

文章编号 1004-924X(2003)01-0068-07

光脉冲在半导体光放大器中传输的计算机模拟

李均, 黄德修, 孙军强, 张新亮

(华中科技大学 光电子工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要:提出了一个用于描述脉冲在半导体光放大器(SOA)中传播的模型,此模型主要考虑了半导体光放大器内载流子加热(CH)、光谱烧孔(SHB)、双光子吸收(TPA)和非线性折射率(NR)这些非线性效应以及群速度色散和ASE噪声对放大器性能的影响。介绍了基于此模型编制的SOA模拟软件,软件可以模拟SOA的输入-输出过程,即给定输入端的脉冲复振幅即可求出输出端的脉冲复振幅。软件由几个功能模块组成,这些功能模块可以复用于更大的模拟系统。

关键词:半导体光放大器;计算机模拟;非线性效应;ASE噪声

中图分类号: TN722.34 **文献标识码:** A

1 引言

为了研究SOA对光脉冲的响应,人们进行了很多理论和实验研究^[1-4]。这些研究表明SOA内主要的非线性效应是载流子消耗、载流子加热、光谱烧孔、双光子吸收、非线性折射率。Agrawal提出了一个描述SOA内脉冲传播的模型,他认为放大器的增益饱和是由于受激发射消耗的载流子得不到及时补充引起的^[5]。并且当脉冲宽度远小于SOA的载流子寿命时,放大器的增益只与脉冲的总能量有关而与脉冲的具体宽度无关。此模型只考虑了载流子消耗对增益饱和的影响,当脉冲宽度较窄时(皮秒级)其他非线性效应对脉冲传播的影响不能忽略。文献[6]从半经典的浓度方程出发,提出了一个综合考虑了载流子消耗、载流子加热、光谱烧孔、双光子吸收、非线性折射率这些非线性效应的SOA模型。此模型是在输入为皮秒级高强度脉冲的条件下推出的,所以它忽略了ASE噪声和群速度色散。我们加入了这两项使此模型可以分析更一般的情况。文章第2节详细分析了这个模型以及它的数值解法,接下来介绍了基于此模型编制的模拟软件以及模拟结果。

2 理论模型及其数值解法

2.1 理论模型

文献[6]提出的模型可以用下面的偏微分方程来描述:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial A(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A(z,t)}{\partial t} \\ &= \frac{1}{2} \frac{g - \gamma_2 P^2}{1 + \gamma_1 P} A(z,t) - \\ & \frac{i}{2} \left[n_2 g - \tau \frac{\gamma_1 g P + \gamma_2 P^2}{1 + \gamma_1 P} \right] \\ & A(z,t) - \left(\gamma_2 + i \gamma_2 \frac{\omega_0}{c} n_2 \right) \\ & \frac{1}{2} P A(z,t) - \frac{1}{2} a_{\text{int}} A(z,t), \end{aligned} \quad (1)$$

因为只对随光脉冲一起传播的电磁场包络感兴趣,所以引入下面的局部时间替换因子:

$$= t - \frac{z}{v_g}, \quad (2)$$

根据下面两个关系式:

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial A(z,\tau)}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial t} = \frac{\partial A(z,\tau)}{\partial \tau}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial A(z,t)}{\partial z} &= \frac{\partial A(z,\tau)}{\partial z} + \frac{\partial A(z,\tau)}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial z} \\ &= \frac{\partial A(z,\tau)}{\partial z} - \frac{1}{v_g} \cdot \frac{\partial A(z,\tau)}{\partial \tau}. \end{aligned} \quad (4)$$

收稿日期:2002-09-11;修订日期:2002-12-25.

基金项目:国家973计划资助项目(No. G2000036605)

方程(1)简化为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A(z, t)}{\partial z} = & \frac{1}{2} \frac{g - \alpha_2 P^2}{1 + \alpha_1 P} A(z, t) \\ & - \frac{i}{2} \left[N g - \tau \frac{\alpha_1 g P + \alpha_2 P^2}{1 + \alpha_2 P} \right] A(z, t) \\ & - \left(\alpha_2 + i \alpha_2 \frac{\alpha_0}{c} n_2 \right) \frac{1}{L} P A(z, t) \\ & - \frac{1}{2} \text{int} A(z, t), \end{aligned} \quad (5)$$

当 SOA 的放大距离比较长且输入脉冲为皮秒级时应该考虑脉冲传播过程中色散对脉冲的展宽,在方程(5)左边加入色散项以考虑这种情况。

$$\begin{aligned} \frac{\partial A(z, t)}{\partial z} - \frac{i}{2} \frac{\partial^2 A(z, t)}{\partial t^2} = & \frac{1}{2} \frac{g - \alpha_2 P^2}{1 + \alpha_1 P} A(z, t) \\ & - \frac{i}{2} \left[N g - \tau \frac{\alpha_1 g P + \alpha_2 P^2}{1 + \alpha_1 P} A(z, t) \right] \\ & - \left(\alpha_2 + i \alpha_2 \frac{\alpha_0}{c} n_2 \right) \frac{1}{L} P A(z, t) \\ & - \frac{1}{2} \text{int} A(z, t), \end{aligned} \quad (6)$$

方程(6)中的增益 g 由下面的速率方程给出:

$$\frac{\partial g}{\partial t} = \frac{g_0 - g}{s} - \frac{1}{E_{\text{sat}}} \frac{g - \alpha_2 P^2}{1 + \alpha_1 P} P - \alpha_2 P^2, \quad (7)$$

$A(z, t)$ 是脉冲的慢变复振幅, $P = |A(z, t)|^2$; α_2 是二阶群速度色散系数; α_1 是由载流子加热和光谱烧孔引起的非线性增益压缩系数; α_2 是由双光子吸收引起的非线性增益压缩系数, α_1 和 α_2 的微观解释可以在文献[6]中找到。 N 和 τ 分别是载流子浓度和温度线宽提高因子; α_2 和 α_2 分别是与双光子吸收和非线性折射率有关的限制因子; α_2 是双光子吸收系数; n_2 是非线性折射率系数; g_0 和 E_{sat} 是 SOA 的小信号增益和饱和能量。 A 是有源区的有效面积 ($w d / L$), 其中 w 、 d 分别是有源区横截面的宽和高, A 是光场限制因子。 $\alpha_2 = \frac{a_N}{h\nu}$, 其中 a_N 是微分增益系数, $h\nu$ 是光子的能量。上面方程出现的其他参数为 SOA 内部损耗系数, 载流子寿命 s , 信号光的中心角频率 ω_0 和光速 c 。

方程(6)和(7)完整地描述了脉冲在 SOA 中传播的所有特性, 需要注意的是当忽略载流子加热、光谱烧孔、双光子吸收、非线性折射率以及群速度色散时, 方程(6)和(7)就变成了 Agrawal 描述

的模型^[5], 此模型很好地解释了宽脉冲(几十皮秒级)在 SOA 中的传播过程。

2.2 数值解法

采用分步法来求解上面的微分方程组。把 SOA 的放大器长度 L 分为很多个小段 h , 在每个小段内分别认为增益 $g(z, t)$ 只与时间有关, 这样可以把方程(7)看成常微分方程。在每一段 h 内先用初值 $g(z, t)$ 求解方程(6)得到 $A(z + h, t)$, 然后用 4 阶龙格-库塔方法^[7]和 $A(z + h, t)$ 求解常微分方程(7)得到的脉冲增益 $g(z + h, t)$ 。经过反复迭代最终可以解出放大器输出端的增益 $g(L, t)$ 和复振幅 $A(L, t)$ 。偏微分方程(6)是一个变形的薛定谔方程, 通常采用分步傅里叶法求解^[8]。求解时, 将方程写为以下形式:

$$\frac{\partial A(z, t)}{\partial z} = (N + \Delta) A(z, t), \quad (8)$$

其中: N 和 Δ 分别是非线性和线性算子, 具体表达式如下:

$$\begin{aligned} N = & \frac{1}{2} \frac{g - \alpha_2 P^2}{1 + \alpha_1 P} - \frac{i}{2} \left[N g - \tau \frac{\alpha_1 g P + \alpha_2 P^2}{1 + \alpha_1 P} \right] \\ & - \left(\alpha_2 + i \alpha_2 \frac{\alpha_0}{c} n_2 \right) \frac{1}{L} P, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Delta = \frac{i}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{1}{2} \text{int}, \quad (10)$$

利用分步傅里叶法, 方程(6)的解为:

$$A(z + h, t) = \exp(h\Delta) \exp(hN) A(z, t), \quad (11)$$

算子 $\exp(h\Delta)$ 的求解是在傅里叶频域内进行的:

$$\exp(h\Delta) B(z, t) = F^{-1} \{ \exp[h\Delta(i)] F[B(z, t)] \}, \quad (12)$$

F 和 F^{-1} 分别是傅里叶变换和反变换算子, 在(5)式中用 i 代替微分算子 $\partial/\partial t$ 就得到了 $\Delta(i)$, 其中 i 是傅里叶变换对应的频率, 进行数值计算时常用 FFT 和 IFFT 算法^[9]实现傅里叶变换和反变换。

为了在此模型中加入 ASE 噪声, 用适当的噪声源来模拟 SOA 中的 ASE 噪声^[10]。也就是说假设 SOA 内部不产生噪声, 噪声是与输入脉冲一起注入 SOA 内的, 即输入脉冲的复振幅 $A(0, t) = S(0, t) + N(0, t)$, 其中 $S(0, t)$ 是信号源而 $N(0, t)$ 是等效的噪声源。这种 ASE 噪声模型只有在由噪声引起的增益饱和可以忽略的情况下才有效, 即假设 SOA 的增益饱和和主要是由输入的

信号光源引起的。在这种情况下等效噪声源模型可以准确地模拟 SOA 内地 ASE 噪声。

等效的噪声源 $N(0, \omega)$ 是一个有限带宽的复白噪声。我们假设 SOA 内的 ASE 噪声的功率谱密度是一个常数 $p = h\nu_{sp}$, 那么等效高斯噪声源的功率为: $P_{ASE} = h\nu_{sp} B_N$, B_N 是等效噪声的带宽。等效白噪声是均值为零, 方差为 $h\nu_{sp}$ 的随机过程, 它的功率谱密度等于方差。把等效白噪声写成实部和虚部的形式 $N(0, \omega) = N_{re}(0, \omega) + iN_{im}(0, \omega)$, 则 $N_{re}(0, \omega)$ 和 $N_{im}(0, \omega)$ 都是均值为零, 方差为 $h\nu_{sp}/2$ 的随机过程。数值模拟时, $N_{re}(0, \omega)$ 和 $N_{im}(0, \omega)$ 分别用向量 $N_{re}(0, n)$ 和 $N_{im}(0, n)$ 代替, 这两个向量的元素都是均值为零, 方差为 $h\nu_{sp} B_n/2$ 的正态分布的随机数, 等效噪声源向量 $N(0, N)$ 则是由向量 $N_{re}(0, n)$ 和 $N_{im}(0, n)$ 组成的一个复数向量。等效噪声的带宽 B_N 只要取大于信号源的频率带宽就可以了。

3 模拟软件

基于上一节介绍的模型, 编制了一个 SOA 模拟软件。此软件由几个独立的功能模块组成, 其中最主要的模块是封装了 SOA 模型的 SOA 模块。此模块提供了一个输入接口和输出接口分别模拟 SOA 的输入端和输出端。SOA 模块的输入接口接受 SOA 的输入信号复振幅, 由于计算机只能处理离散数据, 所以必须把输入信号复振幅 $S(0, \omega)$ 截短离散化为复数向量 $S(0, n)$ 。如果不考虑 ASE 噪声, 模块就会把 $S(0, n)$ 作为输入脉冲向量 $A(0, n)$ 进行计算, 否则模块把输入信号向量 $S(0, n)$ 与上一节介绍的等效噪声源向量 $N(0, n)$ 叠加作为输入脉冲向量 $A(0, n)$ 。模块利用初始向量 $A(0, n)$ 和上一节给出的数值解法即可在输出接口输出放大后的脉冲复振幅 $A(L, n)$ 。软件的另一个模块是信号源模块, 此模块为 SOA 模块提供输入信号向量 $S(0, n)$, 模块可以提供超高斯和双曲正割两种形状的单脉冲或二进制脉冲序列向量。两种脉冲的各个参数由模块提供的接口设定, 脉冲的宽度 (FWHM) 由信号源的比特率 R (Gb/s) 决定。模拟软件的最后一个模块是曲线绘制模块, 给定一组离散数据, 此模块即可绘制相应的曲线。模拟软件利用这个曲线绘制模块可以显示 SOA 的输入、输出脉冲的波形和

频谱以及一些特征曲线。脉冲的频谱可以通过 $U(z, \omega)$ 的傅里叶积分得到, 具体公式为^[5]:

$$S(\omega - \omega_0) = \left| \int U(z, \omega) \exp[-i(\omega - \omega_0)z] dz \right|^2$$

其中: ω_0 是输入脉冲的中心频率。

图 1 显示了 SOA 模拟软件完整的模块框架。可以把这个软件看成一个子系统软件模块, 这个模块和它的三个功能子模块都可以复用于更大的模拟系统中。

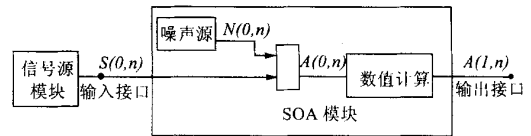


图 1 SOA 模拟软件的完整框图

Fig. 1 Block scheme of the SOA simulation software

表 1 SOA 模型的参数列表

Table 1 List of parameters of SOA model			
参数	符号	值	单位
放大器长度	L	5e-4	m
内部损耗系数	α_{int}	2e3	1/m
自发辐射系数	α_{sp}	5	
有源区有效面积		1.5e-12	m ²
双光子吸收有关的限制因子	β_2	0.5	
非线性折射率有关的限制因子	β_3	0.4	
群速色散系数	β_2	5e-24	s ² /m
双光子吸收引起的非线性增益压缩系数	β_2	200	1/W ²
增益系数	β_0	3e-20	m ²
线宽提高因子	β_0	5.0	
输入脉冲波长		1.55e-6	m
双光子吸收系数		3.7e-10	m/W
非线性折射率系数	n_2	-3.5e-16	m ² /W
小信号增益	g_0 dB	22	dB
饱和能量	E_{sat}	6.91e-12	J
载流子寿命	τ_s	3e-10	s

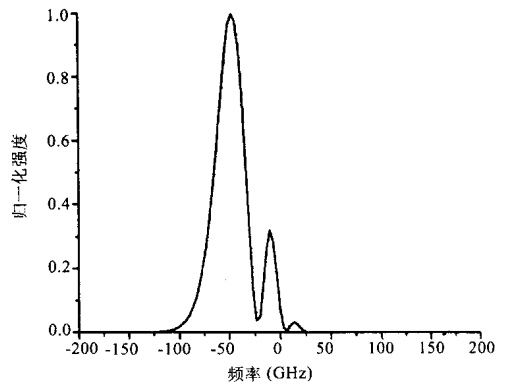
SOA 功能模块提供了相应的接口设定和修改出现在上一节 SOA 模型以及噪声模型中的参数。表 1 列出这些参数以及他们的缺省值。因为

有源区横截面的宽、高和光场限制因子 只出现在计算有源区的有效面积中,所以表中没有列出这三项,而是直接使用了有源区的有效面积 作为参数。光子的能量 $h\nu$ 和中心角频率 ω_0 可以由脉冲的中心波长 计算出来。

4 模拟结果

当脉冲比较宽时,可以忽略群速度色散 χ_2 项,方程(6)就变成了一个常微分方程,对于这样的常微分方程组,文献[6]采用了增益积分的方法把二维(时间和空间)方程组变为一个一维(时间)方程组进行求解,这种方法比分步法求解速度要快。当 χ_2 项不能忽略时,只能用分步法进行求解。

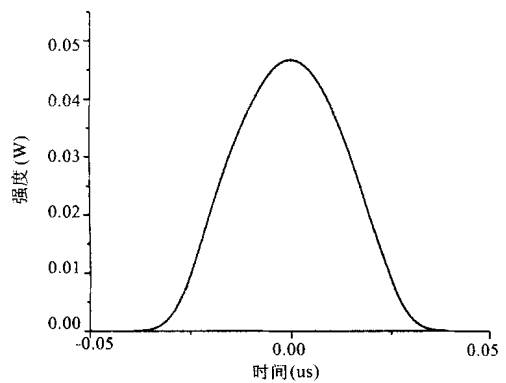
首先模拟的是单个脉冲在 SOA 中的传播情况,SOA 的小信号增益 g_0 dB = 30 dB,其他参数值为表 1 列出的缺省值并且去掉了 ASE 噪声项。根据脉冲的宽度可以把脉冲分为准连续脉冲(脉宽 \gg 载流子寿命)、宽脉冲(几十皮秒)和窄脉冲(皮秒)。图 2 是宽脉冲经 SOA 放大后的输出情况,此脉冲是全半宽(FWHM)为 25 ps,能量 E_{in} 约为 $0.1 E_{sat}$ 的高斯脉冲,(a)是输出脉冲波形,(b)是相应的归一化频谱。输出脉冲波形出现了明显的不对称形状,它的前沿比后沿陡。这是因为当脉冲宽度远小于载流子寿命时,受激发射消耗的载流子得不到恢复使 SOA 的增益饱和,脉冲



(b) 25 ps 高斯脉冲输出功率谱

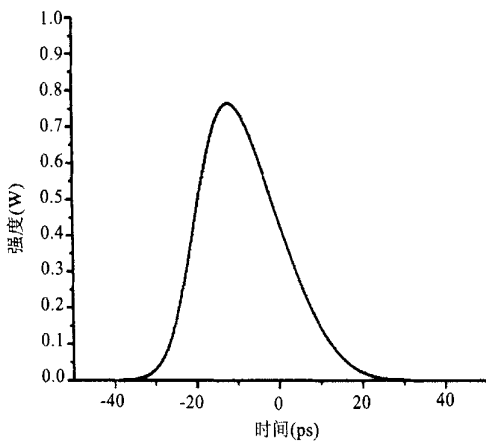
(b) Output pulse spectrum of 25 ps Gaussian pulse

图 2 25 ps 高斯脉冲输出脉冲波形(a)和功率谱(b)
Fig.2 Output pulse shape (a) and spectrum (b) of 25 ps Gaussian pulse



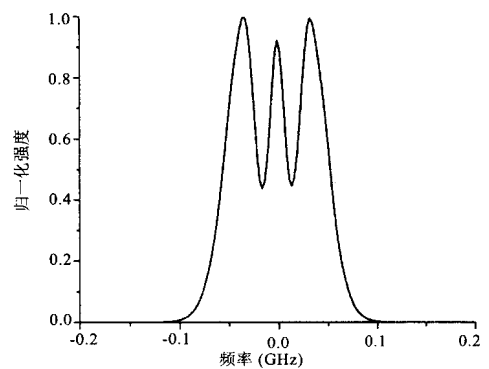
(a) 准连续高斯脉冲的输出脉冲波形

(a) Output pulse shape of quasi-CW Gaussian pulse



(a) 25 ps 高斯脉冲输出脉冲波形

(a) Output pulse shape of 25 ps Gaussian pulse



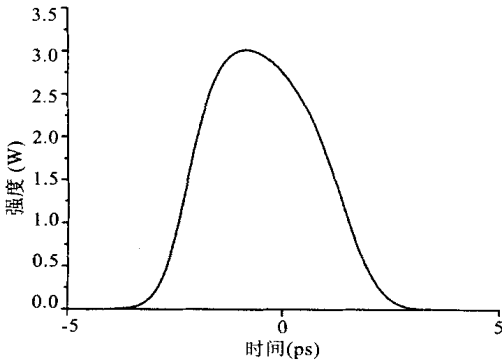
(b) 准连续高斯脉冲的输出功率谱

(b) Output pulse spectrum of quasi-CW Gaussian pulse

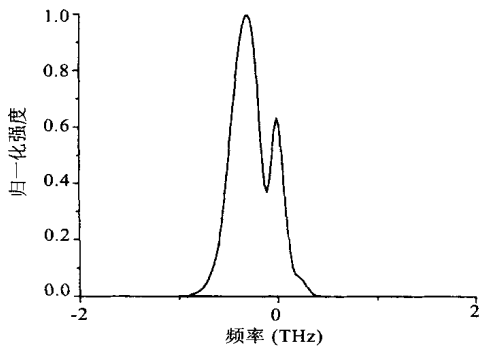
图 3 准连续高斯脉冲的输出脉冲波形(a)和功率谱(b)
Fig.3 Output pulse shape (a) and spectrum (b) of quasi-CW Gaussian pulse

$A(z, t)$ 对应的增益 g 随着时间 t 的增大而减小,这就使脉冲的前沿增益比后沿大,所以输出脉冲出现了不对称形状。图(b)中的输出脉冲频谱则由于自相位调制效应出现了多峰的结构,而且使谱峰向频率低的方向移动(红移)。

当脉冲的宽度(FWHM)变大时,脉冲前沿被饱和的增益在脉冲后沿期间得到了部分恢复,这使输出脉冲形状与图 2 相比要宽一些,而且也没有那么不对称。图 3 显示的是准连续脉冲(脉宽 \gg 载流子寿命)经 SOA 放大后的输出情况。从图中看出输出脉冲的形状(a)已经完全对称,这是因为饱和增益在脉冲后沿得到了完全恢复使脉冲前后沿的增益相同,同时脉冲顶部的增益比前后沿

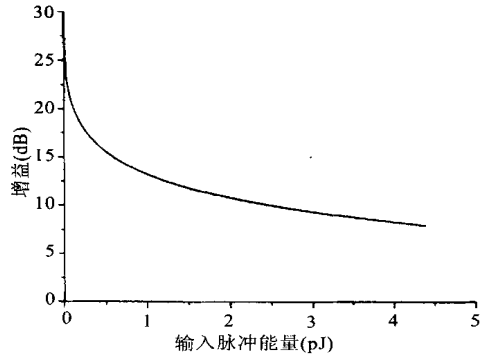


(a) 2.5 ps 高斯脉冲的输出脉冲波形
(a) Output pulse shape of 2.5 ps Gaussian pulse

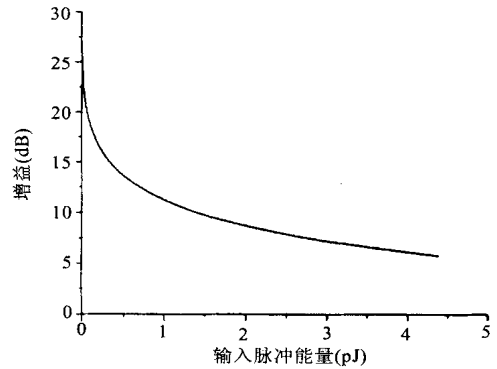


(b) 2.5 ps 高斯脉冲的输出功率谱
(b) Output pulse spectrum of 2.5 ps Gaussian pulse

图 4 2.5 ps 高斯脉冲输出脉冲波形(a)和功率谱(b)
Fig.4 Output pulse shape (a) and spectrum (b) of 2.5 ps Gaussian pulse



(a) 输入脉冲宽度为 25 ps 情况下 SOA 的增益与脉冲能量关系图
(a) Gain of amplifier against energy of 25 ps input pulses

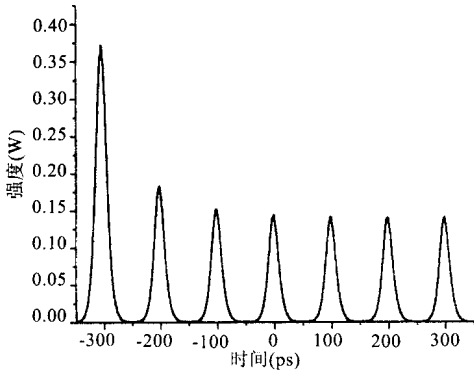


(b) 输入脉冲宽度为 2.5 ps 情况下 SOA 的增益与脉冲能量关系图
(b) Gain of amplifier against energy of 2.5 ps input pulses

图 5 输入脉冲分别为 25 ps(a)和 2.5 ps(b)时,SOA 的增益与脉冲能量关系图。SOA 的小信号增益为 30 dB
Fig.5 Gain of amplifier against energy of 25 ps(a) and 2.5 ps (b) input pulses. Small gain of SOA is fixed at 30 dB

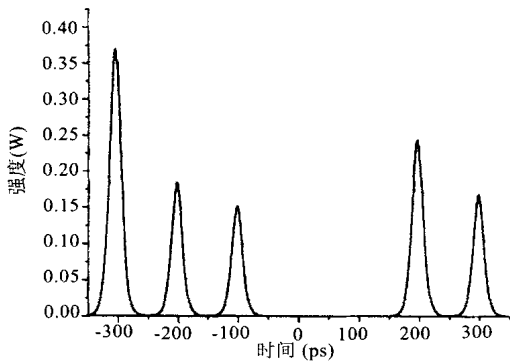
小,所以输出脉冲比输入脉冲要宽。脉冲前后沿的增益相同也使脉冲的频谱出现了对称的形状。对于上面两种情况影响增益饱和的主要因素是载流子消耗,因为脉冲宽度较宽,所以其他非线性效应对脉冲传播的影响可以忽略。对于窄脉冲,载流子加热、光谱烧孔、双光子吸收和非线性折射率这些非线性效应对增益饱和的影响很大。图 4 (a)显示的是全半宽(FWHM)为 2.5 ps,能量 E_{in} 约为 $0.1 E_{sat}$ 的高斯脉冲的输出波形,图 4 (b)是

相应的归一化频谱。当只考虑载流子消耗时,图 4 显示的波形和频谱应与图 2 相同,而实际上图 4 与图 1 有很大的差别,这是因为载流子加热、光谱烧孔、双光子吸收和非线性折射率这些非线性效应对窄脉冲的影响更大。



(a) 7 bit (1111111), 比特率为 10 Gb/s 双曲正割型的脉冲序列的输出波形图

(a) Output pulses shape of 7 bit (1111111) hyperbolic secant sequences in 10 Gb/s rate



(b) 7 bit (1110011), 比特率为 10 Gb/s 双曲正割型的脉冲序列的输出波形图

(b) Output pulses shape of 7 bit (1110011) hyperbolic secant sequences in 10 Gb/s rate

图 6 7 bit 比特率为 10 Gb/s 双曲正割型的脉冲序列的输出波形图。图 a 是全 1 的脉冲序列, b 是 1110011 的脉冲序列

Fig. 6 Output pulses shape of 7 bit hyperbolic secant sequences in 10 Gb/s rate. The pattern of sequences is 1111111 (a) and 1110011 (b)

现在来计算这些非线性效应对放大器增益的影响。放大器增益定义为用分贝表示的脉冲输入输出能量比。图 5 画出了输入高斯脉冲宽度分别为 25 ps(a) 和 2.5 ps(b) 的情况下,放大器增益与输入能量的关系曲线。SOA 的小信号增益固定为 30 dB,其他参数值为表 1 列出的缺省值。当只考虑载流子消耗时,两条曲线应重合,但从图中可看出对于窄脉冲,随着输入脉冲能量的增加 SOA 的增益下降得更快,这说明了当模拟窄脉冲传播时不能忽略其他非线性效应对增益的影响。

最后要模拟的是脉冲序列经 SOA 的放大情况。SOA 的小信号增益 g_0 dB = 30 dB,其他参数值为表 1 列出的缺省值。我们用信号源模块产生速率位 10 Gb/s 的 7 位双曲正割型的脉冲序列向量,再把它输入 SOA 模块,图 6 显示的是输出脉冲序列的波形图。(a) 图是全 1 的脉冲序列,(b) 图是 1110011 的脉冲序列。每个输入脉冲的宽度 (FWHM) 是 25 ps,峰值功率为 20 mW。从图中可以看到增益饱和对脉冲序列传播的影响,序列第一个脉冲的强度明显大于其他的脉冲,(a) 图中从第二个脉冲开始 SOA 一直处于饱和状态而且饱和程度也未加深,所以接下来脉冲的强度都差不多,而(b) 图中 SOA 经过 2 个比特周期的时间使 SOA 的增益得到了部分恢复使第六个脉冲的强度有了明显增加。

5 结 束 语

在本文中提出了一个描述脉冲在半导体光放大器 (SOA) 中传播的模型。脉冲在 SOA 中传播主要受到载流子消耗、载流子加热、光谱烧孔、双光子吸收、非线性折射率这些非线性效应的影响,当脉冲较宽时可以只考虑载流子消耗,如果脉冲较窄(皮秒级)不能忽略其他非线性效应。介绍了在此模型基础上上编制的 SOA 模拟软件,并使用此软件模拟了单个脉冲以及脉冲序列在 SOA 中的放大情况。

参考文献:

- [1] GHAFOURI-SHIRAZ H, TAN P W, ARUGA T. Picosecond pulse amplification in tapered-waveguide Ir-diode amplifiers [J]. *IEEE J select Topics Quantum Electron*, 1997, 3:210-217.
- [2] MECOZZI A, MORKJ. Saturation induced by picosecond pulses in semiconductor optical amplifiers[J]. *J Opt Soc Amer B*, 1997, 14:762-770.
- [3] 金韬, 黄德修, 丘军林. 半导体光放大器增益波动的研究[J]. *光学学报*, 1996, 16(2):137-141.
JIN T, HUANG D X, QIU J L. Gain ripple in semiconductor optical semiconductors[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(2):137-141. (in Chinese)
- [4] 刘威, 孙军强. 一种新颖的偏振不灵敏的基于半导体光放大器的四波混频光波长转换方法[J]. *光学学报*, 2001, 21(9):1047-1051.
LIU W, SUN J Q. A novel scheme for polarization-insentive optical wavelength conversion based on four-wave mixing in semiconductor optical semiconductors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(9):1047-1051. (in Chinese)
- [5] AGRAWAL G P, OLSSON N A. Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor optical amplifiers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1989, 25:2297-2306.
- [6] TANG J M, SHORE K A. Strong picosecond optical pulse propagation in semiconductor optical amplifiers at Transparency [J]. *IEEE J!Quantum Electron*, 1998, 34(7):1263-1269.
- [7] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1986.
LI Q Y, WANG N CH, YI D Y. *Numerical Analysis* [M]. Wuhan: Huazhong Universty Press, 1986. (in Chinese)
- [8] AGRAWAL G P. *Nonlinear fiber optics* [M]. Boston: Academic Press, 1989.
- [9] 郑南宁. 数字信号处理[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1992.
ZHENG N L. *Digital signal processing* [M]. Xi 'an: Jiao Tong University Press, 1992. (in Chinese)
- [10] CASSIOLI D, SCOTTI S, MECOZZI A. A time-domain computer simulator of nonlinear response of semiconductor optical amplifiers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2000, 36(9):1072-1080.

Computer simulation of optical pulses propagation in semiconductor optical amplifiers

LI J Jun, HUANG De-xiu, SUN Jun-qiang, ZHANG Xin-liang

(Department of Opto-Electronics Engineering,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A model has been established with the nonlinear effects of SOA including carrier heating (CH), spectral holeburning (SHB), two-photon absorption (TPA) and nonlinear refraction (NR) in addition to group velocity dispersion and ASE noise on the amplifier performance taken into consideration to describe the optical pulse propagation in a semiconductor optical amplifier (SOA). A SOA simulation software based on the model is used to simulate the input-output process of SOA from the complex amplitude of input pulses to the complex amplitude of output pulses. The software is composed of several function modules reusable in a larger simulation system.

Key words: semiconductor optical amplifiers; computer simulation; nonlinear effects; ASE noise

作者简介:李均(1978-),男,江西波阳县人,现在武汉华中科技大学光电子工程系攻读硕士学位,主要研究方向为全光网系统模拟。E-mail: fiberlijun@sina.com Tel: 027-87543355-1