.
- 56 Cho W B, Schmidt A, Yim J H, *et al.*. Passive mode-locking of a Tm-doped bulk laser near 2 μm using a carbon nanotube saturable absorber[J]. *Opt Express*, 2009, 17(13): 11007–11012.
- 57 Fng K H, Kikuchi K, Goh C S, *et al.*. Solid-state Er:Yb:glass laser mode-locked by using single-walled carbon nanotube thin film[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(1): 38–40.
- 58 Agnesi A, Carra L, Pizrio F, *et al.*. Diode-pumped Nd:BaY₂F₈ picosecond laser mode-locked with carbon nanotube saturable absorber[J]. *J Opt Soc Am B*, 2010, 27(12): 2739–2742.
- 59 Grange R, Zeller S, Haiml M. Antimonide semiconductor saturable absorber for passive mode locking of a 1.5 μm Er:Yb:glass laser at 10 GHz[J]. *IEEE J Quantum Elect*, 2006, 18(8): 805–807.
- 60 Li D, Demirbas U, Birge J R, *et al.*. Diode-pumped passively mode-locked GHz femtosecond Cr:LiSAF laser with kW peak power[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(9): 1446–1448.
- 61 Zhang Z Y, Oehler A E H, Resan B, *et al.*. 1.55 μm InAs/GaAs quantum dots and high repetition rate quantum dot SESAM Mode-locked laser[J]. *Sci Rep*, 2012, 2: 477–482.