

文章编号: 0253-2239(2003)04-0459-06

重复脉冲注入下半导体光放大器皮秒增益和折射率非线性的数值模拟*

洪 伟 黄德修 孙军强 刘德明

(华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

摘要: 对重复周期小于载流子寿命的重复脉冲注入的情况,从速率方程出发,用分段模型对半导体光放大器的皮秒增益和折射率非线性进行了数值模拟,给出了重复脉冲注入下输出光脉冲时域波形的畸变、注入光脉冲引起的增益和相位变化,输出光脉冲上的频率啁啾随注入脉冲数增加的变化,以及归零光信号码流引起的增益和相位变化。

关键词: 激光物理; 半导体光放大器; 增益和折射率非线性; 自相位调制; 频率啁啾

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

1 引 言

半导体光放大器(SOA)具有增益谱宽、非线性系数高、功耗低和易于集成的优点,有可能成为未来高速大容量全光网中的关键器件。单个半导体光放大器和基于半导体光放大器的干涉仪型器件在全光信号处理(2R 或 3R 再生,波长转换,光时分复用等)方面的应用得到了广泛的研究^[1~4],而半导体光放大器的皮秒增益和折射率非线性是其实现这些功能的关键。短脉冲通过半导体光放大器时,其增益会迅速下降然后又缓慢恢复,这是由增益与载流子浓度的相关性引起的;与此同时由于半导体光放大器有源区有效折射率与载流子浓度的相关性,注入脉冲还会引起相应的自身的相位变化——自相位调制,因而在放大后的脉冲上会产生频率啁啾。如果输入光脉冲的重复周期 T 比半导体光放大器的载流子寿命 τ 大得多,那么在两个相邻的光脉冲之间,增益可以完全恢复,于是每个光脉冲放大的情况都可以按单脉冲放大的情况处理;但是如果不能满足 $T \gg \tau$,则两个相邻的光脉冲之间增益不能完全恢复,那么除第一个输入光脉冲之外,其它脉冲放大的情况就不能按单脉冲放大的情况处理了。

本文通过数值模拟研究了重复脉冲注入下半导体光放大器的皮秒增益和折射率非线性。第二节将

给出半导体光放大器的基本方程和采用的数值模型。第三节将讨论输出光脉冲时域波形的畸变、注入光脉冲引起的增益和相位变化,以及输出光脉冲上的频率啁啾随注入脉冲数增加的变化,和归零(Return-to-zero,缩写为 RZ)光信号码流引起的增益和相位变化。最后给出全文的总结。

2 基本方程和数值模型

当入射光脉冲的脉宽大于几个 ps 时,可以认为载流子浓度服从准稳态费米-狄拉克分布,可以忽略载流子加热、光谱烧孔等效应;另外考虑到在深饱和和状态下,放大的自发辐射(ASE)受到很强的抑制,忽略放大自发辐射的影响是合理的。如果采用载流子寿命 τ 来描述总的自发辐射和非辐射复合速率,载流子浓度的速率方程和光功率放大方程可以表示为^[5~7]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial N(z,t)}{\partial t} &= \frac{J}{qd} - \frac{N(z,t)}{\tau} - \frac{\Gamma g P(z,t)}{h\nu A}, \\ \frac{\partial P(z,t)}{\partial z} &= \Gamma g P(z,t) - \alpha_D P(z,t), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

这里, t 为随脉冲运动的坐标系下的时间, z 为光传播方向; N 为半导体光放大器有源区中的载流子浓度; P 为其中的光功率; J 为注入电流密度; q 为电子电量; d 为有源区的厚度; Γ 为模场限制因子; h 为普朗克常量; A 为有源区横截面积; ν 为光脉冲的中心频率; α_D 为半导体光放大器有源区的损耗系数; τ 与载流子浓度的关系为

$$c_1 N + c_2 N^2 + c_3 N^3 = N/\tau,$$

* 国家 973 项目(G2000036605)资助课题。

E-mail: optocat@yahoo.com.cn

收稿日期:2002-04-15; 收到修改稿日期:2002-07-08

其中 c_1 代表缺陷和俘获中心引起的非辐射复合系数, c_2 为双分子复合系数, c_3 为俄歇复合系数。 g 为增益系数, 它与载流子浓度和波长有关, 可以由下式模拟^[6]:

$$g = g_N [N(z, t) - N_t] - r_2 (\lambda - \lambda_p)^2 + r_3 (\lambda - \lambda_p)^3, \quad (2)$$

$$\lambda_p(N_0) = \lambda_{ref} - k_0 (N_0 - N_{ref}),$$

其中 g_N 为微分增益; N_t 为透明载流子浓度; λ 为入射光波的波长; r_2 为与增益谱带宽有关的常量; r_3 为与增益谱的不对称性有关的常量; λ_p 为无光入射稳态载流子浓度等于 N_0 时的增益峰值波长, λ_{ref} 为无光入射稳态载流子浓度等于 N_{ref} 时的参考增益峰值波长; k_0 为波长漂移系数。如果用 N_{add} 来表示由增

益色散引起的附加透明载流子浓度:

$$N_{add} = \frac{r_2}{g_N} (\lambda - \lambda_p)^2 - \frac{r_3}{g_N} (\lambda - \lambda_p)^3, \quad (3)$$

那么 g 可以简写为

$$g = g_N [N(z, t) - N_t - N_{add}], \quad (4)$$

模拟中采用了半导体光放大器的分段模型, 如图 1 所示, 即将整个半导体光放大器看成由 n 个子段串连而成, 当 n 足够大时, 可近似认为在这些子段中载流子浓度的分布是均匀的, 这一模型可以模拟半导体光放大器有源区中载流子浓度的空间 (z 向) 和时间变化。如果每一子段的长度均为 Δz , 光功率采样的时间间隔为 Δt , 用差分代替微分对 (1) 式进行离散化可以得到

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_{i,j} &= \frac{\Delta t}{\tau} \left[(N_0 - N_t - N_{add}) - (N_{i,j} - N_t - N_{add}) \left(1 + \frac{P_{i,j}}{P_s} \right) \right], \\ N_{i+1,j} &= N_{i,j} + \Delta N_{i,j}, \\ P_{i,j+1} &= P_{i,j} \exp \{ [\Gamma g_N (N_{i,j} - N_t - N_{add}) - \alpha_D] \Delta z \}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中 i 为时域采样点的序号, j 为空域子段的序号; $N_0 = J\tau/qd$ 为无光入射时的稳态载流子浓度; $P_s = h\nu A / \Gamma g_N \tau$ 为饱和光功率。另外根据增益的定义有

$$\left. \begin{aligned} G_{i,j} &= \frac{P_{i,j+1}}{P_{i,j}} = \exp[\Gamma g_N (N_{i,j} - N_t - N_{add}) \Delta z - \alpha_D \Delta z], \\ G_i &= \frac{P_{i,out}}{P_{i,in}} = \frac{P_{i,n+1}}{P_{i,1}} = \prod_{j=1}^n \frac{P_{i,j+1}}{P_{i,j}} = \prod_{j=1}^n G_{i,j}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

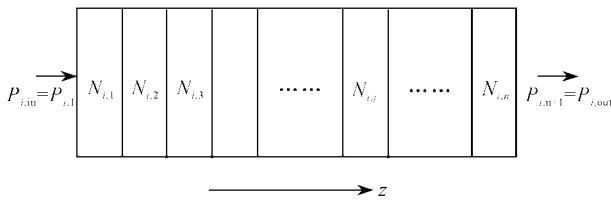


Fig. 1 Schematic diagram of SOA multi-section model

由于半导体光放大器有源区有效折射率与载流子浓度的相关性, 注入脉冲还会引起相应的自身的相位变化:

$$\Delta \bar{n}_{i,j} = \frac{d\bar{n}}{dN} (N_{i,j} - N_0), \quad (7)$$

$$\Delta \phi_i = \sum_{j=1}^n \frac{2\pi}{\lambda} \Delta z \Delta \bar{n}_{i,j},$$

其中 $\Delta \bar{n}_{i,j}$ 为第 i, j 段有效折射率的变化。又由增益与载流子浓度的关系可以得到^[2]

$$\Delta \phi_i = -\frac{\alpha_L}{2} \ln \left(\frac{G_i}{G_0} \right), \quad (8)$$

其中 $G_0 = \exp[\Gamma g_N L (N_0 - N_t - N_{add}) - \alpha_D L]$ 为小信号增益 (L 为半导体光放大器的长度), α_L 为线宽加强因子。产生的频率啁啾 Δf 则可由下式得到

$$\Delta f_i = -\frac{1}{2\pi} \frac{d(\Delta \phi_i)}{dt}. \quad (9)$$

3 计算结果及分析

假设入射光脉冲为无啁啾的理想高斯脉冲, 波长 1550 nm, 脉宽 (半峰全宽) 为 10 ps, 注入电流 100 mA, 对重复周期为 100 ps 的 8 个重复脉冲注入的情况进行了模拟计算, 计算中采用的参量值如表 1 所示。在 100 mA 的注入电流下, 由表 1 所给的参量确定的载流子寿命约为 246.56 ps, 大于注入光脉冲流的重复周期。

Table 1 SOA parameters used in simulation

Length of active region L/m	5.0×10^{-4}
Width of active region w/m	2.0×10^{-6}
Thickness of active region d/m	0.2×10^{-6}
Facet reflectivity R_1, R_2	0
Differential gain g_N/m^{-2}	6.3×10^{-20}
Loss of active region α_D/m^{-1}	4.0×10^3
Transparent carrier density N_0/m^{-3}	1.0×10^{23}
Mode confinement factor Γ	0.35
Referential injected current I_{ref}/mA	100
Referential peak-gain wavelength λ_{peak}/m	1.550×10^{-6}
Peak-gain wavelength shift coefficient k_0/m^{-4}	3.2×10^{-32}
Linewidth enhancement factor α_L	3.5
Nonradiative recombination coefficient c_1/s^{-1}	1.5×10^8
Bimolecular recombination coefficient $c_2/(m^3 s^{-1})$	5×10^{15}
Auger recombination coefficient $c_3/(m^6 s^{-1})$	9.0×10^{-41}
Gain constant r_2/m^{-3}	2.0×10^{19}
Gain constant r_3/m^{-4}	1.8×10^{26}
Number of sub-sections n	41

3.1 输出光脉冲的波形

输入光脉冲峰值功率分别为 0 和 10 dBm 时, 第 1~8 个输出光脉冲与输入光脉冲的时域波形的模拟计算结果如图 2 所示, 图中标记了输出光脉冲的序号。对于前几个输入光脉冲, 输出光脉冲波形是不同的: 第一个输出光脉冲的波形显然应该与单脉冲注入时输出光脉冲的波形相同, 原来对称的高斯脉冲经过半导体光放大器放大后, 波形不再对称, 脉冲的上升时间明显小于下降时间, 在随脉冲运动的坐标系下, 输出脉冲的峰值相对输入脉冲的峰值有一个小的时移, 形象地说来就是脉冲向前“倾斜”

了, 这是由于在脉冲上升沿载流子浓度的消耗所引起的。随着脉冲数的增加, 输出光脉冲的峰值功率下降, 其峰值与输入光脉冲峰值的相对时移减小, 输出光脉冲时域波形的畸变减小了, 而且前后两个脉冲波形的差别也逐渐减小, 图中可以看出, 3~4 个脉冲之后, 输出光脉冲的波形几乎完全重合。而且比较图 2(a)、图 2(b) 可知输入光脉冲的峰值功率越高达到稳定需要的脉冲数越少。计算结果表明, 即使不满足 $T \gg \tau$, 半导体光放大器也是可以放大重复脉冲序列的, 但这是通过牺牲增益实现的。

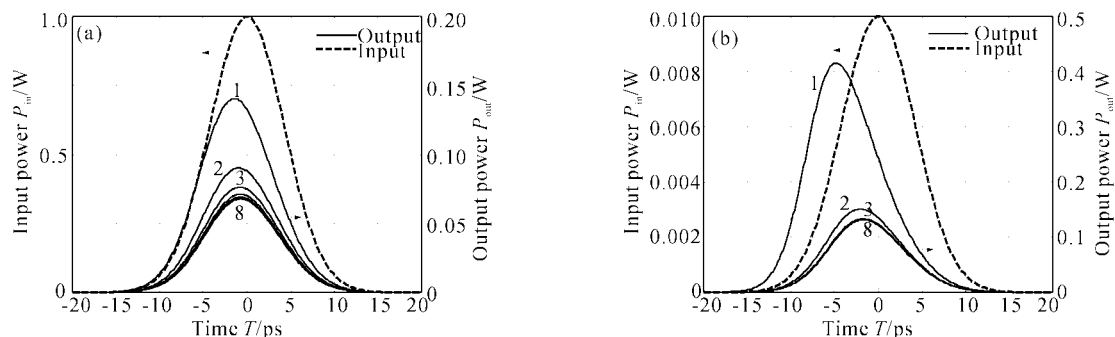


Fig. 2 Temporal profile of input and the first~eighth output pulses for (a) 0; (b) 10 dBm input pulse peak power

3.2 增益、相位和频率啁啾随时间的变化

输入光脉冲峰值功率为 0 和 10 dBm 时, 增益和相位随各个脉冲的注入变化的模拟计算结果分别如图 3 所示。第一个输入光脉冲引起的增益的变化

显然与单脉冲注入的情况相同, 脉冲通过时, 增益迅速下降, 脉冲通过后, 增益缓慢恢复; 由于载流子寿命大于注入光脉冲流的重复周期, 第二个输入光脉冲到达时, 增益还没有完全恢复, 第二个输入光脉冲

的达到使得增益再次下降,增益饱和的程度进一步加深,然后增益又缓慢恢复……,以此类推,增益随时间的变化呈锯齿状,且相邻两个周期内增益变化的波形渐趋一致,几个脉冲之后,增益呈现周期性的重复变化。增益变化的周期性与几个脉冲之后输出

光脉冲波形的稳定是相对应的,从某种意义上说,可以认为系统进入了某种稳态,即通常人们所说的“准稳态”。注入脉冲还引起了自身相位的变化——自相位调制(SPM),相位的变化与增益的变化相对应,比较图 3(a)和图 3(b)可知它们是反相的。

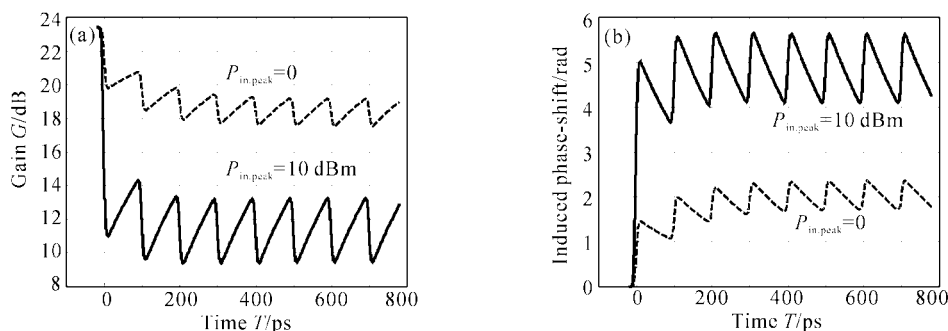


Fig. 3 Temporal evolution of gain (a) and phase shift (b) for 0 (dash line) and 10 dBm (solid line) of input pulse peak power under repeated pulse injection

比较输入光脉冲峰值功率为 0 和 10 dBm 时的计算结果可知:输入光脉冲峰值功率的增加,一方面使得增益饱和的程度加深,表现在达到准稳态后增益在更低的水平上、相位在更高的水平上周期性变化,另一方面使得达到准稳态后,脉冲引起的增益和相位的变化量增加。输入光脉冲峰值功率为 0 时,输入光脉冲引起的增益的变化量从第一个脉冲的约 3.6 dB 减小到进入准稳态后的约 1.7 dB;相位的变化量则从第一个脉冲的约 1.46 rad 或者约 0.46π 减小到约 0.7 rad,或者约 0.2π ;输入光脉冲峰值功率为 10 dBm 时,输入光脉冲引起的增益的变化量从第一个脉冲的约 12.4 dB 减小到进入准稳态后的约 3.8 dB;相位的变化量则从第一个脉冲的约 5 rad 或者约 1.6π 减小到约 1.5 rad,或者约 0.48π ,表明重复光脉冲注入下,达到准稳态后输入光脉冲引起的增益和相位的变化与单脉冲注入的情况相比要小得多。众所周知基于半导体光放大器的干涉仪型器

件如基于半导体光放大器的光纤环镜、基于半导体光放大器的马赫-曾德尔干涉仪可以实现光时分复用信号的全光解复用,理想情况下要求在时钟脉冲通过半导体光放大器前后有 π 的相位跃变,上述结果说明如果不满足 $T \gg \tau$,就不能从单脉冲注入的情况出发来衡量实现 π 相位跃变所需的光脉冲能量。

另外从系统达到准稳态的过程可以想象,如果注入的不是重复脉冲,而是随机的归零光信号码流,若不满足 $T \gg \tau$,每个光脉冲引起的增益和相位的变化将取决于它们在码流中的位置。当输入为 1101,0001,输入“1”脉冲峰值功率分别为 0 和 10 dBm 时的模拟计算结果如图 4 所示。半导体光放大器的光纤环境和半导体光放大器-马赫-曾德尔干涉仪用于 3R 再生时,由于器件的输出与信号脉冲通过半导体光放大器前后引起的增益和相位的变化有关,一般若不满足 $T \gg \tau$,必然会造成再生后信号眼图的劣化。

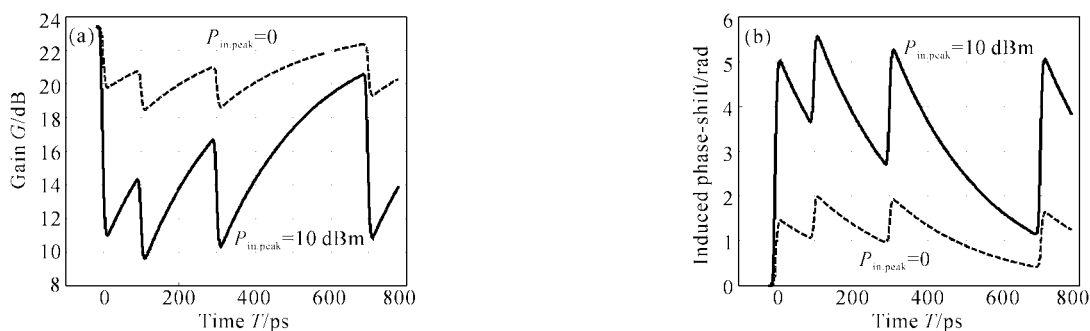


Fig. 4 Temporal evolution of gain (a) and phase shift (b) when return-to-zero signal 1101,0001, is injected, peak power of input “1” pulses are 0 (dash line) and 10 dBm (solid line) respectively

相位的变化使得输出光脉冲上产生频率啁啾, 输入光脉冲峰值功率分别为 0 和 10 dBm 时自相位调制引起的频率啁啾随各个脉冲的注入变化的模拟计算结果如图 5(a) 所示, 为了具体地显示出每个输出光脉冲上的频率啁啾, 将它们在第一时间坐标下绘出, 结果如图 5(b) 所示, 5(b) 中也标出了输出光脉冲的序号。计算结果表明: 各输出光脉冲上几乎均产生了不同程度的负啁啾, 第一个输出光脉冲上

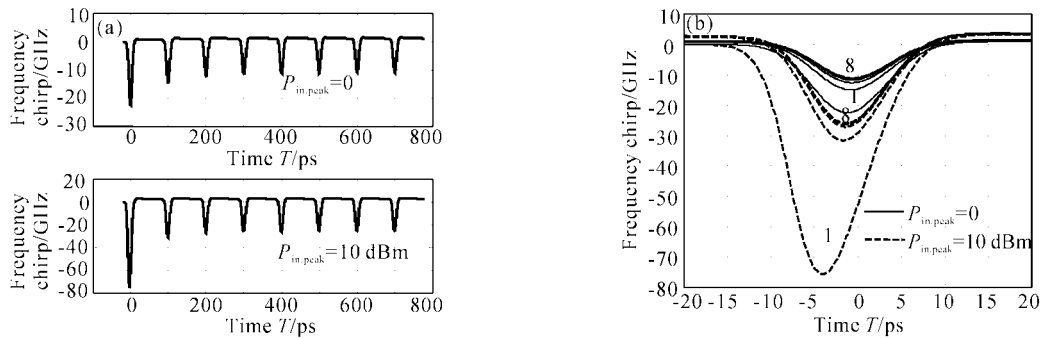


Fig. 5 Temporal evolution of frequency chirp for 0 (dash line) and 10 dBm (solid line) of input pulse peak power under repeated pulse injection

另外需要提到的是: 半导体激光器在直接调制时也会产生频率啁啾, 虽然其产生机制也是有源区有效折射率与载流子浓度的相关性, 但载流子浓度的变化是由调制电流的变化引起的, 而不是由注入光波自身引起的, 因此与半导体光放大器中的自相位调制效应是不同的。

结论 从重复脉冲注入下半导体光放大器皮秒增益和折射率非线性的模拟计算结果中可以看出: 1) 半导体光放大器可以放大重复周期小于载流子寿命的重复脉冲, 但必须牺牲一定的增益; 2) 在经历几个光脉冲的注入后, 系统达到准稳态: 输出光脉冲波形不变, 增益和相位随时间的变化呈周期性的锯齿波, 进入准稳态后输入光脉冲引起的增益和相位变化、输出光脉冲上的频率啁啾均小于单脉冲注入的情况; 3) 如果注入的不是重复脉冲, 而是随机的归零光信号码流, 若不满足 $T \gg \tau$, 光脉冲获得的增益和相位将取决于它们在码流中的位置。

参 考 文 献

1 Manning R J, Ellis A D, Poustie A J *et al.*,

产生的频率啁啾显然与单脉冲注入的情况相同, 随着注入脉冲数的增加啁啾程度逐渐减小直到不随注入脉冲数的增加而变化, 输入光脉冲峰值功率为 0 时, 输出光脉冲上的最大频移量从第一个输出光脉冲上的约 -22.5 GHz 减小到进入准稳态后的约 -11.1 GHz, 输入光脉冲峰值功率为 10 dBm 时, 最大频移量从第一个输出光脉冲上的约 -75.5 GHz 减小到进入准稳态后的约 -26.1 GHz。

Semiconductor laser amplifiers for ultrafast all-optical signal processing. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1997, **14**(11): 3204~3216

2 Eiselt M, Picper W, Weber H G. SLALOM: Semiconductor laser amplifier in a loop mirror. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(10):2099~2111

3 Ellis A D, Patrick D M, Flannery D *et al.*. Ultra-high-speed OTDM networks using semiconductor amplifier based processing nodes. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(5):761~770

4 Zhang Xinliang, Huang Dexiu, Sun Junqiang *et al.*. Noise characteristics of XGM wavelength conversion. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(10):1256~1259 (in Chinese)

5 Obermann K. *All-Optical Wavelength Conversion Based on Cross-Gain Modulation and Four-Wave Mixing in Semiconductor Optical Amplifiers*. Berlin: Wissenschaft und Technik Verlag, 1999. 12~18

6 Zhang Xinliang. *All-Optical Wavelength Conversion Based on Semiconductor Optical Amplifiers* (半导体光放大器用作全光波长转换器的研究). [Doctor Dissertation] Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, 2000. 11~45

7 Saitoh T, Mukai T. Gain saturation characteristics of traveling-wave semiconductor laser amplifiers in short optical pulse amplification. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **26**(12):2086~2094

Numerical Simulation of Picosecond Gain and Index Nonlinearities in Semiconductor Optical Amplifiers Under Repeated Pulse Injection

Hong Wei Huang Dexiu Sun Junqiang Liu Deming
(*Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University
of Science and Technology, Wuhan 430074*)
(Received 15 April 2002; revised 28 July 2002)

Abstract: Picosecond gain and refractive index nonlinearities in semiconductor optical amplifiers (SOAs) are simulated for repeated pulse injection case in which the repetition period is shorter than SOA carrier lifetime. The simulation is implemented by using a multi-section model and starting from the rate equation. The aberration of the temporal profile of the output pulse, gain and phase change induced by pulse injection, and frequency chirp on the output pulse are given for each injected pulse. Gain and phase change induced by return-to-zero (RZ) optical signal stream is also given.

Key words: laser physics; semiconductor optical amplifier (SOA); gain and index nonlinearities; self-phase modulation (SPM); frequency chirp