

## 多波长钛宝石飞秒激光技术研究\*

王水才 肖东 朱长军 贺俊芳

(中国科学院西安光学精密机械研究所,瞬态光学国家重点实验室,西安 710068)

**摘要** 报道了一种新的交叉锁模多波长钛宝石飞秒激光器的设计原理.该激光器能够同步产生两列或三列飞秒光脉冲.持续期短到 25fs 的双波长脉冲调谐在 755—848nm 之间,同步精度约 10fs.三波长脉冲持续期小于 100fs,中心波长分别为 755nm,800nm 及 830nm.

**关键词** 多波长,飞秒激光器,量子理论

## MULTI-WAVELENGTH Ti:SAPPHIRE FEMTOSECOND LASER

Wang Shuicai Xiao Dong Zhu Changjun He Junfang

(State Key Lab. of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068)

**Abstract** We report on a novel design of a multi-wavelength Ti:sapphire femtosecond laser using a cross-mode-locking technique. This laser can synchronously generate two or three train of femtosecond pulses. The two-wavelength pulses have durations as short as 25fs tunable between 755nm to 848nm, and their synchronization precision is approximately 10fs. The three wave-length pulses of sub-100fs duration are generated at central wave lengths 755nm, 800nm and 830nm, respectively.

**Key words** multi-wavelength, femtosecond laser, quantum theory

## 1 引言

在 80 年代,我们进行超快时间分辨光谱学等有关超快过程研究时,采用皮秒( $10^{-12}$ s)或者飞秒( $10^{-15}$ s)激光光源,按照实验的要求,把一列固定波长或者可调谐波长的光脉冲分为两束,以便满足超快时间分辨泵浦-探测光谱学研究的需要.在有些实验中,需要泵浦光和探测光有各自独立调谐的波长,有人采用两台有独立调谐的皮秒激光器作为光源,其最大缺点是不能精确同步,大大地限制了谱仪的时间分辨率.后来有人用一台泵浦源同时泵浦两台超短

脉冲激光器,只能用电技术同步两列脉冲,其结构相当复杂,同步精度为数十皮秒量级(所谓同步精度是指双色脉冲间的相对跳动时间),这样,谱仪时间分辨率最高为数十皮秒.在这一时期,采用的飞秒时间分辨光谱学装置,多用固定波长光源,也有调谐单序列脉冲光源,泵浦光和探测光不是相同波长,就是其中之一是基波的倍频光.这些激光器的调谐性和同步精度都满足不了超快时间分辨光谱学及有关物理、化学、生命科学和它们的交叉前沿学科研究的需要.

\* “八五”国家攀登计划资助项目

1998-06-15 收到初稿,1998-08-21 修回

多波长钛宝石飞秒激光器是物理、化学、生命科学等学科以及相关交叉前沿学科等领域超快速动力学研究的最理想工具和手段。在泵浦-探测多激发态光谱学、程控飞秒化学反应动力学及选择性生化反应超快速过程等研究领域有着潜在的应用前景。一切物质都是由原子、分子组成的,原子或分子吸收光能之后,轨道电子就会从较低能量轨道激发到先前未被电子占据的较高能量轨道,被吸收的光子能量用于增加电子的能量。有时原子、分子受较强的飞秒激光照射之后,将处于更复杂的较高能量激发态。这些物质受瞬态激光辐射之后,通过泵浦-探测超快时间分辨光谱学等研究,就可得到该类物质的有关属性,甚至于也能了解到物质在激发态上的信息。近年来,希望用独立调谐的双波长飞秒激光研究光物理、光化学过程。光物理过程就是各激发态之间或各激发态与基态之间发生相互转化的跃迁,光化学过程就是分子由某一电子激发态生成不同于基态组成或组态的结构。绝大多数原子和分子的激发态有很多的子能级结构,就是说有很多更复杂的激发态。研究光致过程,了解光反应,必须进行反应动力学研究。很多光反应以明显的选择性进行,加之光与原子分子之间的相互作用取决于共振耦合,电子跃迁通常在  $0.1 \sim 10\text{fs}$  数量级发生,多波长可调谐飞秒激光就是很理想的研究工具和手段。像在光化学反应中,经常遇到具有不同键能的有机分子,由于电子激发能转为反应的核运动能量时,存在特定的机制,必须进行选择性光反应超快过程研究,才能了解其机制。在选择性生化反应研究中,利用多波长可调谐飞秒光脉冲分别作用于一个振动能级或电子能级而不触及附近能级是很方便的。在生物物理方面,由于生物物理上的大分子都有数百埃宽的电子吸收带,任何选择方法都必须依靠谐振振动激发,通常都是利用两个调谐超短光脉冲进行选择激发,而且脉冲同步范围要在振动弛豫时间之内。由于选择性生化反应中的选择激发空间定位要求在激发波长范围之内,采用可独立调谐双波长飞秒激光器是最好的方案。多波长飞秒激光

束可用于程控飞秒化学反应,探测在整个化学反应中的过渡态形成和中间阶段的核运动。在一反应物经过过渡态后直接或间接形成的化学反应中,利用双波长飞秒激光器的一路光脉冲泵浦产生中间态,当参与反应的分子核间距在一定范围内变化时,中间态的相干波包就以确定的周期来回运动,经数飞秒之后,加入控制飞秒光束。所以双波长可调谐飞秒激光器也是程控飞秒化学研究的有效工具和手段,如果控制更多的中间过程,多波长飞秒激光器就是最好的选择。90年代初,人们寻求高精度同步、且能独立调谐的双波长飞秒激光脉冲产生的方法。我们为了进行高等植物光合作用原初反应机理超快速动力学研究,把同步泵浦多波长飞秒激光器列入“八五”国家攀登计划飞秒激光技术与超快过程项目之中,开始了多波长钛宝石飞秒激光技术的研究。事实上,在这一期间,英、美等国正在开展双波长飞秒激光器研究<sup>[1,2]</sup>。

## 2 设计思想与实验结果

多波长钛宝石飞秒激光脉冲产生的方法不同于一般单波长序列飞秒激光,必须满足多路光束同时在激光腔内振荡,并且各路光束都通过同一块钛宝石晶体激光介质取得增益,实现交叉锁模,其激光谐振腔的基本结构见图1。这是我们实验上最好的一种腔型结构,是腔外分束与腔内棱镜弥散法相结合产生三波长激光的谐振腔。

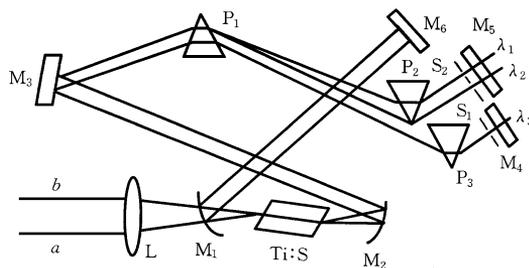


图1 多波长钛宝石飞秒激光器腔型结构

### 2.1 棱镜扩谱小孔分束双波长脉冲产生

当只有泵浦光束 a 时,由耦合透镜 L 将光束耦合进钛宝石晶体产生非线性自聚焦效应,

其发射激光由腔镜  $M_1$  及  $M_2$  组成的折叠腔收集,并反射至腔镜  $M_3$  及  $M_6$ ,从  $M_3$  反射的激光,由棱镜  $P_1$  弥散扩谱分光.由于棱镜材料的折射率和波长有关,同一入射角通过棱镜的光束,不同波长的光束将以不同的出射角射出,形成按波长大小分成的带状光束.该光束经棱镜  $P_2$ ,通过双狭缝  $S_2$ ,射到输出耦合器  $M_5$  上.由于  $M_1, M_2, M_3$  和  $M_6$  镀有波长为  $700-950\text{nm}$  的光的全反射膜,  $M_5$  镀有对波长为  $700-950\text{nm}$  的光有  $2\%$  的透过率的膜.所以  $M_1, M_2, M_3$  和  $M_6$  对入射来的光全反射,只有  $M_5$  对入射光有  $2\%$  的透过,其余全反射.  $M_1$  也是一块双色镜,除对  $700-950\text{nm}$  光有全反射而外,对由  $L$  耦合进来的泵浦氩激光有高的透过率.只要泵浦光达到激光阈值时,在激光介质钛宝石晶体处出现“硬孔”和“软孔”效应.硬孔效应提供了一种与强度有关的增益和损耗调制,软孔效应给出了泵浦光束与腔激光束之间的有效耦合.这种机制就是增益孔效应,实现了激光锁模.由于这是单光束泵浦,所以采用棱镜  $P_1$  扩谱展束,通过双狭缝  $S_2$  限模分束,如图 1 所示,其中  $\lambda_1$  为长波光脉冲,  $\lambda_2$  为短波光脉冲.当  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  双波长光脉冲通过钛宝石晶体时,光场发生交叉耦合,光脉冲相互作用.当  $S_2$  的两狭缝(限孔光阑)位置在带状光束之间调节不合适时,在钛宝石晶体中的自聚焦效应焦轴附近,较强的光脉冲就会得到较高的增益,较弱的光脉冲增益就很低,产生增益失衡.只能调节  $S_2$  的两个限孔光阑有合适的位置,使  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  双波长光脉冲在激光介质钛宝石晶体中每次抽运的光子数达到稳态平衡,才有稳定的双波长  $\lambda_1$  及  $\lambda_2$  飞秒光脉冲输出.在进行波长调谐时,先固定  $\lambda_1$  的狭缝位置,相对改变  $\lambda_2$  狭缝左右位移,就得到  $\lambda_2$  的相对波长调谐.

## 2.2 控制内腔弥散实现脉冲间同步

棱镜  $P_1$  和  $P_2$  除有内腔弥散补偿之外,还有双波长脉冲间的同步作用,双波长脉冲间的同步通过调节内腔弥散量来实现.如同用弥散补偿压缩光脉冲的持续期一样,合适的内腔弥散量能传播较快的光子变慢一些,使传播较

慢的光子变得快一些.但是,双波长飞秒脉冲间的同步只能在内腔弥散量有限的范围内实现,依赖于两个脉冲在钛宝石晶体中的重叠程度.按照以上机制进行激光调试,激光器就会发射出同步双波长飞秒激光脉冲.

## 2.3 腔外分束、腔内扩谱产生三波长飞秒激光

如果我们把另外一束泵浦光  $b$ ,通过  $L$  耦合进钛宝石晶体,并且  $a, b$  两束光在钛宝石晶体内定向交叉,  $b$  光束泵浦钛宝石晶体产生的激光在  $M_1, M_2, M_3, P_1, P_3, M_4$  和  $M_6$  构成的腔内振荡,调节棱镜  $P_1, P_2$  及  $P_3$  的距离,进行内腔弥散补偿.分别增加  $a, b$  两束泵浦光功率,进行适当的增益分配,确定  $a$  光及  $b$  光的泵浦功率,使腔内同时有三束激光脉冲传播.令  $b$  光泵浦产生的脉冲波长为  $\lambda_3$ ,并调试产生  $\lambda_3$  波长光脉冲的腔长与  $\lambda_1$  及  $\lambda_2$  波长光脉冲的腔长相等,这样就有波长  $\lambda_1, \lambda_2$  和  $\lambda_3$  的三束光脉冲同时交叉通过钛宝石晶体,发生交叉耦合,相互作用.由于掺钛蓝宝石的激光发射特性随波长而变,同样要进行增益分配,使三束光脉冲通过钛宝石晶体时,取得增益平衡.从锁模技术来考虑多波长光脉冲的成形机制,只有各列激光运转分别达到自聚焦锁模状态,将导致强的脉冲成形效应,稍许增加泵浦功率,平衡脉冲光场相互作用得失的能量,通过自相位调制,群速弥散补偿,就有多波长飞秒光脉冲射出.由于这种锁模出现在非线性自聚焦克尔效应状态,并且是在在综合平衡多波长脉冲交叉通过增益介质时导致的交叉耦合、自相位调制、群速弥散以及增益分配的基础上实现的,所以叫做交叉锁模.图 1 所示激光器实现三束激光交叉锁模,就会产生三波长飞秒激光.这里应指出,  $M_4$  与  $M_5$  膜系相同,  $S_1$  狭缝用于第三波长激光调谐.如果不采用  $b$  光束泵浦,仅用  $a$  光束,增加泵浦功率,使  $P_1$  及  $P_2$  棱镜扩谱分束的带状光束通过由两根细丝隔开而构成的狭缝(取代  $S_2$ )射到  $M_5$  上,同样可获得三波长飞秒激光脉冲.

## 2.4 定向分束控制增益竞争

实验表明,产生双波长可调谐的飞秒光脉

冲技术比较容易,而获得三波长运转的飞秒激光器技术难度很大,要求高精机械光学加工.当多波长飞秒激光器运转时,各脉冲在腔内来回传播,都交叉通过钛宝石晶体,脉冲之间都有相互作用,进行增益竞争.不论是腔外分束,还是腔内狭缝调谐分光,稍有增益分配不适当,将会导致较低增益的光脉冲消失在自己的传播通道中,成为单波长或双波长激光器运转状态.我们采用定向分束技术,平衡各波长脉冲增益,控制增益竞争,就是采用腔外分束,控制各泵浦光的功率、强度、模式及偏振态的变化,并且严格定向各泵浦光之间的夹角,这样做获得了很好的效果.为了获得双波长或三波长激光稳定输出,我们利用量子理论优化激光器动力学参数,研究双色脉冲成形动力学,进行增益分配,成功地解决了多波长飞秒激光器稳定运转的理论问题.

## 2.5 实验结果

当激光器运转在双波长输出状态,脉冲的持续期可短到 25fs,双波长脉冲调谐在 755—848nm 之间,双色脉冲间同步精度约 10fs.当激光器运转在三波长输出状态时,脉冲的持续期小于 100fs,中心波长分别为 755nm,800nm 和 830nm.我们对双波长、三波长、多波长钛宝石飞秒激光器的研究见参考文献 [3—7].

## 3 结束语

我们介绍了多波长钛宝石飞秒激光技术研究的基本情况,有关增益竞争动力学研究最近将有量子理论报道.多波长钛宝石飞秒激光器的锁模机理是很复杂的,交叉锁模基本上概括了该类飞秒激光器成形光脉冲的动力学过程.因而进行各路光脉冲持续期测量可以采用自相关函数法,但在测量各波长脉冲间的同步精度时,我们采用了强度相干自相关-互相关函数法.为了进一步扩展多波长钛宝石飞秒激光脉冲的应用领域,对多波长飞秒激光脉冲放大是很必要的.当各列脉冲能量能达到  $\mu$  级时,预料将会在物理、化学及其相关交叉学科研究中,获得更多的信息,发现更多的新现象.

## 参 考 文 献

- [1] J. M. Evans, D. E. Spence, D. Burns et al., *Optics Letters*, **18**(1993), 1074.
- [2] M. R. X. de Barros, P. C. Becker, *SPIE*, **2116**(1994), 37.
- [3] 王水才、肖东、杨建军等,中国激光, **A23**(1996), 295.
- [4] 王水才、肖东、杨建军等,激光技术, **20**(1996), 321.
- [5] Dong Xiao, Shuicai Wang, Jianjun Yang et al., *SPIE*, **2869**(1997), 533.
- [6] Shuicai Wang, Dong Xiao, Jianjun Yang et al., *SPIE*, **2869**(1997), 527.
- [7] 朱长军、王水才、肖东,光子学报, **27**(1998), 100.

# X 射线显微术\*

徐向东 付绍军 张允武

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室,合肥 230029)

**摘 要** 综述了 X 射线显微术的基本原理、成像模式和技术及其在生命科学、材料科学等方面应用的新进展,同时简述了 X 射线显微术应用过程中应注意的几个问题.

**关键词** X 射线显微术,水窗口,辐射损伤

\* 国家同步辐射实验室开放课题

1998 - 05 - 04 收到初稿,1998 - 06 - 29 修回