

文章编号: 1001-3806(2003)03-0168-04

半导体光放大器的超快动态增益特性*

郑泽洲 张新亮 黄德修

(华中科技大学光电子工程系, 武汉, 430074)

摘要: 提出了一种包括载流子密度脉动(CDP)、载流子加热(CH)和光谱烧孔(SHB)效应在内的半导体光放大器(SOA)的时域动态模型。利用该模型分析了半导体光放大器中的增益饱和、超快增益动态以及光脉冲在增益饱和和半导体光放大器中的波形畸变,其中重点考虑了超短脉冲的情况。模拟计算表明,对于 10ps 量级以下的短脉冲,分析半导体光放大器的动态增益特性时,不能忽略载流子加热和光谱烧孔等带内超快非线性效应的影响。

关键词: 半导体光放大器;动态增益特性;模型;超短脉冲

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A

Ultrafast dynamic gain characteristics of semiconductor optical amplifiers

Zheng Zezhou, Zhang Xinliang, Huang Dexiu

(Department of Optoelectronic Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: An advanced time-domain dynamic model for the investigation of semiconductor optical amplifiers(SOA) is presented. The model accounts for the ultrafast gain dynamics, the gain saturation and the pulse distortion induced by carrier density pulsation(CDP), carrier heating(CH) and spectral hole burning(SHB), the focus is on the ultrashort pulse gain saturation in SOA. It is shown by numerical simulation that there is a critical pulsewidth around 10ps, below which the intraband effects cannot be neglected.

Key words: semiconductor optical amplifier(SOA); dynamic gain characteristics; model; ultrashort pulse

引言

半导体光放大器(SOA)具有体积小、增益高、容易和其它半导体光器件集成、响应时间短等优点,因此在光通信系统中获得了广泛的应用。特别是在光信号处理领域,基于 SOA 非线性效应的全光 3R 再生、高速波长转换和全光逻辑器件已经成为当前的研究热点,而这些器件中都涉及到超短光脉冲在 SOA 中的传输。为了从根本上理解这些器件工作的物理本质,需要对超短光脉冲输入情况下 SOA 的动态增益特性进行分析^[1]。

Agrawal 和 Olsson 提出了一种理论模型来描述半导体光放大器中短脉冲的放大,该模型假定 SOA 的增益饱和效应由源于受激辐射的载流子密度脉动(CDP)引起,而未考虑载流子加热(CH)和光谱烧孔效应(SHB)^[2]。实际上对于输入信号为皮秒量级的

脉冲来说,CH 和 SHB 效应对 SOA 的动态增益特性有重要的影响^[3,4]。

在考虑了 CDP,CH 和 SHB 效应引起动态增益的情况下,作者提出了一种 SOA 在时域的动态模型,然后利用该模型研究了 SOA 对超短脉冲放大时的增益饱和特性,分析了不同脉宽情况下增益饱和对输出波形的影响,并和 Agrawal 的理论模型做了比较。

1 理论模型

已有的 SOA 的数值模型中,大多数是通过数值求解偏微分方程组来计算 SOA 输出端的光场。在 SOA 中传播的光场因为和有源介质发生非线性作用,光场得到放大或者衰减。光场强度和相位的变化是随时间 t 和位置 z 而变化的,也就是说,描述 SOA 里面传播过程中光场渐变的完整特性要解决的是一个 2 元的问题(关于 t 和 z),需要数值求解偏微分方程组。

通过将偏微分方程沿位置坐标 z 在整个 SOA 有源区长度 L 上积分,就可以把该偏微分方程组转化为一个时间 t 是唯一自变量的常微分方程组。经

* 国家九七三计划及湖北省自然科学基金资助项目。

作者简介:郑泽洲,男,1979 年 1 月出生。硕士研究生。主要从事光纤通信方面的研究。

收稿日期:2002-11-04;收到修改稿日期:2002-12-18

过这样的简化,可以看到此时 SOA 将由它的脉冲响应特性来描述,而脉冲响应特性对随 t 和 z 变化的光场做了严格的计算,同时避免了需要明确计算有源区内光场的繁琐。这种对 SOA 特性的简化使得在完整的光学系统中可以将 SOA 作为一个模块来处理,此时对 SOA 来说,仅需要考虑其输入输出关系即可对任意输入光波的输出光场进行求解。

半导体光放大器的增益随输入光脉冲的不同而变化,在考虑各种非线性效应,包括 CDP, CH 和 SHB 效应时,SOA 的增益动态特性由对应这 3 种效应的增益微分方程组来描述。SOA 的增益可以看作这 3 种效应对应增益 $g_j (j = \text{CDP, SHB, CH})$ 的总合。描述 SOA 的微分方程就是自变量为 g_j 的速率方程组。文献[4]中对导带和价带的微分方程做了分别考虑,因为电子的有效质量比空穴小很多,其弛豫时间更长,为了简单分析,本文中忽略了空穴的动态,对增益 g_j 有如下微分方程:

$$\frac{\partial g_{\text{CDP}}}{\partial t} = -\frac{g_{\text{CDP}}}{c} - \frac{1}{S_s} \frac{1}{c} gS(t, z) + \frac{a(N_{\text{st}} - N_{\text{tr}})}{c} \quad (1a)$$

$$\frac{\partial g_{\text{SHB}}}{\partial t} = -\frac{g_{\text{SHB}}}{1} - \frac{\text{SHB}}{1} gS(t, z) - \frac{\partial g_{\text{SHB}}}{\partial t} + \frac{\partial g_{\text{CDP}}}{\partial t} \quad (1b)$$

$$\frac{\partial g_{\text{CH}}}{\partial t} = -\frac{g_{\text{CH}}}{h} - \frac{\text{CH}}{h} gS(t, z) \quad (1c)$$

方程中各物理量的意义分别为: c 是载流子寿命, S_s 是饱和光子密度, $S(t, z)$ 为光子密度, a 是微分增益系数, N_{st} 是载流子密度的未饱和值,即在加入光脉冲之前由注入电流和自发载流子复合预先确定的载流子密度, N_{tr} 为透明载流子密度, 1 是对应光谱烧孔效应的特征时间, SHB 和 CH 分别为 SHB 和 CH 引入的非线性增益压缩因子, h 为温度弛豫时间。

对 $g = g(t, z)$ 有:

$$g = g_{\text{CDP}} + g_{\text{SHB}} + g_{\text{CH}} \quad (2)$$

对应的传播方程为:

$$\partial S / \partial z = (g - \text{int}) S \quad (3)$$

int 为内部损耗系数, int 为模场限制因子。

速率方程组(1)和传播方程(3)联合求解就可以对有源区中的光场进行描述,此时需要求解的是偏微分方程组,自变量为时间 t 和位置 z 。下面通过简单推导将该偏微分方程组简化为常微分方程组,即仅关于时间 t 的微分方程组。

在暂时不考虑内部损耗 int 的时候(当 g_j 足够

高时这种考虑是合理的),对方程(3)有:

$$\frac{\partial S(t, z)}{\partial z} = gS(t, z) \quad (4)$$

方程(4)的一般解为:

$$S(t, z) = S(t, 0) G(t, z) \quad (5)$$

式中, $G(t, z) = \exp[g_m(t, z)]$ (6)

$$g_m(t, z) = \int_0^z g(t, z) dz \quad (7)$$

g_m 为积分增益系数。

将前面准备求解的偏微分方程组化为常微分方程组的关键就是对方程组两边在整个有源区长度 L 上进行积分。引入下面几个变量 $h_j (j = \text{CDP, SHB, CH})$ 分别表示这 3 种效应对积分增益的贡献。

$$h_j = \int_0^L g_j dz \quad (8)$$

由此得到如下的积分增益系数:

$$g_m(t) = \int_0^L g(t, z) dz = h_{\text{CDP}}(t) + h_{\text{SHB}}(t) + h_{\text{CH}}(t) \quad (9)$$

SOA 的总增益为:

$$G(t) = \exp[g_m(t)] = \exp[h_{\text{CDP}} + h_{\text{SHB}} + h_{\text{CH}}] \quad (10)$$

由上面的推导过程就可以得到下述对新的变量 h_j 的常微分方程组:

$$\frac{dh_{\text{CDP}}}{dt} = -\frac{h_{\text{CDP}}}{c} - \frac{1}{P_s} \frac{1}{c} [G(t) - 1] P_{\text{in}}(t) + \frac{g_0}{c} \quad (11a)$$

$$\frac{dh_{\text{SHB}}}{dt} = -\frac{h_{\text{SHB}}}{1} - \frac{\text{SHB}}{1} [G(t) - 1] P_{\text{in}}(t) - \frac{dh_{\text{CH}}}{dt} - \frac{dh_{\text{CDP}}}{dt} \quad (11b)$$

$$\frac{dh_{\text{CH}}}{dt} = -\frac{h_{\text{CH}}}{h} - \frac{\text{CH}}{h} [G(t) - 1] P_{\text{in}}(t) \quad (11c)$$

式中, $P_{\text{in}}(t)$ 为 SOA 输入端的光功率, P_s 为饱和光功率, g_0 为未饱和增益。此时 $h_j(t)$ 的物理意义是对应非线性效应引起的输入脉冲包络 t 时刻的全程增益。

载流子密度和载流子温度的变化都将引起增益的变化,而光增益的任何变化都将影响波导折射率,由 Kramers-Kronig 关系式,考虑 1 阶情况下,输出端光场相位 $\phi(t)$ 可以用描述光增益的同样变量的线性函数表示为:

$$\phi(t) = -\frac{1}{2} N [h_{\text{CDP}} - g_0] - \frac{1}{2} \tau h_{\text{CH}} \quad (12)$$

式中, N 和 τ 分别为载流子密度脉动和载流子加

热的相位-幅度耦合系数。

至此,在给定 $P_{in}(t)$ 的情况下对方程组(11)进行求解,就可以由(10)式给出 SOA 的总的增益,由(12)式给出输入光场在波导中传播后相位的变化。这样即可得到输出场和输入场之间完整的计算关系式如下:

$$E_{out}(t) = E_{in}(t)e^{((1/2)g_m P_{in}(t) + i\phi_{P_{in}}(t))} \quad (13)$$

如果忽略载流子加热效应和光谱烧孔效应的影响,此时(11a)式即可描述半导体光放大器的动态增益, Agrawal 等人采用的就是这种模型^[2]。

2 数值求解

这一部分中将对上面得出的关于增益 h_j 的常微分方程组(11)进行数值求解,分析不同输入脉冲的增益动态和输出脉冲的变化。采用的计算参数为:饱和功率 $P_s = 20\text{mW}$,载流子寿命 $\tau_c = 200\text{ps}$, $g_0 = 3.0$, $\tau_1 = 70\text{fs}$, $\tau_h = 700\text{fs}$, $SHB = 1.17$, $CH = 1.95$ 。输入脉冲为理想的无啁啾高斯型脉冲。

载流子加热和光谱烧孔效应对 SOA 增益的影响见图 1,对脉宽 $T_0 = 2\text{ps}$, 10ps 和 20ps 3 种情况进行了计算;为了进行比较,图中也给出了不考虑载流子加热和光谱烧孔效应时 SOA 的动态增益曲线。可以看出,由于载流子加热和光谱烧孔效应的影响,SOA 的动态增益曲线中产生了快速增益饱和现象。这时 SOA 的增益曲线分为了两部分:快速增益饱和区和缓慢增益恢复区。

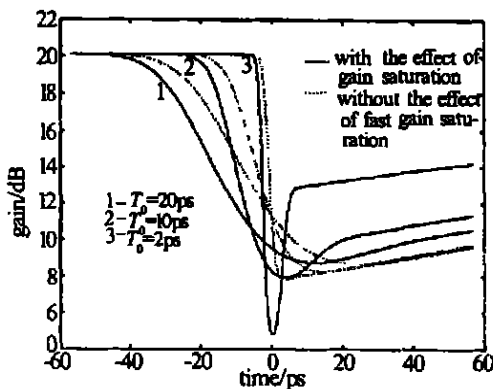


Fig. 1 The effects of fast gain saturation on the gain dynamics of SOA, T_0 is the pulsewidth

快速增益饱和区就是由 CH 和 SHB 效应所引起,该区域很短,为皮秒量级;缓慢增益恢复区主要由载流子密度脉动效应产生,时间较长,恢复时间由载流子寿命决定,一般为几百皮秒。还可以看到,快速增益饱和和效应受脉冲宽度的影响很大,脉宽越窄,快速增益饱和和现象越显著,当脉宽很宽时,基本上可

以忽略该效应的影响了。

图 2 为光放大器的能量增益饱和特性曲线,这里能量增益的计算采用文献[2]中给出的解析表达式。图 3 为不同未饱和增益(G_0)情况下的输出波形曲线,0dB 曲线表示输入脉冲,计算中取 $E_{in}/E_{sat} = 0.1$ 。

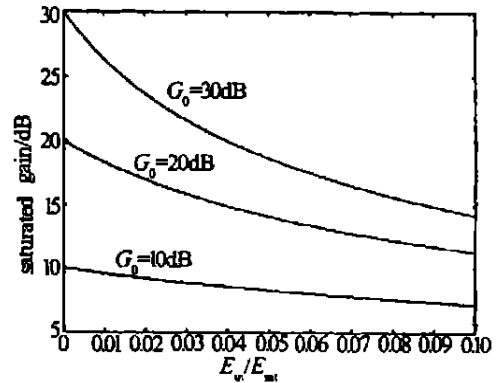


Fig. 2 Saturation characteristics of SOA, the curves show the energy gain G_e for $G_0 = 30\text{dB}$, 20dB and 10dB

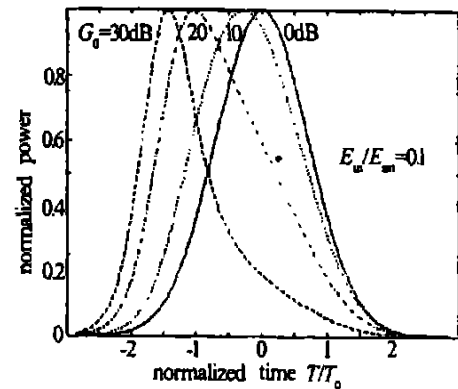


Fig. 3 Output pulse shapes for several values of unsaturated gain G_0 when the input pulse is Gaussian with an energy such that $E_{in}/E_{sat} = 0.1$, the 0dB curve shows the input pulse shape

可以看到,对应不同的 G_0 值,其它条件相同时输出波形的畸变程度是不一样的。因为对不同的 G_0 值来说, G_0 下降 3dB 对应的输入脉冲能量不一样,比如对图 2 中 $G_0 = 10\text{dB}$ 时,3dB 饱和能量(即 G_0 下降 3dB)约为 $E_{in}/E_{sat} = 0.1$,对 $G_0 = 20\text{dB}$ 时为 0.02,而对 $G_0 = 30\text{dB}$ 时则仅为 0.007 了。因此, G_0 值越大,使 SOA 出现增益饱和和所需的能量就越小,此时,对应输出波形的畸变也越显著。

图 4 所示为不同脉宽条件下 SOA 的输出脉冲波形。其中图 4a 考虑了 CDP, CH 和 SHB 3 种非线性效应的作用,也就是根据文中的模型进行计算;图 4b 是根据 Agrawal 提出的模型(仅考虑 CDP 效应)计算的结果。

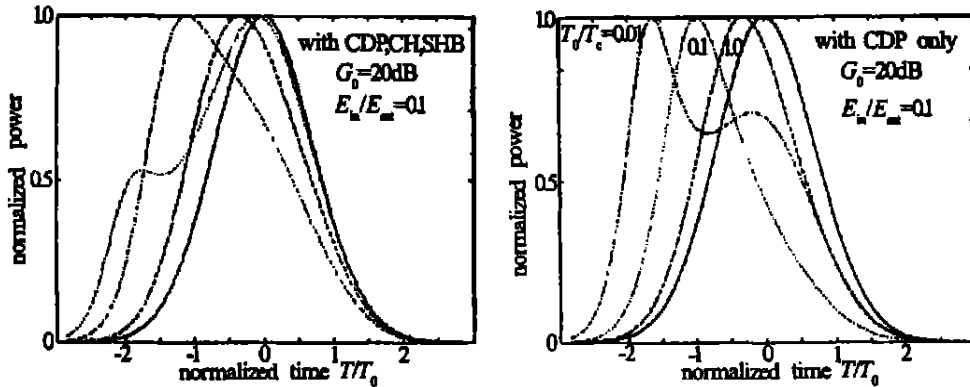


Fig. 4 Output pulse shapes for several values of T_0/T_c when a Gaussian input pulse (solid curve) is amplified in SOA with $G_0 = 20\text{dB}$, left curves are with both CDP, CH and SHB effects; right curves are with only CDP effect

计算中均取 $E_{in}/E_{sat} = 0.1$, $G_0 = 20\text{dB}$ 。分别对脉宽为 $T_0/T_c = 0.01, 0.1, 1.0$ 等 3 种情况进行计算(其中 T_c 为载流子寿命)。由图所示,在 E_{in} 不变的情况下,对应不同脉宽的输入脉冲有不同的输出波形。这是由于脉冲前沿已经引起放大器的增益饱和,因此,脉冲后沿的增益小于脉冲前沿的增益,输出脉冲波形的畸变就是由此引起。输入脉冲越窄,脉冲峰值功率越大,脉冲的前沿越陡,光强变化越剧烈,SOA 增益饱和得越快,增益下降越明显,所以波形畸变越显著。对脉宽为 2ps 的脉冲,比较两种计算模型下的输出波形可以看到,此时的快速增益饱和和效应是不应该被忽略的,图 4 中左右两边的曲线显示了此时两种计算模型带来的较大差异。

对于脉宽 T_0 接近载流子寿命 T_c 的输入脉冲,当脉冲后沿到达时,放大器已经处于增益饱和状态,即有源区的前期载流子已经耗尽,输入脉宽越宽,脉冲后沿越平缓,有源区载流子浓度就越容易得到恢复,从而使输出脉冲后沿可以获得相对稳定的增益,此时输出脉冲的后沿和输入脉冲后沿越接近,即波形畸变越小。

比较图 4 中利用两种不同模型计算的结果还可以看出,当输入脉冲的脉宽为 200ps 和 20ps 时,利用文中的理论模型和利用 Agrawal 的模型计算结果基本相似,也即此时考虑 CDP, CH 和 SHB 的效应与仅考虑 CDP 效应所得的 SOA 的增益动态基本相

似。而当脉宽仅为 2ps 时,归一化输出波形差别较大。一般说来,当脉冲宽度在 $10\text{ps} \sim 20\text{ps}$ 量级或者更宽时,可以忽略带内超快非线性(主要考虑 CH 和 SHB)效应的影响,而当脉宽小于 10ps 时,此时 CH 和 SHB 效应的特征时间可以和脉宽相比拟,就不能忽略这两种效应的影响了。

3 结 论

提出了一种考虑超快非线性效应时计算 SOA 动态增益的模型,应用该模型研究了增益饱和条件下光脉冲的增益动态,着重考察了超短脉冲情况下输出波形的畸变。研究结果表明:对于脉宽量级大于 10ps 时,可以忽略带内超快非线性效应对 SOA 增益饱和的影响,对于 10ps 量级以下的脉冲,因为载流子加热和光谱烧孔效应而导致快速增益饱和,此时在分析半导体光放大器的动态增益特性时就应该将这两种效应考虑进来。

参 考 文 献

- [1] Manning R J, Ellis A D, Poustie A J *et al.* J O S A, 1997, B14 (11): 3204 ~ 3216.
- [2] Agrawal G P, Olsson N A. IEEE J Q E, 1989, 25(11): 2297 ~ 2306.
- [3] Uskov A, Mork J, Mark J. IEEE Photon Technol Lett, 1992, 4 (5): 443 ~ 446.
- [4] Mecozzi A, Mork J. IEEE J Select Topics Quantum Electron, 1997, 3(5): 1190 ~ 1207.