

# 新一代飞秒激光系统的固体泵浦源

白晋涛

(西安石油学院, 西安 710061)

评述了新一代飞秒激光系统的固体泵浦源——连续(CW)锁模 Nd:YAG 倍频激光器及其核心部分 CW 锁模 Nd:YAG 激光器的研究现状. 介绍了在超高频 CW 锁模情况下如何获得高稳定性、高输出功率的 CW 锁模倍频绿光输出的一些有效方法。

飞秒( $\sim 10^{-15}$ s)激光脉冲的产生和测量是当前激光研究领域中十分活跃的课题之一,许多发达国家投入了大量的人力和资金开展这方面的工作,其原因是它有极其广泛的潜在应用,特别是在基础科学及光和物质相互作用的超快速过程的研究方面显示出惊人的时间分辨能力. 此外在精密光学、光通信、激光受控热核聚变以及探索 X 射线激光等方面,超短光脉冲也将占据十分重要的地位. 目前,在实验室直接产生的最短光脉冲为 27fs<sup>[1]</sup>和 19fs<sup>[2]</sup>,借助腔外压缩技术,则可获得 6fs 的光脉冲世界纪录.

同步泵浦锁模(SPM)和碰撞脉冲锁模(CPM)是目前产生飞秒光脉冲的两种重要技术. 前者容易进行波长调谐;后者容易获得最短的光脉冲. 不久前国外和目前国内都是把连续锁模氩离子激光器或铜蒸气激光器作为泵浦源,从而产生连续的超短光脉冲系列. 但由于它们存在价格昂贵,使用寿命短(满负荷运转,其寿命一般不超过 1000h),体积大,重量重,消耗功率高,容易破碎等弱点,因此应用上受到限制. 长期以来,人们一直在努力寻找比较实用的飞秒染料激光泵浦源. 大家知道, Nd:YAG 固体激光器具有许多优越性,特别是其二次谐波的波长( $0.53\mu\text{m}$ )恰处在许多染料(如 Rh6G 等)的吸收带,从 1965 年首次实现二倍频以来, Nd:YAG 倍频激光器发展非常迅速,同时也大大促进了皮秒(ps,  $10^{-12}$ s)级 YAG 激光器锁模技术和非线性光学材料的发展. 但由于缺乏具有高非线性系数、高损伤阈值和相应的相位匹配的非线性材料,倍频效率一直很低(特别是在物理

连续波或超高频连续锁模情况下). 自从 1976 年一种新型倍频晶体  $\text{KTiOPO}_4$  (KTP, 磷酸钛氧钾)问世以来<sup>[3]</sup>,这方面的工作才有了突破性的进展. 我国是在 1984 年底研制成功 KTP 晶体的. 在短短几年时间内,各种类型的 Nd:YAG 倍频激光器也取得了可喜的成果. 特别值得注意的是在连续波或几百兆赫超高频连续锁模 YAG 倍频方面突破了长期停留在百毫瓦数量级的水平,已发展成为染料激光器的理想泵浦源,为获得飞秒超短光脉冲,从而为进行超快现象的研究奠定了基础.

## 一、CW 锁模 Nd:YAG 激光器

CW 锁模 Nd:YAG 激光器是 CW 锁模 Nd:YAG 倍频激光器的核心部分,它的锁模频率稳定度、功率密度、光束的稳定性及腔型结构等对倍频效率和输出绿光的脉宽及其稳定度影响很大,从而也影响到同步泵浦飞秒染料激光器的输出特性. 因此,建立一台高输出功率、高稳定度、且有利于倍频的 CW 锁模 Nd:YAG 激光器是整个飞秒激光系统的基础.

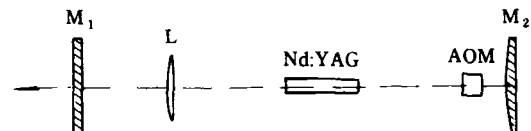


图1 CW 锁模 Nd:YAG 激光器

图1是典型的 CW 锁模 Nd:YAG 激光器的实验装置.  $M_1, M_2$  为腔镜, AOM 为声光调制器,一般采用布拉格声光衍射,由高稳定度频率的射频驱动源驱动, L 为一薄凸透镜. 为稳定腔

长,整个谐振腔一般用具有温度补偿的石英腔架及殷钢结构(0.2 $\mu\text{m}/\text{C}$ 的温度变化率)支撑.对调幅锁模,其脉宽的表达式为<sup>[4]</sup>

$$\tau = \frac{(\sqrt{2} \ln 2)^{1/2}}{\Pi} (g_0/\delta_1)^{1/2} (1/f_m \Delta\nu)^{1/2}, \quad (1)$$

其中  $g_0$  为腔内的单程损耗,  $\delta_1$  为调制深度,  $f_m$  为调制频率,  $\Delta\nu$  为激活介质的线宽. 由(1)式可以看出,选择大的  $f_m$  有利于脉宽的压缩,从而也有利于获得更短的染料飞秒激光脉冲输出. 然而,调制频率  $f_m$  越高,要得到高功率、高稳定度的 CW 锁模激光输出,其困难也就越大. 因此,高于 100MHz 超高频 CW 锁模的报道非常少见. 1983 年,Johnson 等人在 100MHz 重复频率下,得到了平均功率为 6W,脉宽为 120ps 的 1.06 $\mu\text{m}$  CW 锁模激光输出<sup>[5]</sup>. 1988 年,De-Fonco 等人在相同的重复频率下,得到了平均功率为 14W,脉宽为 60ps 的最好水平的锁模激光输出<sup>[6]</sup>. 国外也有不少人在 76MHz 锁模频率下进行了实验研究. 我国在这方面的报道很少. 1982 年,国内有人在 200MHz 高重复频率下得到脉宽为 200ps、输出平均功率仅 200mW 的 CW 锁模激光输出. 前不久,为获得一台能同步泵浦 CPM 飞秒染料激光器的理想 Nd:YAG 固体泵浦源,我们对其核心部分——CW 锁模 Nd:YAG 激光器进行了热扰功不灵敏性极小值设计和优化腔参数等方面的理论与实验研究<sup>[7]</sup>. 为尽量补偿激光棒的热透镜效应和在腔内形成利于倍频的细束腰(半径约为 50 $\mu\text{m}$ ),以及减少腔内元件,我们将谐振腔设计成为单透镜望远镜腔,即在腔内插入一块薄凸透镜 L,它与具有热透镜效应的激光棒共同形成了所谓的望远镜腔. 结果在 3.5kW 单灯连续激励下,获得了重复频率为 200MHz,脉宽约 100ps,平均功率为 15W 的完全锁模 1.06 $\mu\text{m}$  的激光输出.

## 二、CW 锁模 Nd:YAG 倍频激光器

倍频一般分腔内和腔外倍频两种. 由于腔内激光功率是腔外的  $(1-R)^{-1}$  倍 ( $R$  是反射镜的反射率),而具有高损伤阈值的 KTP 晶体也

已研制成功,因此,腔内倍频技术发展迅速. 目前,国内借助调 Q 技术,采用 KTP 腔内倍频方式,可获得 34W 的多模绿光输出<sup>[8]</sup>,倍频效率可达 70% 以上. 理论和实验均表明,与采用调 Q 技术相比,连续波或 200MHz 一类的超高频 CW 锁模激光器的倍频效率相当低,通过精心设计与实验,目前可得到的最高倍频效率一般也只有 10% 左右.

在图 1 所示的腔结构中插入一块倍频晶体(一般 KTP 晶体的最佳长度为 5mm 左右),就构成了线型腔 CW 锁模 Nd:YAG 腔内倍频激光器,如图 2 所示. 这种结构的最大优点是大大

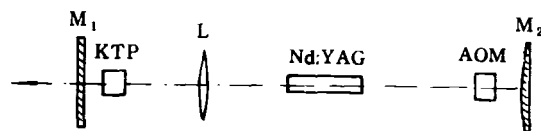


图2 CW锁模 Nd:YAG 腔内倍频激光器

提高了 KTP 晶体中的激光功率密度,可达到 95MW/cm<sup>2</sup> (而一般 CW 锁模激光器中的功率密度仅有 0.6MW/cm<sup>2</sup> 左右),这是 KTP 晶体能有效产生二次谐波的最起码的入射能量要求. 我们在单灯 3.5kW 连续泵浦下,获得了 1W 的完全锁模绿光输出.

为进一步有效利用基波光,提高倍频效率,常常采用双通倍频方式,即让基波光往返两次通过倍频晶体后获得的 0.53 $\mu\text{m}$  倍频光一并耦合输出到腔外. 实现双通倍频的方法很多,图 3 为 L 型单透镜望远镜腔 CW 锁模 Nd:YAG 倍频激光器结构示意图. 其中 M<sub>2</sub> 为 45° 放置的对

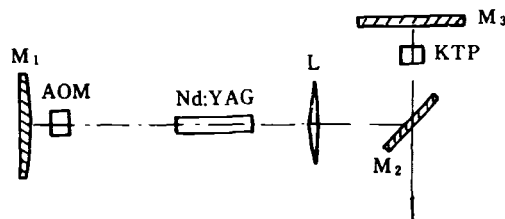


图3 L型腔 CW 锁模 Nd:YAG 腔内双通倍频激光器

1.06 $\mu\text{m}$  激光全反射而对 0.53 $\mu\text{m}$  激光全透射的反射镜. 利用这种结构,我们在 3.5kW 单灯连续泵浦下,得到重复频率为 200MHz,平均功率为 1.5W 的 CW 锁模绿光输出<sup>[7]</sup>,大大超出

染料激光的阈值泵浦功率(一般为700mW)。

这种腔结构的进一步改进是在腔内加入起偏器(或布氏窗)。众所周知,Ⅰ类相位匹配过程是由两个相互垂直偏振的基波光子耦合产生一个倍频波光子,因此只有当入射基波偏振矢量和两个偏振方向各成45°时,基波才是偏振匹配的,这时基波的利用率最高。而在一般情况下,Nd:YAG激光器输出的均是非偏振光,所以有一半基波对倍频无贡献。起偏器的加入可实现偏振匹配,使倍频效率进一步提高。

作为一台理想的飞秒染料激光器泵浦源,其稳定度要求很高。另一方面,倍频光功率与其波光功率的平方成正比<sup>[9]</sup>,所以倍频绿光输出对基波光的波动非常敏感,这在国际上已被专门列为所谓的“绿光问题”。除采用一般的机械性稳定和光学反馈稳定等措施外,人们还发现腔内加入 $\frac{1}{4}\lambda$ 片后,可大大改善输出绿光的稳定性。

目前国外又出现了建立完全固体化的飞秒装置路线。实现这条路线的主要先决条件是:(1)研制高辐射质量的ps准连续波Nd:YAG激光器;(2)改进KTP晶体生长工艺;(3)研究非线性光学控制辐射参数时光脉冲的有效压缩

和功率稳定的原理;(4)研究利用光纤受激拉曼散射变频器宽带辐射的可能性。上述这些条件的结合,就出现了制造工艺上相当简单的ps和fs系统的新可能性。然而,这个系统的基础还是CW锁模Nd:YAG倍频激光器。由此可见,在今后的飞秒超短光脉冲技术的发展中,这新一代固体激光泵浦源必将发挥越来越重要的作用。

作者感谢王诺教授和王水才研究员在实验中给予的大力支持和帮助。

- [1] J. V. Valdmánis et al., *Opt. Lett.*, **10**-3(1985), 131.
- [2] G. Chen et al., Proc. of 18th ICHSP, Xian, China (1988).
- [3] F. C. Zumsteg et al., *J. Appl. Phys.*, **47**(1976), 4980.
- [4] D. J. Kuizenga et al., *IEEE J. QE*-16(1970), 694.
- [5] A. M. Johnson et al., *Opt. Lett.*, **8**(1983), 554.
- [6] A. P. Defonzo et al., *Appl. Opt.*, **27**(1988), 3604.
- [7] Jintao Bai et al., *Chinese J. of Lasers(E. E.)*, 1-2 (1992), 101.
- [8] 姚建铨等, *物理*, **19**-2(1987), 122.
- [9] 董孝义, *光波与电子学*, 南开大学出版社(1987), 240.

## 1993年第11期《物理》内容预告

### 知识和进展

纪念中国物理学会成立60周年邀请报告选登(VI)

- 物理概念与实验演示(冯端);
- 电子学与光子学(于荣金);
- 富勒烯分子簇三阶非线性光学特性(龚旂煌);
- 正常态金属介观环的持续电流(周义昌);
- 单电子晶体管(郭宝增);
- 未来计算系统中的光互连(陈雷等);
- 纳米材料结构研究与正电子寿命谱学(彭郁卿)。

### 物理学和经济建设

绿色植物反射光谱的特征及其在监测农作物生长中的应用(金仲辉)。

### 实验技术

利用小孔衍射实现光学显微镜的超高分辨率(肖体乔

等)。

### 讲座

光学模式识别和人工智能处理器(张钧屏)。

### 物理学史和物理学家

- 彼得·塞曼和塞曼效应(宋世榕);
- 爱因斯坦与黎曼几何(阳兆祥);
- 人工元素嬗变的发现和发展(姚立澄)。

### 书刊评介

《高温超导》书评(杨国桢 聂玉昕)。

### 前沿和动态

- 我国自由电子激光研究的重大进展(杜祥琬);
- 类氟锆软X射线激光输出达到深度饱和(张国平等);
- 一种新型光折变材料问世(黄兴章);
- 著名科学家撰写《科学家谈物理》丛书面世(李士)。