

# 自注入减小增益开关分布反馈激光器时间抖动的数值模拟\*

王徐芳 姚敏玉 徐磊 张剑锋 陈明华 高以智

(清华大学集成光电子学国家重点实验室,北京 100084)

(1999 年 4 月 21 日收到;1999 年 7 月 18 日收到修改稿)

对光自注入法减小增益开关分布反馈激光器时间抖动进行了数值模拟,计算得到了自注入光脉冲强度一定的情况下,自注入光脉冲延迟时间与时间抖动的关系曲线,以及自注入光脉冲延迟时间一定的情况下,自注入光脉冲强度与时间抖动的关系曲线,得到了自注入光脉冲消除抖动的窗口及自注入光脉冲强度范围(0.1%—5%)的两个结论,与实验结果取得很好的一致。

PACC: 4280S; 4272

## 1 引 言

增益开关分布反馈(DFB)激光器是光时分复用(OTDM)系统中重要的光源之一。它利用 DFB 激光器在高速光调制下的弛豫振荡的第一个脉冲产生超短光脉冲。由于这种光脉冲是在自发辐射的基础上建立起来的,自发辐射将造成光脉冲产生时间的随机性,从而导致光脉冲时间抖动。光脉冲的时间抖动将直接影响光通信系统的误码特性,限制系统传输速率的提高。

目前,减小时间抖动主要采用光外注入<sup>[1]</sup>和光自注入<sup>[2,3]</sup>两种方法。光外注入是利用另一个与发射源波长相匹配的激光器发出的光进行注入,光自注入是将发射源自身发出光的一部分反馈回发射源,其共同点是均利用注入光抑制自发辐射,造成光脉冲建立时光子数的波动来减小光脉冲的时间抖动,而后者具有结构简单、无需外加光源和成本低等优点。本文建立了光自注入法减小增益开关 DFB 激光器时间抖动的物理模型,采用包含光反馈与 Langevin 噪声项的单模速率方程<sup>[4]</sup>对光自注入进行数值模拟,研究自注入光脉冲反馈延迟与时间抖动及自注入光脉冲强度与时间抖动的关系。

## 2 理论模型

光自注入法减小增益开关 DFB 激光器时间抖动的实验装置<sup>[3]</sup>如图 1 所示,采用光纤环路反射镜将发射源的一部分光反射回去,通过调节 PC 可以改变注入光强的大小,采用光纤拉伸器(stretcher)调节自注入光脉冲的延迟时间  $\tau_s$ 。计算中将这种光自注入法用如图 2 所示的长外腔激光器模型(改变反射镜的倾角,即可改变反馈光强,  $R_s$  为自注入光

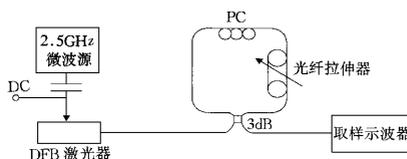


图 1 光自注入法减小增益开关 DFB 激光器时间抖动的实验装置

反射率)来处理。采用了包含光反馈与 Langevin 噪声项的单模速率方程<sup>[4]</sup>对光自注入进行模拟,并假设自注入光脉冲与增益开关 DFB 激光器出射的光脉冲具有相同的偏振态。增益开关 DFB 激光器采用 2.5 GHz 的微波正弦信号驱动  $I(t) = I_b + I_p \sin(\omega_m t)$ 。

\* 国家自然科学基金(批准号 69682009 和 69738010)资助的课题。

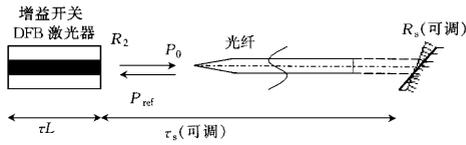


图 2 光自注入法减小增益开关 DFB 激光器时间抖动的理论模型简图

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{K(t)}{eV} - \frac{n}{\tau_{sp}} - SG_n(n - n_t) \cdot (1 - \epsilon S) + F_n(t), \quad (1)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{\gamma n \Gamma}{\tau_{sp}} - \frac{S}{\tau_{ph}} + SG_n(n - n_t) \Gamma (1 - \epsilon S) + k_c \sqrt{S} \sqrt{S(t - \tau_s)} \cos(\Delta(t)) + F_s(t), \quad (2)$$

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{\alpha}{2} G_n(n - n_0) \Gamma - k_c \frac{\sqrt{S(t - \tau_s)}}{\sqrt{S}} \cdot \sin(\Delta(t)) + F_\phi(t), \quad (3)$$

其中

$$\Delta(t) = \omega_0 \tau_s + \phi(t) - \phi(t - \tau_s), \quad (4)$$

且

$$k_c = \frac{(1 - R_2) \sqrt{R_3} \eta}{\sqrt{R_2} \tau_1}. \quad (5)$$

(1)–(3) 式分别为载流子密度、光子密度和电场相位的速率方程。(2) 式等号右边第四项和(3) 式等号右边第二项为光自注入项。式中其他参量的物理意义列于表 1。方程中 Langevin 噪声项分别表示为

表 1 计算所用参量物理意义

符号	物理意义	符号	物理意义
$V$	有源区体积	$\tau_{ph}$	光子寿命
$\tau_{sp}$	载流子自发辐射寿命	$\alpha$	线宽增强因子
$G_n$	微分增益	$n_0$	透明载流子密度
$n_t$	阈值载流子密度	$\omega_0$	光波角频率
$\epsilon$	增益饱和参量	$R_2$	激光器端面反射率
$\gamma$	自发辐射因子	$\eta$	激光器与光纤的耦合效率
$\Gamma$	光场限制因子	$\tau_1$	激光器谐振腔往返时间

$$F_n(t) = -\sqrt{\frac{2S(t_i)\gamma n \Gamma}{\tau_{sp} \Delta t}} x_s + \sqrt{\frac{2n(t_i)}{\tau_{sp} \Delta t V}} x_n, \quad (6)$$

$$F_s(t) = \sqrt{\frac{2S(t_i)\gamma n \Gamma}{\tau_{sp} \Delta t}} x_s, \quad (7)$$

$$F_\phi(t) = \frac{1}{S(t)} \sqrt{\frac{2S(t_i)\gamma n \Gamma}{\tau_{sp} \Delta t}} x_\phi, \quad (8)$$

$$x_s = x_1 \cos(\phi_0(t_i)) + x_2 \sin(\phi_0(t_i)), \quad (9)$$

$$x_\phi = x_2 \cos(\phi_0(t_i)) - x_1 \sin(\phi_0(t_i)), \quad (10)$$

其中  $\Delta t$  为 Langevin 噪声应用的时间间隔。 $S(t_i)$  为时间间隔  $\Delta t$  开始时光子密度,  $n(t_i)$  为时间间隔  $\Delta t$  开始时的载流子密度,  $\phi(t_i)$  为时间间隔  $\Delta t$  开始时的相位,  $x_n$ ,  $x_s$  和  $x_\phi$  为高斯分布随机变量, 其平均值为零, 均方值为 1。

速率方程组采用龙格-库塔法求解。时间抖动定义为接通延迟时间的标准偏差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - t_0)^2}{N - 1}}, \quad (11)$$

其中  $t_0$  为接通延迟时间的平均值,  $t_i$  为第  $i$  次接通延迟时间。为了尽量减小随机性对计算结果的影响,  $N$  取值 100。

### 3 数值模拟结果与分析

未加光自注入项情况下对增益开关 DFB 激光器输出光脉冲时间抖动模拟表明, 偏置电流  $I_b$  对光脉冲的时间抖动有抑制作用。随  $I_b$  的增大, 光脉冲时间抖动有所减小, 但在理论模拟和实验中均观察到此时光脉冲形状恶化, 脉冲前沿变陡, 后沿变缓, 对称性变差, 脉冲有所展宽。下面的数值模拟是在  $I_b$  一定情况下 ( $I_b = 2.2 I_{th}$ ,  $I_p = 5 I_{th}$ ) 进行的。

通过上述方程组的计算得到的无光自注入和光

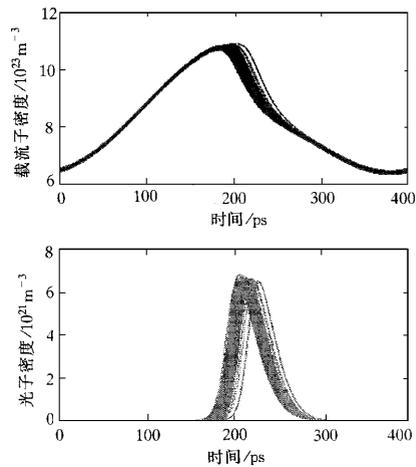


图 3 模拟得到的无光自注入情况下增益开关 DFB 激光器输出的光脉冲 抖动时间为 4.79 ps

自注入将时间抖动减小到最小值时,增益开关DFB激光器产生的光脉冲分别如图3和图4所示(图中的曲线自上而下依次是载流子浓度随时间的变化曲线和光子密度随时间的变化曲线)。可以清楚地看到,采用光自注入法后增益开关DFB激光器的时间抖动明显减小。光自注入减小增益开关DFB激光器光脉冲时间抖动的效果决定于自注入光脉冲的延迟时间及注入光强。

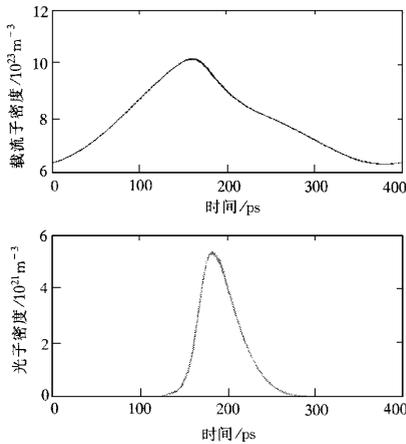


图4 模拟得到的光自注入法将时间抖动减小到最小情况下增益开关DFB激光器输出的光脉冲( $R_s = 0.005$ )抖动时间为0.23 ps

### 3.1 不同自注入光脉冲延迟时间对时间抖动的影响

在自注入光脉冲强度一定的情况下,计算得到的自注入光脉冲延迟时间与时间抖动的关系曲线如图5所示。

根据图5所示曲线可以看到,在400 ps周期间隔中有一个近100 ps的时间窗口,自注入光脉冲在时间窗口内到达腔内,都能有效地减小时间抖动。对照图5与图4可知该时间窗口位于载流子密度首次到达阈值的时间( $t$ )附近,此时,腔内仅有少量由自发辐射产生的光子,即使0.5%的注入光强也大于激光器内的自发辐射光强,因此自发辐射造成的光子数波动几乎被完全抑制住,从而减小了光脉冲的时间抖动。若注入光脉冲位于时间窗口外,或因过早到达,激光器内尚未达到阈值载流子浓度,注入光因内部吸收与端面损耗而被衰减;或因滞后到达,激光器腔内受激辐射光子数急剧增加,强度较弱的自注

入光不足以影响激光器输出使其发生明显的变化,故均起不到消抖动的作用,相反有可能成为一种附加的扰动叠加在自发辐射噪声上,加剧输出光脉冲的时间抖动。至于图5计算曲线的右上方出现的“凹陷”,基于上述机理可以分析,此“凹陷”位于光脉冲后沿,此时腔内受激辐射光子数急剧减少,自注入光对自发辐射造成的光脉冲后沿的光子数波动有一定的抑制,但不足以对整个脉冲序列的抖动产生卓有成效的抑制作用,故不宜采用。

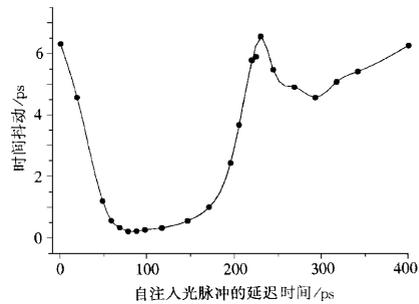


图5 自注入光脉冲延迟时间与时间抖动的计算曲线(注入光强一定)

以上计算结果均在实验中得到证实,图6为用光纤拉伸器调节光脉冲反馈延迟时间,数字示波器11801C(美国泰克公司)测得的光脉冲时间抖动(RMS)实验曲线,可见实验曲线与计算结果能很好符合。

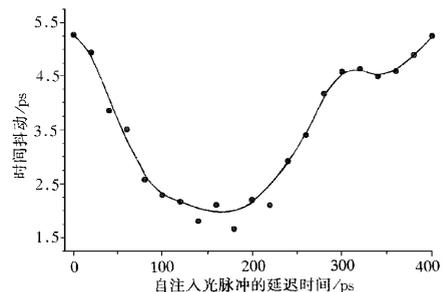


图6 自注入光脉冲延迟时间与时间抖动的实验曲线(注入光强一定)

### 3.2 不同自注入光脉冲强度对时间抖动的影响

将自注入光脉冲的延迟时间选定在时间窗口内的最佳值,计算了不同的自注入光脉冲强度与时间

抖动的关系曲线,计算结果如图 7 所示.

从该曲线可以看出,若自注入光脉冲强度太小,不仅无法有效地抑制自发辐射噪声降低抖动,反而会加大抖动,从计算曲线可以看到当自注入光脉冲强度小于 0.01% 抖动值由 4.7 ps(无光自注入)上升到 7 ps 以上.其原因是此时自注入光脉冲成为一种附加噪声.而自注入光脉冲强度达到一定程度 ( $R_s \geq 0.1\%$ ) 后,自注入光脉冲越强,对自发辐射影响的抑制效果就越好.值得注意的是自注入光脉冲强度太大 ( $R_s \geq 5\%$ ),光脉冲形状会发生严重畸变,若自注入光脉冲的反射率达到 10% 时,甚至产生了双峰畸变(如图 8).这是由于时间窗内的自注入光脉冲有足够光强,光生载流子的产生使腔内载流子

密度提前达到阈值水平,产生第一个光脉冲,此时驱动电流使载流子数增加的速率仍大于受激辐射减少载流子数的速率,当载流子数再次达到阈值时就会激发第二个光脉冲.这种双峰畸变现象我们在自注入光消抖动实验中也观察到(参见文献[3]).由上分析可知,出现这种情况,适当调节自注入光脉冲的延迟时间使注入光脉冲与输出光脉冲间隔适当加大,双峰畸变会消失(如图 9),但这样做是以时间抖动略微增加为代价.应说明在不同自注入光脉冲强度对时间抖动影响的实验中,本文所述的光纤环镜自注入消抖动装置虽不能保证注入光偏振态与 DFB 激光器输出偏振态保持完全一致,文献[2]已报道当偏振态在较大角度范围内变化,对抖动的影响不大.

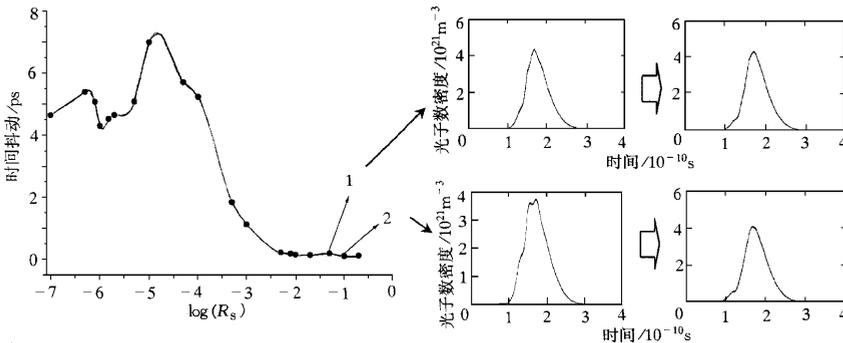


图 7 自注入光强与时间抖动的计算曲线(注入光脉冲延迟时间  $\tau_s = 78$  ps)

图 8 畸变光脉冲(上); 图 9 适当改变自注入光脉冲的延迟时间后,畸变基本消失  
双峰畸变光脉冲(下)

### 4 结 论

本文在外腔光纤激光器物理模型的基础上,运用包含光反馈与 Langevin 噪声项的单模速率方程,对光自注入法减小增益开关 DFB 激光器的时间抖动进行了数值模拟,对自注入光脉冲的延迟时间和强度与消抖动效果的关系进行了详细的分析与研究,得到了自注入光脉冲消抖动的时间窗口及自注入光脉冲强度范围(0.1%—5%)的两个重要结论,

理论计算与实验结果完全一致,为研制抖动小、实用化的增益开关 DFB 激光器提供了理论依据.

[1] D. S. Seo, D. Y. Kim, H. F. Liu, *Electron. Lett.*, **32**(1996) 44.  
 [2] R. Calvani, F. Cisternino, R. Girardi *et al.*, ECOC '98, Madrid, Spain, Sept. 1998, p. 167.  
 [3] 徐磊、姚敏玉、张剑锋等,中国激光,待发表 [Xu Lei, Yao Min-yu, Zhang Jian-feng *et al.*, *Chinese J. Lasers*, to be published (in Chinese)].  
 [4] L. N. Langley, K. Alan Shore, *J. Lightwave Technol.*, **11**(1993) 434.

# NUMERICAL SIMULATION OF SELF-SEEDING FOR TIMING JITTER REDUCTION IN A GAIN-SWITCHED DISTRIBUTION FEEDBACK LASER\*

WANG XU-FANG YAO MIN-YU XU LEI ZHANG JIAN-FENG CHEN MING-HUA GAO YI-ZHI

(*State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084*)

(Received 21 April 1999; revised manuscript received 18 July 1999)

## ABSTRACT

Self-seeding for timing jitter reduction in a gain-switched distribution feedback laser is simulated numerically. Timing jitter reduction related to delay time and intensity of self-seeding is calculated. Two important conclusions are obtained about the timing window for jitter reduction by self-seeding and the regime of intensity of self-seeding (0.1%—5%), which agree well with the experimental result.

**PACC** : 4280S ; 4272

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 69682009 and 69738010).