

高峰值功率固体飞秒激光振荡器技术的进展*

赵玲慧 魏志义 张杰†

(中国科学院物理研究所光物理实验室 北京 100080)

摘要 总结了目前几种可产生兆瓦级 (10^6W) 峰值功率的飞秒 (10^{-15}s) 掺钛蓝宝石激光器的发展状况,分析了这类激光器相应的腔结构,讨论了相关的特点以及在实验上的应用前景.

关键词 Ti:Al₂O₃ 飞秒激光器 兆瓦 (10^6W) 腔倒空 多通长腔 (MPC)

DEVELOPMENT OF A HIGH-PEAK-POWER FEMTOSECOND LASER OSCILLATOR

ZHAO Ling-Hui WEI Zhi-Yi ZHANG Jie†

(Laboratory of Optical Physics, The Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The various techniques for producing femtosecond (10^{-15}s) Ti:sapphire laser pulses with megawatt peak power are reviewed. The cavity configurations are analyzed and compared in detail. Finally, the potential applications of these techniques in experiments are discussed.

Key words Ti:Al₂O₃ femtosecond laser, megawatt, multi-pass cavity cavity-dumping

1 引言

随着超短脉冲激光技术的飞速发展,目前人们已从克尔透镜锁模(KLM)的掺钛蓝宝石飞秒激光器中直接产生脉冲宽度不到两个光学周期的激光脉冲^[1](对于800nm的中心波长,一个光学周期约等于2.7fs),同时利用啁啾脉冲放大技术(CPA)所能获得的最高脉冲峰值功率已经突破了 10^{15}W ^[2].这些技术为诸如物理、化学、生物等超快研究及强场物理领域带来了前所未有的实验条件.但是一般而言,从这类KLM锁模钛宝石激光器直接输出的单个脉冲能量通常仅有数个nJ,因此无法满足许多需要较高能量脉冲才能产生非线性光学效应的研究工作要求,并且由于飞秒脉冲激光振荡器的高重复频率特性(70—100MHz),由其直接输出的脉冲易产生热寄生效应并导致实验样品失性,同时使得实验检测非常困难.另一方面,虽然CPA激光放大系统可以弥补这些缺陷,但其繁杂的结构、复杂的技术、较高的成本、有限的稳定性及过低的重复频率则制约着它在大量实验研究领域的推广和应用.考虑到大量的超

快非线性光学效应产生在MW量级的激光强度(如光纤中的超连续光谱产生),因此发展结构简单、技术简易、价格低廉但单脉冲能量介于振荡器与普通放大器之间,且具有合适重复频率的飞秒激光器件便成为具有广泛应用前景的研究工作.针对这一应用要求,迄今人们先后采用腔倒空技术、多通长腔技术、高平均功率锁模技术等多种方案在钛宝石激光振荡器中直接获得了MW级的飞秒脉冲输出,并在飞秒脉冲压缩技术、波包相位控制技术及光子器件制作等前沿研究中获得重要应用并取得重要结果.无疑,深入了解这类激光器各自的技术特性并实现进一步的突破,是飞秒激光技术及超快应用研究的重要内容之一.

2 腔倒空飞秒固体激光技术

腔倒空技术与飞秒钛宝石激光器的首次结合是

* 国家自然科学基金(批准号 69878032)资助项目

2002-01-24收到初稿 2002-05-08修回

† 通讯联系人.E-mail:jzhang@aphy.iphy.ac.cn

在 1993 年由美国 MIT 的 M. Ramaswamy 等人实现的, 他们应用声光调制器作为腔倒空器件, 直接从钛宝石激光中产生了单脉冲能量达 100nJ、脉宽约 50fs、重复频率在 1MHz 附近的可调且峰值功率比普通飞秒激光振荡器高一个多量级的激光脉冲序列^[3]. 此后多个研究小组也相继开展了这项工作的研究, 所能获得的最短脉冲已经接近 10fs, 并且采用电光调制所倒空的单脉冲能量超过了 200nJ. 同时, 腔倒空技术也被推广到其他介质的飞秒固体激光器中.

腔倒空技术的基本原理是利用声光(布拉格盒)或电光(普克尔盒)调制器件作为开关元件, 使得谐振腔在高 Q 状态下储存的能量在瞬间释放出来, 从而获得较高能量的激光脉冲. 图 1 为本实验室研制成功的声光腔倒空激光器的结构图^[4]. 其工作过程是: 当声光器件上未加电压时, 谐振腔处于高 Q 值状态, 于是在腔内建立起极强的激光振荡(但无输出). 等到腔内激光能量达到最大值后, 由确定的反馈信号作为时钟脉冲, 瞬间加电压于声光器件上形成超声场, 使得腔内存储的高能量激光束几乎全部发生偏转耦合输出. 很显然, 腔倒空激光器的耦合输出效率是较高的, 光脉冲的重复频率也可以达到 MHz 以上. 电光调制器也有相同的工作原理, 而且采用电光调制器可以比声光调制器获得更低的重复频率和更高的脉冲能量, 但是从光开关对整个激光系统引入的额外色散来考虑, 由于布拉格盒较短的光学长度和较好的色散性质, 所以在飞秒腔倒空激光中人们更多地选择声光调制器作为腔倒空元件.

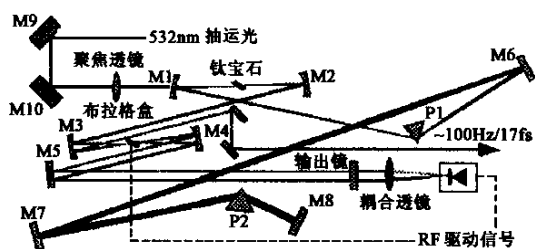


图 1 声光腔倒空激光器结构示意图

采用腔倒空技术后, 飞秒激光谐振腔输出的脉冲能量可以提高到原来的 10 倍甚至更高, 并且由于腔倒空过程是宽带和非谐振的, 脉冲的宽度与波长的可调谐性就可以得到保证. 腔倒空技术与自锁模钛宝石激光器的结合在保持了激光器的稳定性和可调谐性的同时使得脉冲的峰值功率有了显著的提高, 并且其重复频率是可以随着实验条件的要求而改变的, 这对于避免单次作用型光学试验的累积效应是非常重要的.

3 多通长腔(MPC)结构飞秒钛宝石激光

多通长腔(MPC)最早是由 Herriott 于是 1964 年提出的^[5], 随后应用在微波放大器中, 由于腔内光线的交叉而导致附加的非线性相互作用, 因而可以增强输出脉冲的峰值功率至输入脉冲的 1.7 倍^[6](这要求往返次数非常高). 随着钛宝石激光器的出现, MPC 被用来有效扩展激光腔长从而改变脉冲的输出重复频率. 目前利用该结构人们已获得了 90nJ 的单脉冲能量.

我们知道, 在确定的条件下, 激光所能输出的总平均功率基本上是不变的, 因此通过扩展腔长而降低重复频率, 无疑是提高输出激光脉冲能量的一个有效途径. MPC 作为扩展激光腔长的典型技术方案, 其结构通常由相距一定距离的一对凹面镜组成(一般为等曲率半径), 每个凹面镜都有一个光学切槽, 光线从其中一个腔镜的切槽射入 MPC, 然后在两个腔镜上多次反射, 往返传输, 最后符合要求的光线经多次往返从另外一面腔镜的切槽射出(如图 2 所示). 出于节省空间的考虑, 如果使光线每经过一次镜面反射后以一定的角度旋转, 则可以通过调节腔镜对光线的多次反射, 从而使得腔内所有光线的轨迹分布在一个旋转双曲面的表面上, 并最终形成闭合光路. 改变入射光线相对光轴的角度, 每一个镜面上的反射光斑将组成一个椭圆或圆(如图 3 所示).

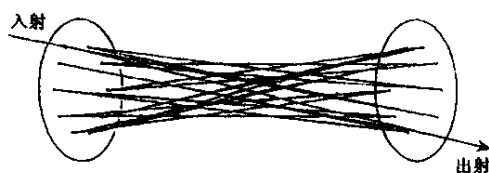


图 2 多通长腔内的光束传输

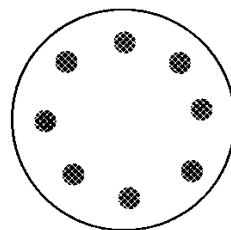


图 3 腔镜上的光斑分布

图 4 所示为加入 MPC 的掺钛蓝宝石激光器. 其中一臂插有一对布儒斯特切割放置的石英棱镜, 用

于补偿腔内的色散;另一臂插有 MPC 子腔,由 ABCD 矩阵传输理论可以计算得到光线在 MPC 中经过 n 次往返传播后的矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^n = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

此矩阵为单位矩阵,即经过 n 次往返后, MPC 对光束提供了 q 参数的单位变换,使得激光腔内的模式实现了完全的自再现,这正是用它来扩展钛宝石激光器腔长的原因所在。

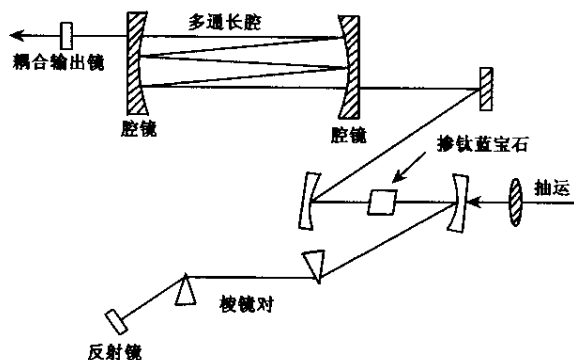


图 4 多通长腔飞秒钛宝石激光器示意图

由于 MPC 对光束模式的 q 参数提供了单位变换,即 MPC 实现了零效应长度,因此将其应用到飞秒激光腔后,其锁模区不会因为 MPC 的加入而受到太大的影响,从而保证了整个光路的稳定性。由于光线在腔内往返的次数决定着实际的激光总腔长,我们不难理解, MPC 的引入将在维持谐振腔基本特性不变的情况下,使激光输出脉冲的重复频率得以大大降低,因而每个单脉冲可以获得比普通激光脉冲高得多的能量和增益。

与造价较高的腔倒空技术相比,多通长腔简洁的结构和低廉的费用是非常具有吸引力的。同时,许多实验结果也表明,采用 MPC 系统,可以得到与腔倒空技术完全相比拟的结果^[7,8]。

4 望远镜长腔结构钛宝石飞秒激光

与 MPC 结构的长腔飞秒掺钛蓝宝石激光器的原理相类似,如果在激光器一臂中插入 1:1 的折叠望远镜系统来代替多通长腔,则同样可以在维持谐振腔基本特性不变的情况下,有效地降低输出脉冲的重复频率,从而使相应的脉冲能量得以大大提高。由于这种 1:1 特性的望远镜系统可以在一个焦平面上很好地再现另一个焦平面上光束的腰半径和走离状况,类似于多通腔对 q 参数的单位变换,因此该

类望远镜的引入仅加长光束的传输路程,而不会对钛宝石激光器的锁模稳定性产生影响。1999 年, Ariel. R. Libertun 用这种结构产生了重复频率为 15.5MHz、单脉冲能量为 36nJ 的飞秒脉冲序列^[9]。图 5 为典型的光路结构图。

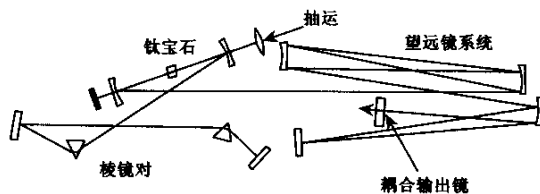


图 5 望远镜长腔飞秒钛宝石激光器

5 可直接输出 MW 级峰值功率的钛宝石飞秒激光

通过前面的分析,可以看出相对于啁啾脉冲放大(CPA)技术而言,腔倒空及长腔结构的飞秒固体激光器为人们采用简单的技术方法获得较高能量的飞秒脉冲提供了可能。但与普通的固体飞秒激光器比较,上述激光在实验研究及调节使用中仍然存在着较大的技术难度。那么有无可能直接从普通结构的激光腔中产生 MW 级峰值功率的高能量飞秒脉冲呢?虽然通常情况下借助增加抽运能量可以直观地提高激光的输出强度,然而对于固体飞秒激光器来讲,过强的抽运能量将导致激光介质产生严重的热透镜效应,这种效应所伴生的附加透镜的焦距甚至可以短至几厘米,这时的飞秒激光振荡器将不再维持并不再具有锁模特性,因此仅靠简单地提高抽运功率并不能获得 MW 级的脉冲峰值功率。

针对上述原因,如果改进激光增益介质的冷却条件,减小其热透镜效应,则同样可望获得稳定的飞秒脉冲,而且无疑也是产生 MW 级飞秒脉冲最简单的技术方法。1998 年,奥地利的 F. Krausz 研究小组通过冷却钛宝石晶体及采用透过率为 35% 的输出耦合镜,在 8.5W 的全固化 532nm 抽运功率下,产生了单脉冲能量为 13.3nJ、脉冲宽度为 7fs,对应峰值功率约 1.9MW 的钛宝石激光脉冲^[10]。当然,如果优化设计激光腔的结构及参数,通过激光谐振腔本身补偿晶体的热透镜效应,在室温下也是可以实现高功率飞秒脉冲运行的。2000 年, Jie Jiang 等人采用零下 10℃ 的低温冷却晶体技术及宽带低损耗的半导体可饱和吸收镜 (SESAM),在 10W 的全固化 532nm 激光抽运下,产生了单脉冲能量大于 20nJ、脉宽

16fs, 对应峰值功率大于 1.25MW 的钛宝石激光锁模脉冲^[1]. 这些技术的不断发展, 使得在许多超快非线性研究中使用高能量飞秒激光脉冲变得更加简单、可行.

重视. 随着固体飞秒激光技术研究的不断深入, 上述激光无疑将会与 CPA 激光装置一样, 成为许多领域中人们开展自然科学研究的主要选择工具之一.

参 考 文 献

6 结束语

腔倒空固体飞秒激光技术、长腔折叠飞秒激光技术及高功率抽运飞秒激光技术的发展, 为人们直接从激光振荡器产生 MW 级峰值功率的飞秒脉冲提供了可能. 到目前为止, 腔倒空技术已经有了相当成熟的进展. 采用长腔折叠及特殊冷却的 MW 级飞秒钛宝石激光也在数个实验室里取得了成功. 由于这类激光简洁的结构及能产生相对可观的非线性效应, 因此在化学、生物、物理及频率测量等各个研究领域有着比较广泛的应用, 并受到人们越来越多的

- [1] Ell R, Morgner U, Kärtner F X *et al.* Opt. Lett. 2001 26 373
- [2] Perry M D *et al.* Opt. Lett. 1999 24 160
- [3] Ramaswamy M, Mulman *et al.* Opt. Lett. 1993 18 1822
- [4] Yang H, Qiu Y *et al.* Acta. Physica Sinica 2001 50 1930
- [5] Herriott D, Kogelnik H, Kompfner R. Appl. Opt. 1964 3 523
- [6] Rabinowitz P, Stein A, Brickman R *et al.* Appl. Phys. Lett. 1979, 35 739
- [7] Cho S H, Kärtner F X, Ippen E P *et al.* Opt. Lett. 2000 26 560
- [8] Cho S H, Bouma B E, Ippen E P *et al.* Opt. Lett. 1998 24 717
- [9] Libertun A R, Shelton R *et al.* In: Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO), 1999, paper CThR3
- [10] Xu L *et al.* Opt. Lett. 1998 23 789
- [11] Jiang J *et al.* Opt. Commun. 2000 183 159

· 物理新闻 ·

左旋物质

(Left - Handed Materials)

最近在美国波士顿召开的“电磁学研究进展年会”上最为热门的话题是“左旋物质(Left - Handed Materials, 简称 LHM). 左旋物质是指其介电常数和导磁率都是负值的物质, 在世界上对电场或磁场中的任一种具有负响应系数的材料已经是极其稀少, 更不用说对两个场都具有负响应效应的材料了. 当光线入射到左旋物质的样品时, 它具有负的折射率, 即光的折射方向是与一般材料的折射方向相反. 由于这种特性, 左旋物质就成为固态滤波器以及各种天线的首选材料.

左旋物质一般都是金属材料, 它们由 C - 型金属环(即半环谐振器 split - ring resonators, SRR)和微型的金属棒所构成. 目前对左旋物质光学特性的理论还存在着不少的争论, 但世界各国的许多实验室却是不遗余力地在进行着实验研究.

开始时, 半环谐振器都是平面结构, 即把微型印刷电路嵌入到有槽沟的母板中, 它的光学效应基本上是二维的. 现在位于苏黎士的 ETHZ 实验室的 O. Martin 教授的研究组已成功地制成了三维的谐振器, 它使左旋物质能在三维空间中运行. Martin 教授还认为左旋物质的应用将会引起无线通讯中一些基本概念的改变, 另外它还对进一步制造超小型、高效率、各向同性的天线提供了可能性.

(云中客 摘自 Appl. Phys. Lett. 29 July 2002)