

有效压缩增益开关 DFB 激光器光谱 线宽的注入时间窗口*

王安帮¹⁾ 王云才^{1)†} 郭文阁²⁾ 张首刚²⁾

1) 太原理工大学理学院物理系, 太原 030024)

2) 中国科学院国家授时中心, 西安 710600)

(2006 年 4 月 7 日收到, 2006 年 5 月 16 日收到修改稿)

实验与理论研究了外光注入种子脉冲有效压缩增益开关 DFB 激光器光谱线宽的注入时间窗口. 发现只有在增益开关光脉冲建立之前约 100 ps 的时间窗口内, 注入种子脉冲方可以有效压缩增益开关 DFB 半导体激光器光谱线宽, 并且线宽随着注入光强度的增加而减小, 可产生低啁啾的近变换极限的超短光脉冲. 实验证实, 在此时间窗口内注入种子脉冲, 增益开关 DFB 激光器的光谱线宽从 0.46 nm 压缩至 0.08 nm, 时间带宽积从 2.46 降低至 0.70. 同时理论研究了增益开关 DFB 半导体激光器的光谱线宽压缩与种子脉冲的注入时间及强度的关系.

关键词: 半导体激光器, 光注入种子, 光谱线宽, 时间窗口

PACC: 4280W, 4255, 4260

1. 引 言

半导体激光器(laser diode, LD)在光通信、光谱分析、激光技术等许多领域有着广泛的应用. 分布反馈式(distributed feedback, DFB)半导体激光器是一种很重要的保密通信光源^[1]以及时分复用高速光通信系统的超短光脉冲源. DFB 激光器在强光注入下的调制带宽已达到 35 GHz^[2]. 但是由于载流子调制引入的啁啾, 增益开关 DFB 激光器的光谱线宽远大于稳态工作时的光谱线宽, 限制了其应用范围或降低了其应用系统的性能, 如在光通信系统中会引入较大的色散, 增大误码率.

利用光反馈或自注入种子可以显著压缩增益开关半导体激光器的光谱宽度. 例如 Barry 等人^[3]利用光纤环镜自注入增益开关 DFB 激光器, 在注入脉冲与增益开关光脉冲之间无时间延迟的情况下, 即在激光器的调制频率等于光纤环镜谐振频率的整数倍时, 实验发现 DFB 激光器输出脉冲的边模抑制比、模式竞争噪声和光谱线型均得到明显改善, 中心模式的光谱线宽也被大大压缩. 而 Rafailov 等人^[4]利用

波长无关的平面反射镜实现了对中心波长 980 nm 的增益开关 LD(脊形波导 InGaAs-GaAs LD)光谱线宽的压缩, 发现只有在注入脉冲与增益开关光脉冲之间的时间延迟大于 50 ps 时, 才可以实现线宽压缩, 如光谱线宽可从无注入时的 11 nm 降低到 0.05 nm. 但是, Hu 等人在利用光栅外腔改善增益开关 InGaAs 激光器的光谱特性时发现^[5], 在注入脉冲与激光脉冲的相互延迟小于 50 ps 的时间窗口内均可实现 8—12 倍的光谱压缩比. 实验与理论均证实, 在利用光注入技术降低增益开关半导体激光器的脉冲时基抖动^[6,7]、通过波长选择实现增益开关 FP 激光器的单纵模输出^[8]等方面均存在着一个有效的注入时间窗口. 例如, 文献 [6]通过数值模拟发现自注入降低增益开关 DFB 激光脉冲时基抖动的注入窗口为 100 ps. 文献 [7]实验发现利用增益开关 DFB 激光器作为种子源注入并降低增益开关 FP 激光脉冲时基抖动也存在 100 ps 的注入时间窗口. 文献 [8]认为要使自注入增益开关 FP 激光器获得最大边模抑制比的单纵模输出, 注入种子脉冲相对于载流子浓度超过阈值的时间间隔不能超过 20 ps. 相对于降低时基抖动的注入时间窗口而言, 注入种子脉冲有效压

* 国家自然科学基金(批准号: 60577019), 山西省留学回国人员科研启动基金(批准号: 200417)和山西省自然科学基金(批准号: 20041042)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wangyc@tyut.edu.cn

缩增益开关半导体激光脉冲线宽的时间窗口尚缺少深入的研究. 本文针对这一问题, 实验和理论研究了种子光脉冲注入的时间以及强度对增益开关 DFB 激光器光谱线宽的影响, 得到了有效压缩线宽的注入时间窗口.

2. 实验装置及结果

为了实验测量线宽压缩的注入时间窗口, 实验中我们采用同一微波信号源驱动两个 DFB 半导体激光器, 如图 1 所示. 信号源(AgilentE8257D)输出的正弦微波信号由功分器分成两路(其中一路经过一可变电延迟线)再经微波放大器放大后, 分别实现两 DFB 激光器的增益开关. 输出具有同一时钟基准的光脉冲. 图 1 中 DFB 激光器 1(主激光器)内置隔离器, 通过温度控制器调节其工作电流使其输出的中心波长与 DFB 激光器 2(从激光器)的中心波长一致, 其输出的光脉冲作为注入种子注入到无内置隔离器的从激光器的谐振腔中. 从激光器的中心波长为 1553.84 nm(25℃时), 阈值电流为 10 mA. 在偏置电流为 15 mA 时, 输出光功率为 0.3 mW、光谱线宽为 0.05 nm、边模抑制比达到 50 dB、弛豫振荡频率约为 4 GHz. 通过调节可变电延迟线(SHF2000DEL)来改变驱动电脉冲注入到从激光器的时间, 也就是说, 通过改变电延迟线可以改变注入种子及调制电脉冲到达激光器谐振腔的相对时间. 注入种子脉冲的强度通过可调光衰减器调节. 两激光器都通过精确的温度控制, 以保证实验中波长稳定.

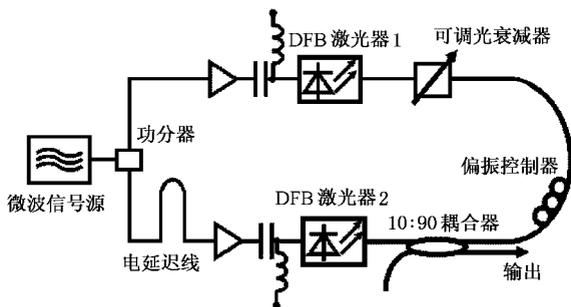


图 1 实验装置示意图

在偏置电流为 15 mA 情况下, 用 2 GHz, 16 dBm 的正弦信号调制从激光器, 输出平均功率为 0.36 mW 脉宽 43 ps 的光脉冲, 其光谱特性如图 2(a)所示, 光谱线宽为 0.46 nm, 边模抑制比降低至 42 dB.

注入种子脉冲到达从激光器谐振腔相对于腔内

激光脉冲建立的时间差即为注入时间延迟, 它可以通过电延迟线调节两个激光器电脉冲驱动的时间差来改变. 实验中, 延迟线的调节范围为 160 ps, 调节精度为 1 ps. 注入种子的强度通过可调光衰减器来调节. 在 10:90 耦合器的一个输出端检测注入光功率, 以耦合器输出到激光器的功率与激光器的输出功率之比表示注入强度(由于无法确定激光器的端面反射以及腔内耦合引起的损耗, 因此没有考虑实际注入进激光器的功率). 实验得到, 注入时间延迟约 87 ps, 注入强度为 40% 的种子脉冲将增益开关 DFB 激光器线宽从 0.46 nm 降低至 0.08 nm, 边模抑制比增加至 48 dB, 如图 2(b)所示. 由于所用光谱仪(Agilent86140B)的带宽分辨率极限为 0.06 nm 并考虑到其自身存在的噪声, 实际的光谱线宽应该优于 0.08 nm. 注入后的光脉冲宽度展宽至 70 ps, 时间带宽积由未注入时的 2.46 降低至 0.70, 接近超短光脉冲的变换极限.

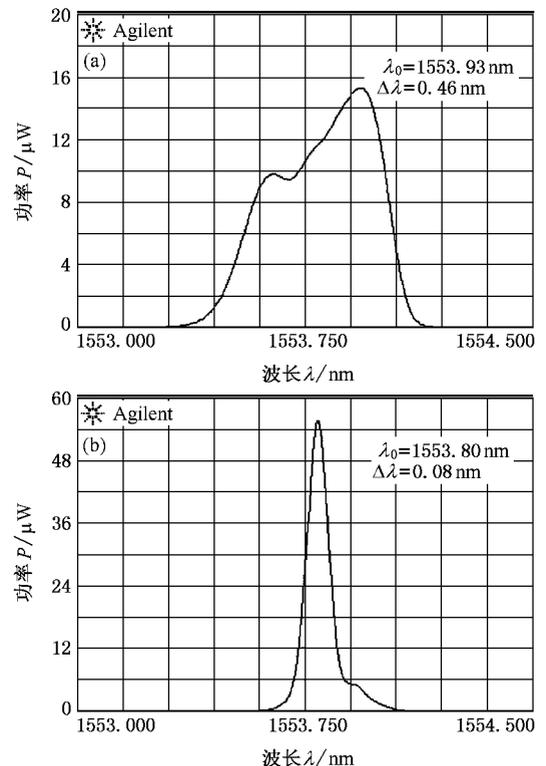


图 2 GS-DFB LD 输出光谱, (a) 无光注入时线宽为 $\Delta\lambda = 0.46$ nm (b) $\tau = 87$ ps 40% 注入强度时线宽为 $\Delta\lambda = 0.08$ nm

实验发现种子脉冲在激光脉冲建立之前注入可显著压缩光谱线宽, 但是存在某一个时间范围. 在注入强度为 40% 情况下, 激光脉冲的一个周期 500 ps 内不同时间延迟的种子脉冲对线宽的影响如图 3 中

实线所示. 图中反映的测量误差与光谱仪的带宽分辨率有关. 0.2 nm , 0.1 nm 和 0.06 nm 的带宽分辨率对应的误差分别为 $\pm 3\%$, $\pm 7\%$ 和 $\pm 12\%$. 若定义增益开关 DFB 激光线宽低于 0.1 nm (与静态 DFB 激光器线宽同量级) 时的光注入为成功的, 则由图可知在激光脉冲建立前约 $40\text{--}140 \text{ ps}$ 的宽约 100 ps 的时间窗口内注入的种子脉冲可以有效地减小光谱线宽. 其余时间延迟注入的种子脉冲压缩线宽的幅度较小. 特别是种子脉冲与激光脉冲完全没有时间上的波形交叉时, 种子脉冲对增益开关 DFB 激光器的光谱线宽没有影响.

此外实验还研究了线宽随种子脉冲强度的变化关系. 如图 3 中虚线所示, 在时间延迟为 87 ps 情况下, 增益开关 DFB 激光器的线宽随着种子脉冲强度的增加而减小. 在注入强度超过约 25% 时线宽可被压缩至 0.10 nm 以下.

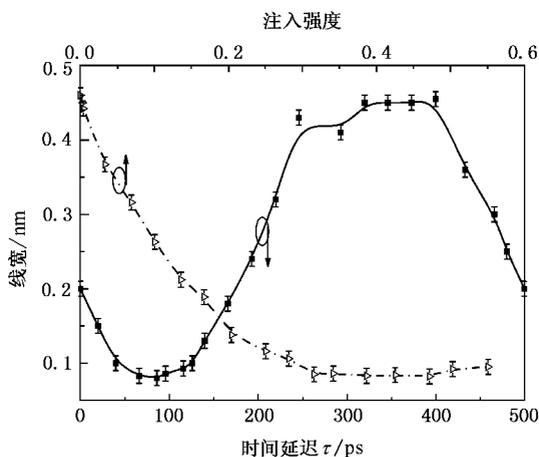


图 3 线宽随注入时间延迟(实线)和注入强度(虚线)的变化关系的实验结果

3. 理论分析

建立在自发辐射基础上的激光, 在其阈值附近各模式的光子数相差不大, 故光谱较宽且呈现多纵模特性. 由于各模式之间存在增益差, 所以随注入电流增加, 各模式的光子数之差变大, 光谱带宽变窄. 注入电流发生阶跃时, LD 光谱会由阈值附近的宽带光谱向高注入水平时稳态的窄带光谱转变, 其转变速度近似正比于主模与边模的增益差. 但是由于光谱随调制的瞬时变化, DFB 激光器单纵模的线宽较静态时有较大程度的加宽, 若要保持动态调制的窄线宽单纵模运转, 必须在调制的过程中始终或在阈

值之前保证主纵模与其他模式相比有足够大的种子数, 使得激光器在近阈值时能立刻实现单纵模激励. 显然, 适当时间和强度的脉冲注入光可以提供窄线宽输出所需要的光种子, 因此, 光脉冲注入可以压缩增益开关 DFB 激光器的光谱线宽.

增益开关 DFB 激光器的频率啁啾或线宽的大小取决于调制的频率和深度, 注入光脉冲对线宽的影响则取决于注入的强度以及注入光和腔内激光的耦合强度(对应于主、从激光器的功率比和 DFB 激光器腔内光栅耦合系数与腔长的乘积 κL). 可采用大信号调制的单纵模速率方程来分析 DFB 激光器的光谱情况, DFB 激光器的参数按照文献 [9] 的方法提取, 见表 1, 其中耦合强度 κL 等效于普通 FP 腔的镜面损耗, 可用等效的输出端面强度反射率 R 表示.

表 1 模拟中各参量的物理意义

物理量	值
电荷量 $e/10^{-19} \text{ C}$	1.6
有源区体积 $V/10^{-16} \text{ m}^3$	1
有源区长度 $L/\mu\text{m}$	300
有源区折射率 n_e	3.5
腔内损耗 α_i/cm^{-1}	25
等效的镜面损耗 ($\kappa L = 2$) α_m/cm^{-1}	47
等效端面光强反射率 R	0.25
光子寿命 τ_p/ps	1.6
载流子寿命 τ_n/ns	2
谐振腔内往返周期 τ_L/ps	7
光场限制因子 Γ	0.25
透明载流子密度 $n_0/10^{23} \text{ m}^{-3}$	3.4
阈值载流子密度 $n_{th}/10^{23} \text{ m}^{-3}$	8.4
阈值电流 I_{th}/mA	10
增益饱和因子 $\epsilon/10^{-23} \text{ m}^3$	3
线宽增强因子 α	6
微分增益 $g/10^{-12} \text{ m}^3/\text{s}$	5
自发辐射因子 β	1×10^{-4}

光注入对 DFB-LD 的影响可采用包含注入项和 Langevin 噪声项的单纵模速率方程^[10]来描述:

$$\begin{aligned} \frac{dn_{12}}{dt} &= \frac{K(t)}{eV} - \frac{n_{12}(t)}{\tau_n} - g(n_{12}(t) - n_0) \\ &\quad \times \frac{S_{12}(t)}{1 + \epsilon S_{12}(t)} + F_{n_{12}}(t), \\ \frac{dS_{12}}{dt} &= \frac{\beta \Gamma n_{12}(t)}{\tau_n} - \frac{S_{12}(t)}{\tau_p} + \Gamma g(n_{12}(t) - n_0) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \times \frac{S_1 \chi(t)}{1 + \epsilon S_1 \chi(t)} + 2 \frac{\kappa_{inj}}{\tau_L} \sqrt{S_2(t) S_1(t - \tau)} \\ & \times \cos(\theta(t)) + F_{s_2}(t), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi_{1,2}}{dt} = & \frac{1}{2} \alpha [\Gamma g(n_1 \chi(t) - n_0) - \tau_p^{-1}] \\ & - \frac{\kappa_{inj}}{\tau_L} \sqrt{\frac{S_1(t - \tau)}{S_2(t)}} \sin(\theta(t)) + F_{\phi_2}(t), \end{aligned} \quad (3)$$

(1)–(3) 式分别表示 DFB 激光器 I (主激光器) 和激光器 χ (从激光器) 的载流子密度 n 、光子密度 S 及电场相位 Φ 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从激光器的注入项 (主激光器速率方程中不包含此项)。其中 $\theta(t) = (\omega_2 - \omega_1)t + \omega_1 \tau + \Phi_2(t) - \Phi_1(t - \tau)$, 反映了注入光引入的相位延迟; $\kappa_{inj} = (1 - R \chi r_p / R)^2$ 为注入光强度参量, 表示注入光与输出端面处内反射光的电场幅度之比, 用来衡量注入光的强弱, 其中 $r_p = P_1 / P_2$ 为两激光器输出功率之比; τ 为注入种子脉冲相对激光脉冲的时间延迟。

速率方程中 $F_n(t)$, $F_s(t)$ 和 $F_\phi(t)$ 为 Langevin 噪声项, 分别表示由载流子的自发辐射噪声引起的载流子密度、光子密度和电场相位的变化速率。考虑注入电流的散粒噪声对载流子密度的影响, Langevin 噪声项的表达式如下,

$$F_n(t) = -\sqrt{\frac{2S(t_i)\beta n(t)}{\tau_n \Delta t}} x_s + \sqrt{\frac{2r(t_i)}{\tau_n V \Delta t}} x_n, \quad (4a)$$

$$F_s(t) = \sqrt{\frac{2S(t_i)\beta \Gamma n(t)}{\tau_n \Delta t}} x_s, \quad (4b)$$

$$F_\phi(t) = \frac{1}{S(t)} \sqrt{\frac{S(t_i)\beta \Gamma n(t)}{2\tau_n \Delta t}} x_\phi, \quad (4c)$$

$$x_s = x_1 \cos(\Phi(t_i)) + x_2 \sin(\Phi(t_i)), \quad (5a)$$

$$x_\phi = -x_1 \sin(\Phi(t_i)) + x_2 \cos(\Phi(t_i)), \quad (5b)$$

其中 Δt 表示每个自发辐射的作用时间, 其取值必须满足 Langevin 噪声可近似为白噪声, 本文在计算过程中取 $\Delta t = 5$ ps; $n(t_i)$, $S(t_i)$ 和 $\Phi(t_i)$ 分别是某个噪声作用区间 $t_i - t_i + \Delta t$ 开始时刻的载流子密度、光子密度和相位; x_n , x_1 和 x_2 是相互独立的标准高斯分布随机变量, 并且在每个时间区间内保持为恒定的常数。

在模拟过程中, 两 DFB 激光器取相同的参数, 波长均为 1550 nm, 不考虑波长失谐及主激光器产生的种子脉冲在注入前的传播损耗。采用 2 GHz 微波正弦信号同时调制主、从激光器, 调制幅度为 $2.5I_{th}$

(I_{th} 为阈值电流) 激光器偏置电流为 $1.5I_{th}$, 产生重复频率为 2 GHz, 脉冲宽度为 40 ps 的光脉冲, 光谱线宽为 0.70 nm, 其光谱特性如图 4(a) 所示。在注入时间延迟 87 ps, 注入功率比 r_p 为 0.25 的种子脉冲注入情况下模拟得到的从激光器的光谱特性如图 4(b) 所示, 其线宽窄化为 0.02 nm。

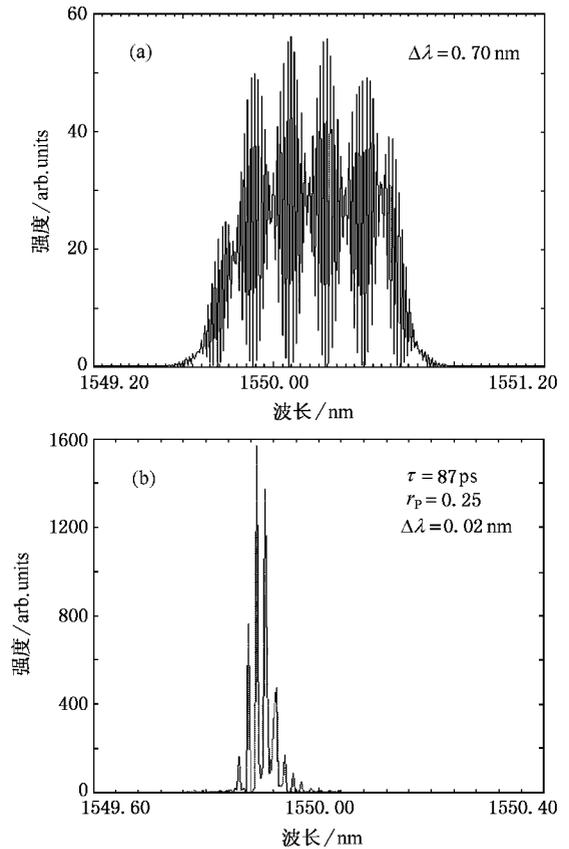


图4 模拟 CS-DFB LD 输出光谱 (a) 无光注入时线宽 $\Delta\lambda = 0.70$ nm (b) $\tau = 87$ ps, $r_p = 0.25$ 时线宽 $\Delta\lambda = 0.02$ nm

在一定注入强度 ($r_p = 0.25$) 的情况下, 模拟得到一个周期 500 ps 内种子光脉冲注入时间延迟与输出光谱线宽的变化关系曲线。如图 5 实线所示, 在脉冲周期间隔内存在一个处于脉冲前沿 110 ps 的时间窗口, 在此窗口内注入光可以成功将增益开关 DFB 激光器的线宽降低至 0.1 nm 以下, 而其他时间注入的种子脉冲并不能显著降低线宽。这种变化趋势与图 3 的实验结果基本相符。

窄线宽输出要求在低于阈值的脉冲建立初期, 必须有一定数量的主纵模光子代替自发辐射的光子作为光脉冲受激辐射的种子, 实现近阈值时的单纵模辐射, 因此种子脉冲的波形在时间上必须有一部分处于激光器的阈值时刻附近。反之, 注入光脉冲不

能起到“种子”的作用,无法显著降低增益开关光脉冲的线宽.因而在激光脉冲建立前存在一个注入时间窗口,在此窗口内任何时刻的注入光都可以有效压缩激光线宽.时间窗口以外的光脉冲注入情况,或注入时间过早,或在脉冲后沿注入,对阈值附近的光谱影响很小因而不能有效降低光谱线宽.

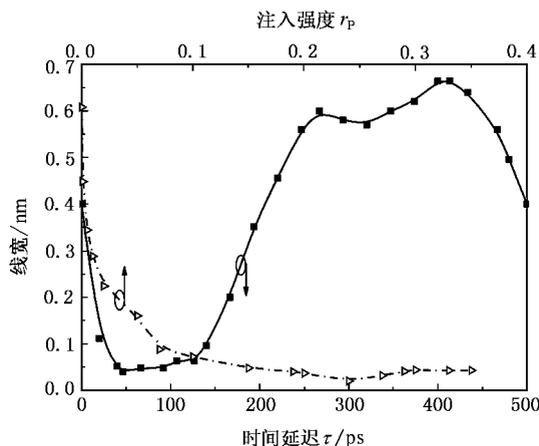


图5 线宽随注入时间延迟(实线)和注入强度(虚线)的变化关系的模拟结果

模拟还得到了在时间窗口内某一时刻(时间延迟为 87 ps)的注入种子光的强度对增益开关激光脉冲光谱线宽的影响.如图 5 中虚线所示,随着注入强度的增加线宽减小,其变化趋势与图 3 中虚线所示的实验结果一致.与实验结果相比,模拟结果中压缩线宽需要的注入强度较小,这是由于模拟过程没有考虑种子脉冲在注入前的损耗以及激光器参数提取存在的误差所引起的.实际上,在阈值前的注入时间窗口内的注入种子光将增大中心波长与其他波长的增益差,且随着注入种子强度的增加而增大,因此阈值附近的线宽随强度的增加而减小,当达到一定

强度时即可以显著降低光谱线宽.须注意,较强注入时,注入光大量、迅速地激发载流子产生受激辐射放大,并在注入载流子密度到达峰值之前形成光脉冲,因此当注入载流子密度达到峰值后必然会产生又一个光子数峰值,导致输出光脉冲产生双峰或严重拖尾.

光脉冲注入降低增益开关半导体激光器的时基抖动是利用注入光子作为受激辐射的种子光来抑制阈值前自发辐射带来的强度噪声,这与光脉冲种子注入压缩光谱线宽在注入时间上具有相似性.本文实验和模拟得到的压缩线宽的注入时间窗口与文献[6]降低时间抖动的注入时间窗口相比也表明了两者的相似性.

4. 结 论

光注入法是利用注入光代替自发辐射光子作为下一次受激辐射的种子,快速实现窄线宽单纵模激励,同时抑制近阈值处的自发辐射引起的频率噪声,从而压缩增益开关 DFB 激光器的光谱线宽,因此成功的光脉冲注入一定在激光脉冲建立前的某个时间窗口内.并且压缩线宽的注入时间窗口与脉冲注入降低时基抖动的注入时间窗口具有相似性.实验结果与理论分析表明,对于重复频率为 2 GHz、脉宽为 40 ps 的增益开关 DFB 激光脉冲,在其建立之前约 100 ps 的时间窗口内,光脉冲注入种子可以有效压缩线宽,并且线宽随着注入光强度的增加而减小,可产生低啁啾的近变换极限的超短光脉冲.在注入种子脉冲情况下,实验将增益开关 DFB 激光器的光谱线宽从 0.46 nm 压缩至 0.08 nm,时间带宽积从 2.46 降低至 0.70.

- [1] Wang C L, Wu J, Lin J T 2002 *Chin. Phys.* **11** 1033
 [2] Hwang S K, Liu J M, White J K 2003 *Conference Proceedings LEOS* **2** 710
 [3] Barry L P, Debeau J, Boittin R 1994 *Electron. Lett.* **30** 2143
 [4] Rafailov E U, Birkin D J L, Sibbett W, Avrutin E A 2001 *IEEE J Sel. Top. Quantum Elect.* **7** 287
 [5] Hu Y, Dubov M, Krushchev I 2004 *Electron. Lett.* **40** 702
 [6] Wang X F, Yao M Y, Xu L, Zhang J F, Chen M H, Gao Y Z 2000

Acta Phys. Sin. **49** 475 [in Chinese] 王徐芳、姚敏玉、徐磊、张剑锋、陈明华、高以智 2000 物理学报 **49** 475]

- [7] Wang Y C 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2190 [in Chinese] 王云才 2003 物理学报 **52** 2190]
 [8] Huhse D, Schell M, Ulz W, Kaessner J, Bimberg D 1995 *IEEE Photonic. Tech. Lett.* **7** 351
 [9] Cartledge J C, Srinivasan R C 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 852
 [10] Langley L N, Shore K A 1993 *J. Lightwave Technol.* **11** 434

The time-window of pulse injection seeding for effective spectra linewidth narrowing of gain-switched DFB laser diodes *

Wang An-Bang¹⁾ Wang Yun-Cai^{1)†} Guo Wen-Ge²⁾ Zhang Shou-Gang²⁾

¹⁾ *Department of Physics, College of Science, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*

²⁾ *National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China*

(Received 7 April 2006 ; revised manuscript received 16 May 2006)

Abstract

Spectral linewidth narrowing of gain-switched distributed feedback laser diode with pulse injection seeding is related to injection time, as indicated by experiment and theoretical analysis. The experimental and numerical simulation results show that in an approximately 100 ps time-window before the generation of optical pulse, the spectral linewidth can be narrowed dramatically by injecting pulse seeding, and that spectral linewidth decreases with increasing intensity of injection pulse. Near transform-limit low-chirp ultrashort optical pulses can be obtained with optical pulse injection seeding. A spectral linewidth reduction from 0.46 to 0.08 nm was obtained and the time-bandwidth product of 2.46 lowered down to 0.70 correspondingly in the experiment.

Keywords : laser diode, optical injection seeding, spectrum linewidth, time window

PACC : 4280W, 4255, 4260

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60577019), the Scientific Research Starting Foundation for Returned Overseas Chinese Scholars of Shanxi Province, China (Grant No. 200417), and the Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (Grant No. 20041042).

† Corresponding author. E-mail : wangyc@tyut.edu.cn