

# 时间-色散调谐同步泵浦光纤激光器研究\*

陈国夫 胡 魏 刘东峰 王贤华 侯 润

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

**摘要** 利用时间-色散调谐技术在同步泵浦光纤环形激光器中实现了  $1.395\mu\text{m}$  附近  $47\text{nm}$  的波长调谐。由于采用  $1.313\mu\text{m}$  的 Nd:YLF 锁模脉冲泵浦, 其 Raman 光处于单模光纤的负色散区, 利用孤子效应得到  $195\text{fs}$  的光脉冲。

**关键词** 时间-色散调谐 同步泵浦 飞秒 孤子效应

普通激光器的波长调谐是在激光腔中引入棱镜、光栅等色散元件, 使得对特定波长形成高 Q 值腔, 达到波长调谐的目的。而色散元件的插入导致腔内损耗的增加, 并且会影响激光器的输出模式和光束质量。时间-色散调谐技术则是利用激光增益介质本身的色散以及同步泵浦对腔长的严格要求实现波长调谐的。这一技术不需要附加专门的调谐元件, 尤其适用于具有长增益介质的光纤 Raman 激光器。同时在光纤的负色散区, 自相位调制(SPM)和群速度弥散相互作用的结果形成孤子效应, 可使输出光脉冲达到  $100\text{fs}$  量级。我们利用  $1.313\mu\text{m}$  的 Nd:YLF 锁模脉冲泵浦, 在  $1.395\mu\text{m}$  附近得到  $47\text{nm}$  的波长调谐, 最短光脉冲达  $195\text{fs}$ 。

## 1 原理

图 1 是一个典型的同步泵浦激光器的原理示意图。泵浦源脉冲序列的时间间隔为  $T_p$ , 工作腔的腔长为  $L$ , 增益介质的折射率为  $n$ , 其输出脉冲的时间间隔为  $T = nL/c$ ,  $c$  是真空中光

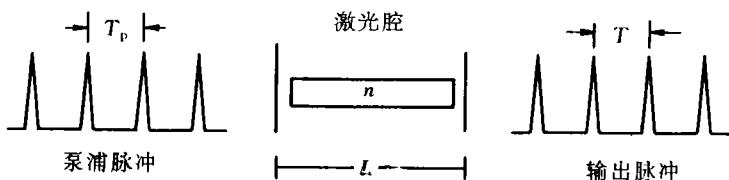


图 1 同步泵浦激光器的原理图

速(普通线性腔为  $T = 2nL/c$ )。这里对激光腔的结构进行了简化, 认为激光增益介质充满整个激光腔。对于光纤激光器这种近似是可行的。同步泵浦时要求新产生的脉冲在腔内经一个循环后与下一个泵浦脉冲准确地同步, 即要求  $T$  是  $T_p$  的整数倍,  $T = NT_p$ 。一般同步泵浦激光

1996-02-26 收稿

\* 国家自然科学基金资助项目

器中  $N$  是 1 或 2, 因而必需精确调整腔长。在光纤激光器中  $L$  很大, 增益介质色散所引起的  $n$  的微小变化即可显著改变  $T$  的值, 从而达到同步的要求。当光纤激光器的腔长改变引起同步失败时, 其输出波长会随之改变。由于色散的作用, 波长改变引起的 Raman 光在光纤中传输时间的变化正好补偿腔长的改变。这时调节腔长  $L$ , 就可以达到波长调谐的目的, 称为时间-色散调谐技术<sup>[1]</sup>。

在单模石英光纤中, 激光以基模  $HE_{11}$  模式传输, 传播常数  $\beta$  对应非波导情况下的折射率  $n$ 。我们引入

$$\beta_1 = \frac{d\beta}{d\omega} = \frac{1}{v_g},$$

$$d_{12} = \beta_1(\lambda_1) - \beta_1(\lambda_2) = v_g^{-1}(\lambda_1) - v_g^{-1}(\lambda_2),$$

其中  $\beta_1$  是波导中群速度  $v_g$  的倒数, 常用单位是 ps/m。 $d_{12}$  表示由于色散引起的两波长光之间的群速度失配, 称为走离系数。经过  $L$  长的光纤后, 不同波长的两光脉冲之间在时间上分开了  $\Delta t = Ld_{12}$ 。当腔长改变  $\Delta L = \Delta t c = Lcd_{12}$  时, 波长的改变  $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$  可以精确地补偿脉冲时间上的失配, 因而称之为时间-色散调谐。我们引入常用的色散参数  $D(\lambda)$   
 $= \frac{d\beta_1}{d\lambda} \approx \frac{d_{12}}{\Delta\lambda}$ , 则调谐率可以表示为  $\frac{\Delta\lambda}{\Delta L} = \frac{1}{cL + D(\lambda)}$ , 或  $\frac{\Delta\lambda}{\Delta t} = \frac{1}{L + D(\lambda)}$ 。图 2 中给出了我们所用单模光纤的色散  $D(\lambda)$  和相对于泵浦光  $\lambda_2 = 1.313\mu\text{m}$  的走离系数。

在  $\lambda_d = 1.305\mu\text{m}$  处色散  $D(\lambda)$  由负值变成正值, 即由正常色散变为反常色散,  $\lambda_d$  就是零色散波长。在反常色散区, 自相位调制(SPM)和交叉相位调制(XPM)与光纤反常色散相互作用的结果形成孤子<sup>[2]</sup>, 孤子效应使 Raman 光的脉冲宽度变窄。Raman 效应的增益带宽约有 13THz, 因而可以形成小于 100fs 的飞秒级光脉冲。

## 2 实验装置

我们采用一台 Quantronix 公司的 Nd: YLF (Model 4216d) 激光器泵浦光纤环形激光器, 实验装置如图 3。Nd: YLF 激光器的输出波长为  $1.313\mu\text{m}$ , 采用声光调制主动锁模, 输出脉宽约 50ps, 重复率为 76MHz, DM 是一枚双色镜, 对  $\lambda_p = 1.313\mu\text{m}$  波长全反 ( $R > 90\%$ ); 对  $\lambda = 1.39\mu\text{m}$ ,  $T > 50\%$ ; 对  $\lambda = 1.40\mu\text{m}$ ,  $T > 80\%$ , L1 和 L2 是 25 倍耦合物镜, 耦合效率在 20%~30% 左右。M1, M2 和 M3 镀金反射镜,  $R > 96\%$ 。M1 和 M2 组成延迟线, 用于

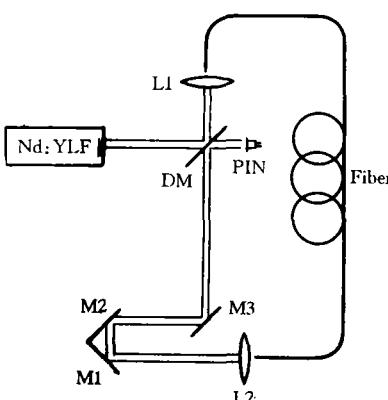


图 3 同步泵浦光纤环形激光器的实验装置

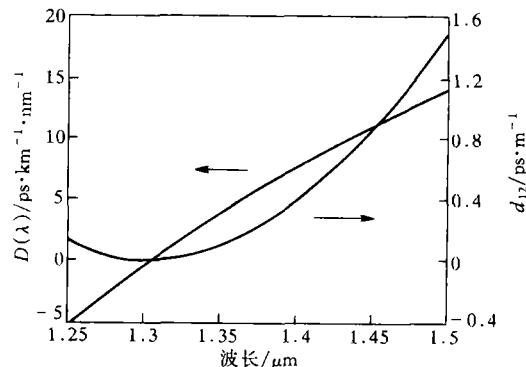


图 2 单模光纤的色散和相对于泵浦光  $\lambda_2 = 1.313\mu\text{m}$  的走离系数

同步和调谐。Raman 光从光纤出来经 L2 准直，延迟后穿过 DM 反馈回光纤，其中一部分被 DM 反射作为输出。PIN 用来监测同步情况的，并作为粗调的依据。利用一台 1m 的光栅单色仪测量输出光的光谱。用自己搭建的二次谐波强度自相关仪测量脉冲宽度。

测试中使用的单模光纤是西安西古公司无偿提供的普通通讯用单模石英光纤。其零色散波长为  $1.305\mu\text{m}$ ，芯径约为  $9.5\mu\text{m}$ ，截止波长是  $1.2\mu\text{m}$ ，在  $1.3\mu\text{m}$  处的损耗小于  $0.5\text{dB/km}$ 。图 2 中所示色散参数  $D$  是西古公司对此批光纤车间检验的平均结果，走离参数是根据色散  $D$  计算的结果。实验中使用的光纤长度为 300m、500m 和 1.3km。

### 3 结果

我们首先测量了环形腔和单通式两种情况下的输出光谱，并结合 PIN 的探测结果来确定是否达到同步。在图 4 中给出了光谱的结果，其中光纤长 1.3km，光纤内的泵浦功率为 300mW。

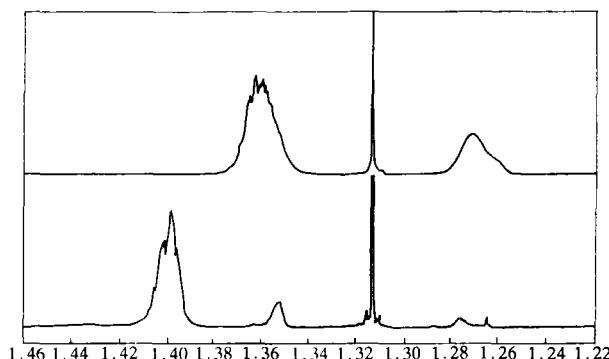


图 4 环形腔(下)和单通式(上)两种情况下的输出光谱  
线改变腔长，就可以实现调谐了。

图 5 中给出了腔长变化和调谐波长的关系。腔长的变化量已经换算成时间，其零点的选择是这样的：当泵浦光经过光纤及延迟线等，与下一个泵浦脉冲正好同步，这时的腔长定为调谐的零点。这样，调谐到某一波长的腔长变化量，就是该波长光脉冲与泵浦脉冲之间的走离时间。图中实线就是由图 2 中走离参数计算所得，在 1.3km 长光纤中的走离时间。在中间一段两者是一致的。在增益带宽的两端，腔长的改变已不能调谐波长。在这两个区域，时间上的并没有准确同步，只是由于泵浦脉冲有 50ps 的宽度，因而反馈光仍然能作为种子脉冲被放大。随着不同步的增大，其功率也急剧下降直至消失。在较弱的泵浦功率下(约 300mW)，调谐范围从  $1.386\mu\text{m}$  至  $1.403\mu\text{m}$  约 17nm(图中圆形所示)。在较高的泵浦功率下(约 400mW)，调谐范围延伸到  $1.433\mu\text{m}$ ，总的调谐范围有 47nm，(图中方形)

3 在单通情况下(图 4 上)，泵浦光两侧有  $1.365\mu\text{m}$  和  $1.265\mu\text{m}$  的光发射，是调制不稳定性和四波混频的作用结果<sup>[3]</sup>，Raman 光的波长应在  $1.396\mu\text{m}$  处( $440\text{cm}^{-1}$  的频移)，由于未达到泵浦阈值，所以没有观测到。当同步泵浦时(图 4 下)， $1.365\mu\text{m}$  和  $1.265\mu\text{m}$  的光变弱，而在  $1.396\mu\text{m}$  处产生 Raman 光。调节 M3 可以调节反馈光的大小，Raman 光的强度也随着改变，从而肯定同步泵浦的条件得到满足，这时调节延迟

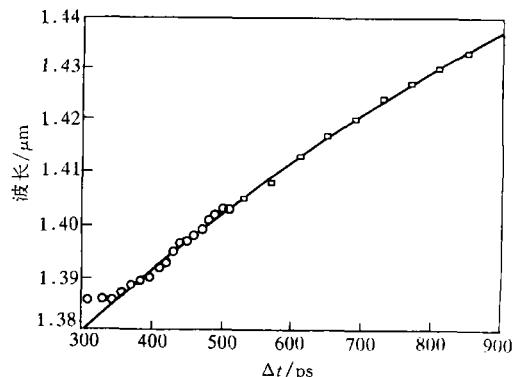


图 5 同步泵浦光纤环形激光器的波长调谐  
反馈光仍然能作为种子脉冲被放大。随着不同步的增大，其功率也急剧下降直至消失。在较弱的泵浦功率下(约 300mW)，调谐范围从  $1.386\mu\text{m}$  至  $1.403\mu\text{m}$  约 17nm(图中圆形所示)。在较高的泵浦功率下(约 400mW)，调谐范围延伸到  $1.433\mu\text{m}$ ，总的调谐范围有 47nm，(图中方形)

所示). 在  $\lambda_d = 1.395\mu\text{m}$  处色散  $D(\lambda) = 7.19\text{ps}/\text{km}\cdot\text{nm}$ , 对  $L = 1.3\text{km}$  调谐率为  $\frac{\Delta\lambda}{\Delta L} = 3.57\text{nm/cm}$ , 或  $\frac{\Delta\lambda}{\Delta t} = 0.107\text{nm}/\text{ps}$ . 实测为  $3.67\text{nm/cm}$  和  $0.11\text{nm}/\text{ps}$ , 结果是相符的.

当用腔长调谐时, 功率的变化并不明显. 由于光纤耦合对光路的改变非常敏感, 当调节延迟线时, 通过 L1 耦合进光纤的反馈光的耦合效率降低很多, 一般需微调 M3 以调节反馈量. 由于反馈量无法精确地测量和控制, 对输出功率随调谐的变化的测量结果十分分散. 总的规律是调谐到长波长时输出功率较高, 在调谐范围两端的输出功率急剧下降. 如前所述, 在调谐范围两端是由于不能准确同步引起的功率下降. 在长波长处输出功率较高是由于双色镜 DM 引起的. 由于镀膜技术的限制, 为了保证双色镜 DM 在  $\lambda_p = 1.313\mu\text{m}$  全反 ( $R > 90\%$ ); 其在  $1.39\mu\text{m}$  至  $1.40\mu\text{m}$  的透过率就无法做到很大, 大约从 50% 到 80% 变化, 波长越长透过率就越大. 因而使调谐到长波长处时的腔内损耗小, 输出功率高. 总的来说, 波长的调谐对输出的影响并不大, 一般输出都在几十毫瓦左右.

Raman 光的光谱宽度约有  $12\text{nm}$ , 理论上可以支持  $100\text{fs}$  左右的脉冲. 实验中测量到的最好结果为  $195\text{fs}$ , 图 6 中是利用自建的二次谐波强度自相关仪测量到的自相关曲线. 图中的曲线是在  $300\text{m}$  长光纤,  $300\text{mW}$  泵浦功率时记录的, 并经过了光滑处理. 对应半极大处的延迟  $301\text{fs}$ , 为双曲正割波形, 应除以 1.543 的比例系数, 实际脉冲宽度是  $195\text{fs}$ .

## 4 讨论

我们利用时间-色散调谐技术在同步泵浦光纤环形激光器中实现了  $1.395\mu\text{m}$  附近  $47\text{nm}$  的波长调谐, 并利用光纤负色散区的孤子效应获得小于  $200\text{fs}$  的光脉冲. 这一技术的最大优点是简单. 不利用附加元件, 直接利用时间-色散调谐技术实现调谐, 利用孤子效应得到短脉冲, 可同时实现同步泵浦与调谐. 因为存在一定调谐范围, 同步泵浦的调节比较容易, 输出稳定. 其局限是必须有很长的增益介质, 也就是最适用于光纤激光器.

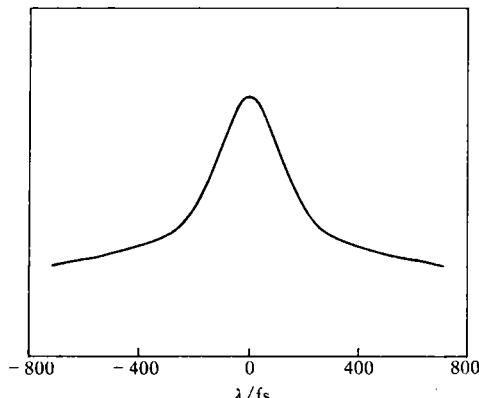


图 6 实验测量到的强度自相关曲线

## 参 考 文 献

- 1 Zysset B, Beaud P, Hodel W. Generation of optical solitons in the wavelength region  $1.37\sim 1.49\mu\text{m}$ . *Appl Phys Lett*, 1987, 50(6): 1027
- 2 Gouveia A S, Gomes A S, Talor J R. Femtosecond Soliton Raman Generation. *IEEE J Quantum Electron*, 1988, QE-24 (2): 332
- 3 Tai K, Haaegawa A, Tomita A. Observation of modulational instability in optical fibers. *Phys Rev Lett*, 1986, 56(1): 135