

# Gires-Tournois 干涉镜补偿色散的自启动 飞秒 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 激光器实验研究<sup>\*</sup>

周斌斌<sup>1)</sup> 张 炜<sup>1)</sup> 詹敏杰<sup>2)</sup> 魏志义<sup>1)†</sup>

1) 中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100080)

2) 北京大学物理学院, 北京 100871)

(2007 年 9 月 27 日收到, 2007 年 10 月 17 日收到修改稿)

利用一片 GTI 镜补偿腔内色散, 并使用宽带半导体可饱和吸收片, 实现了锁模自启动的飞秒  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  激光输出. 在 9 W 平均功率的 1030 nm 激光抽运下, 获得输出脉冲功率为 95 mW, 光谱半高全宽 45 nm, 中心波长 1508 nm, 实测脉冲宽度为 65 fs.

关键词: Gires-Tournois interferometer 镜,  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  激光, 飞秒脉冲, 自启动锁模

PACC: 4280W, 4260D

## 1. 引 言

在目前可用于克尔透镜锁模的几种固体激光介质中,  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体由于能够在 1.3  $\mu\text{m}$ —1.6  $\mu\text{m}$  波段产生可调谐的连续激光以及飞秒脉冲激光<sup>[1-3]</sup>, 正好覆盖了应用广泛的光通信波长及医用波长, 因此自 1988 年报道该晶体用作激光增益介质以来<sup>[4]</sup>,  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  激光器的研究便很快吸引了广泛的兴趣. 到目前为止, 国际上已经先后成功地采用主动锁模<sup>[5]</sup>、克尔透镜锁模<sup>[6-7]</sup>以及半导体可饱和吸收镜锁模<sup>[8-9]</sup>等不同技术实现了  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  激光的锁模运转, 并获得最短脉宽为 20 fs 的飞秒脉冲输出<sup>[10]</sup>. 虽然受激光晶体的限制, 国内该激光的研究起步较晚, 但最近几年, 基于应用需求, 有关单位也开展了一些飞秒  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  激光器的初步研究<sup>[11]</sup>.

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体与钛宝石晶体具有相似的上能级寿命与增益截面<sup>[12]</sup>, 但是由于该晶体中激活离子的掺杂浓度相比钛宝石晶体却要低得多, 并且晶体在振荡和抽运波段都存在激发态吸收, 因此,  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  激光器的增益密度要低于钛宝石激光器和其他一些常见固体激光器, 其输出对腔内损耗的敏感度较其他常见固体飞秒激光器都要敏感得多, 控制谐振腔

内的损耗对获得稳定高效的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  激光输出非常重要. 此外, 由于该晶体较低的增益密度, 实验中为获得足够的增益, 一般采用较长的晶体, 这使得锁模状态的启动与稳定变得尤为困难. 本文首先对不同长度和掺杂浓度  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体的激光输出特性进行了研究, 然后直接利用一种高反射率的 GTI (Gires-Tournois interferometer) 镜来取代传统的棱镜对, 对腔内的色散进行了有效补偿并避免了棱镜对所导致的腔内损耗, 同时引入一块半导体可饱和吸收镜启动并稳定锁模, 从而实现了一台结构简单、紧凑的自启动锁模的飞秒  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  激光器. 据我们所知, 这是目前国内首台采用无三棱镜结构补偿色散的锁模运行, 并且脉宽以及输出光谱等参数优于以前的报道.

## 2. 实验装置

我们的实验装置采用如图 1 所示的 X 型折叠腔结构, 其中  $M_1, M_2, M_3$  是曲率半径为 100 mm 的宽带双色凹面镜, 在 870—1050 nm 波段的透过率大于 98%, 而在 1420—1720 nm 波段的反射率大于 99.9%; GTI 镜在 1400—1700 nm 波段的反射率大于 99.85%, 同时在 1480—1530 nm 波段每次反射引入的二阶色散量为  $-500 \pm 50 \text{ fs}^2$ ; 实验中我们使用了

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 60490281, 60225005, 60621063)和中国科学院知识创新方向性项目(批准号: KJXC-SW-W14)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: zywei@aphy.iphy.ac.cn

两种宽带输出镜,一种在 1450—1550 nm 区间内的透过率小于 1.4%( $\text{OC}_1$ ),在 1500 nm 处的透过率为 0.9%,为区间内的最小值,另一种在 1450—1550 nm 波段的透过率为 1.5%( $\text{OC}_2$ ); $P_1, P_2, P_3$  是对 1030 nm 波长高反的抽运镜,抽运激光采用二极管激光抽运的薄片  $\text{Yb}:\text{YAG}$  连续激光(德国 ELS 公司),其输出 1030 nm 波长的水平线偏振光通过焦距为 100 mm 的凸透镜  $F$  会聚到激光晶体中,以提供增益,实现粒子数反转.我们分别比较研究了  $\phi 5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  和  $\phi 5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  两种尺寸的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体的激光特性,其中较短的晶体掺杂浓度较高,晶体均采用布儒斯特角切割,实验中测得 20 mm 的晶体对 1030 nm 抽运光的吸收率为 90%,对应吸收系数  $1.2 \text{ cm}^{-1}$ ,10 mm 的晶体对 1030 nm 抽运光的吸收率为 80%,对应吸收系数  $1.6 \text{ cm}^{-1}$ .为了有效冷却晶体,我们用铝箔侧面包裹激光棒后,将其夹持于紫铜冷却片内,实验过程中使用循环水系统对紫铜晶体架冷却,间接达到冷却晶体的目的,将其表面温度维持在  $10^\circ\text{C}$  左右.为补偿增益介质引入的像散,对 20 mm 晶体,折叠腔像散补偿折叠角设置为  $16^\circ$ ,对 10 mm 晶体,则使用  $11^\circ$  的折叠角.

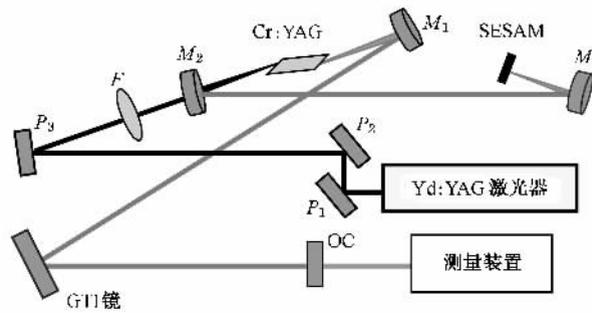


图 1 自启动锁模  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  振荡器所用实验装置

### 3. 连续激光运行特性

为了方便获得激光运行,我们首先用一片高反镜代替图 1 中的凹面镜  $M_3$  及 SESAM,取走输出臂内的 GTI 镜,通过简单的四镜腔结构来观察  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  连续激光的运转特性.鉴于实验所用抽运激光以及晶体荧光都处于红外波段,我们使用一台 Hamamatsu C2741 型红外相机来辅助进行激光腔调节.分别采用 10 mm 及 20 mm 增益晶体,并使用不同透过率的输出镜时,连续  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  激光的输出特性如图 2 所示.当抽运功率为 9 W,采用  $\text{OC}_2$  作为输出

镜时,用 10 mm 的晶体所得到的输出功率为 320 mW,20 mm 晶体的输出功率为 746 mW.当采用输出镜  $\text{OC}_1$  时,10 mm 晶体的最大输出功率为 240 mW,20 mm 晶体的最大输出功率为 460 mW.再将谐振腔由简单的四镜腔恢复至如图 1 所示的自锁模光路结构,首先尝试使用 10 mm 晶体,采用透过率较低的输出镜  $\text{OC}_1$ ,此时最大输出功率在 60 mW 左右,但是始终无法得到锁模信号,可见虽然掺杂浓度较高,但 10 mm 长度的晶体仍然无法达到启动锁模所需的增益强度.因此锁模实验中我们采用 20 mm 的晶体.

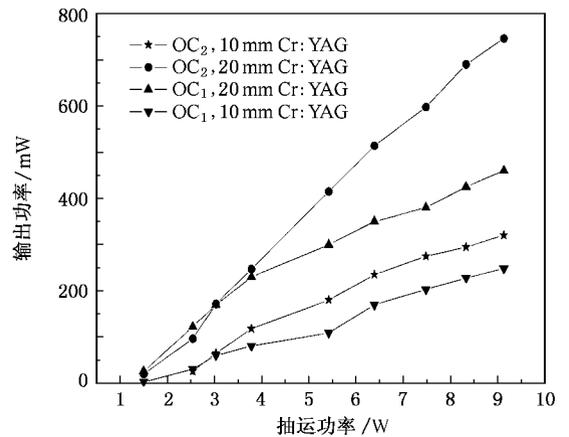


图 2 连续  $\text{Cr}:\text{YAG}$  激光输出情况

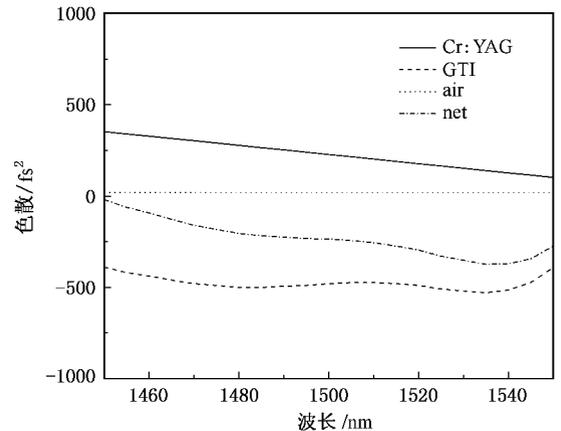


图 3 腔内色散分析

### 4. 腔内色散分析及锁模激光输出结果

为获得优化的锁模运转,就需要对谐振腔内的色散进行控制和补偿.对于 20 mm 的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体,在 1500 nm 波段产生的二阶色散(单程)为  $226.8 \text{ fs}^2$ <sup>[6]</sup>;1450—1550 nm 波段的光波在 GTI 镜表面每反射一次将被引入  $-500 \text{ fs}^2$  的二阶色散,同时,光波

在空气中的传播也将引入色散,在 1500 nm 波段光波在空气中每传播 1 m 所引入的二阶色散量为  $11 \text{ fs}^2$ <sup>[13]</sup>.通过改变谐振腔内光束在 GTI 镜表面的反射次数,便可以对腔内的净色散值进行调整.图 3 表示当光波在 GTI 镜表面反射一次时,谐振腔内的色散情况,此时腔内净色散值在  $-230 \text{ fs}^2$  左右;当谐振腔内光波在 GTI 镜表面反射两次时,腔内净色散值在  $-720 \text{ fs}^2$  左右.虽然采用该色散补偿方式无法像使用棱镜对那样对腔内色散进行精确补偿,但该方法能够有效避免腔内插入棱镜对所引入的腔内损耗,并且使谐振腔结构更为简单、紧凑,可支持高重复频率的脉冲输出.

我们首先用一片 1500 nm 的宽带高反镜代替 SESAM,对谐振腔进行重新优化,在抽运光功率为 9 W 时,得到连续光功率 210 mW.然后再换回 SESAM,仔细调节凹面镜  $M_3$  同 SESAM 之间的距离以及凹面镜  $M_1, M_2$  同晶体之间的距离,得到了稳定的自启动锁模脉冲输出,相应的输出脉冲功率为

95 mW.脉冲重复频率为 123.3 MHz,锁模之后的激光光谱如图 4(a)中的实线所示,其光谱半高全宽为 45 nm,中心波长 1508 nm,对应转换极限脉冲宽度为 53.4 fs.然后在谐振腔内的色散补偿臂加入一面宽带高反镜,使腔内激光在 GTI 镜表面反射两次,腔内的净色散量变至  $-720 \text{ fs}^2$  左右,在该情况下对谐振腔进行仔细调节后,同样获得了锁模脉冲输出,输出光谱如图 4(a)中的虚线所示,半高全宽为 34.5 nm.我们利用自行搭建的干涉自相关来测量锁模脉冲序列的脉宽,图 4(b)是输出光谱半高宽为 45 nm 时所测得的干涉自相关曲线,假设光脉冲的形状为双曲正割型,则实际的脉冲宽度为 65 fs.所得脉冲的时间-带宽积  $\Delta\nu\Delta\tau = 0.383$ ,与转换极限值偏差为 21%,偏差的存在同谐振腔内存有较大的净色散量有关.此外没有补偿的高阶色散对脉宽也有着显著的影响,图 4(b)的自相关曲线中两边的基座也是色散补偿不完全的反应.

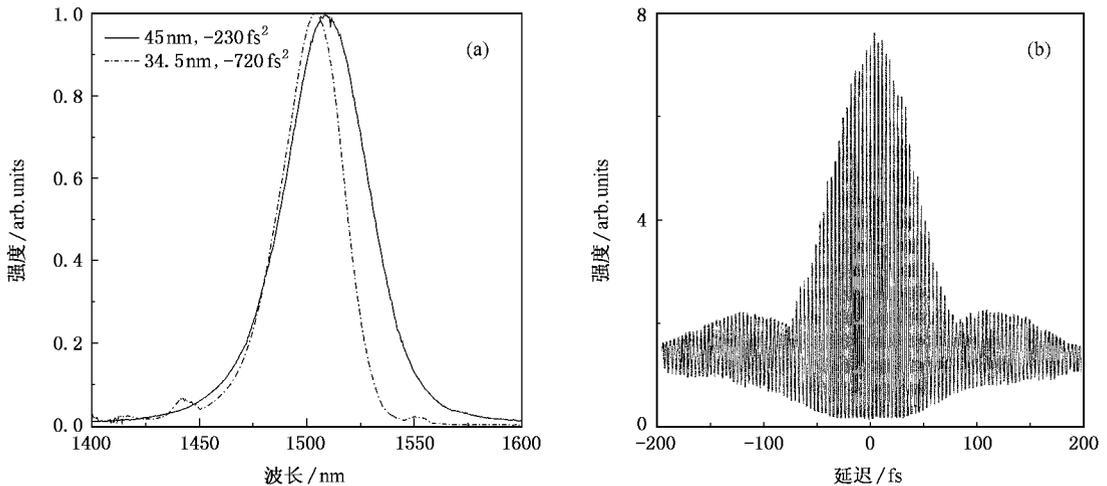


图 4 (a) 输出飞秒脉冲光谱 (b) 所测得的干涉自相关曲线

## 5. 结 论

综上所述,我们通过采用两块不同长度和掺杂浓度的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体,比较研究了在 1030 nm 波长  $\text{Yb}:\text{YAG}$  激光抽运下的连续激光输出特性,在此基础上应用一片高反射率的 GTI 反射镜补偿腔内色散,并结合使用半导体可饱和吸收镜,成功实现了自启动锁模的飞秒脉冲  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  激光输出.在 9 W 的抽运光功率下,所得到的输出脉冲光谱半高宽为 45 nm,测得的对应脉冲宽度为 65 fs,锁模输出功率 95

mW.与传统的棱镜对补偿色散相比,本工作有效地避免了棱镜对在谐振腔内导致的损耗,并且使谐振腔结构更加简单、紧凑,可支持小型化以及高重复频率的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  激光振荡器.据我们所知,这是目前国内首次采用无三棱镜结构补偿色散的研究结果,并且脉宽以及光谱等参数优于此前的报道,可望在超快光纤通信、时间分辨光谱学以及高速光子学等领域中得到应用.

感谢张志刚教授及日本 Kenji Torizuka 博士、Yohei Kobayashi 博士在 SESAM 制作中提供的帮助.

- [ 1 ] Shestakov A V , Borodin N I , Zhitnyuk V A , Ohrimchyuk A G , Gapontsev V P 1992 *Conference on Lasers and Electro-Optics* Vol. 12 of 1992 *OSA Technical Digest* ( Optical Society of America , Washington , D. C. , 1992 ) paper CTu12
- [ 2 ] French P M W , Rizvi N H , Taylor J R , Shestakov A V 1993 *Opt. Lett.* **18** 39
- [ 3 ] Tong Y P , French P M W , Taylor J R , Fujimoto J G 1997 *Opt. Commun.* **136** 235
- [ 4 ] Angert N B , Borodin N I , Garmash V M , Zhitnyuk V A , Okhrimchuk A G , Siyuchenko O G , Shestakov A V 1988 *Sov. J. Quantum Electronics.* **18** 73
- [ 5 ] Sennaroglu A , Pollock C R , Nathel H 1994 *Opt. Lett.* **19** 390
- [ 6 ] Ishida Y , Naganuma K 1994 *Opt. Lett.* **19** 2003
- [ 7 ] Tong Y P , Sutherland J M , French P M W , Taylor J R , Shestakov A V , Chai B H T 1996 *Opt. Lett.* **21** 644
- [ 8 ] Zhang Z , Nakagawa T , Torizuka K , Sugaya T , Kobayashi K 1999 *Opt. Lett.* **24** 1768
- [ 9 ] Naumov S , Sorokin E , Kalashnikov V L , Tempea G , Sorokina I T 2003 *Appl. Phys. B* **76** 1
- [ 10 ] Ripin D J , Chudoba C , Gopinath J T , Fujimoto J G , Ippen E P , Morgner U , Kartner F X , Scheuer V , Angelow G , Tschudi T 2002 *Opt. Lett.* **27** 61
- [ 11 ] Song L J , Pei W H , Song Y R , Zhou G S 2003 *Acta Phot. Sin.* **32** 1163 ( in Chinese ) [ 宋丽军、裴为华、宋晏容、周国生 2003 光子学报 **32** 1163 ]
- [ 12 ] Okhrimchuk A G , Shestakov A V 1994 *Opt. Mater.* **3** 1
- [ 13 ] Edson R P , Kaye R 1972 *J. Opt. Soc. Am.* **62** 958

## Self-starting mode-locked $\text{Cr}^{4+}$ :YAG laser with Gires-Tournois interferometer mirror for dispersion compensation \*

Zhou Bin-Bin<sup>1)</sup> Zhang Wei<sup>1)</sup> Zhan Min-Jie<sup>2)</sup> Wei Zhi-Yi<sup>1)</sup>†

1) ( Laboratory of Optical Physics , Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics , Beijing 100080 , China )

2) ( College of Physics , Peking University , Beijing 100871 , China )

( Received 27 September 2007 ; revised manuscript received 17 October 2007 )

### Abstract

A self-starting mode-locked  $\text{Cr}^{4+}$  :YAG laser is reported , which incorporates a broadband SESAM and uses a piece of GTI mirror to compensate the intra-cavity group-delay dispersion. 65-fs pulses are generated at an average power of 95 mW with a 45 nm spectral bandwidth centered at 1508 nm under the pump power of 9 W.

**Keywords** : Gires-Tournois interferometer mirror ,  $\text{Cr}^{4+}$  :YAG laser , femtosecond laser pulse , self-starting mode-lock

**PACC** : 4280W , 4260D

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60490281 , 60225005 , 60621063 ) and the Chinese Academy of Sciences for Topics in Innovation Engineering ( KJJC - SW - W14 ).

† E-mail : zywei@aphy. iphy. ac. cn