

## 半导体光放大器中 SPM 效应对光脉冲传输性能的影响

董毅, 赵尚弘, 李勇军, 韩磊, 赵卫虎

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 为了研究半导体光放大器(SOA)中自相位调制(SPM)效应对光信号传输性能的影响,从 SOA 中光脉冲的传输方程出发,采用数学推导的方法,分析了 SPM 效应的产生机理,得到了光脉冲经 SOA 放大后的时域和频域变化特性,并针对无啁啾和带啁啾光脉冲两种情况进行了仿真研究。结果表明:SPM 导致了光脉冲时域波形的“倾斜”和频谱的红移,并且随增益的变大“倾斜”和红移的程度增强;啁啾系数的符号决定了频谱是红移还是蓝移。

**关键词:** 半导体光放大器; 自相位调制; 波形; 频谱

**中图分类号:** TN929 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)05-1411-05

## Transmission properties of optical pulse influenced by SPM in semiconductor optical amplifier

Dong Yi, Zhao Shanghong, Li Yongjun, Han Lei, Zhao Weihu

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In order to study the transmission properties of optical signal influenced by self-phase modulation (SPM) in semiconductor optical amplifier (SOA), based on the transmission equation, the generation principle of SPM was analyzed, the temporal and spectral characteristics of pulse transmitting through the SOA were obtained, the simulations are made separately to the pulse with no chirp and pulse with chirp. The result shows that SPM makes the shape of pulse decline and makes the spectrum broaden to lower frequency, and the degree of declination and broadening increases with growth of the gain of SOA, the sign of chirp coefficient determines whether the spectrum will be broadened to the high frequency or to the lower frequency.

**Key words:** SOA; SPM; shape of pulse; spectrum

收稿日期: 2013-09-10; 修订日期: 2013-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(40776100)

作者简介: 董毅(1987-), 男, 博士生, 主要从事卫星光通信方面的研究工作。Email: dongyi\_19870129@sina.com

导师简介: 赵尚弘(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光与光通信方面的研究工作。Email: zhaoshangh@yahoo.com

## 0 引言

随着全光通信网的迅速发展,光网络节点的全光处理技术逐渐成为人们关注的热点<sup>[1-2]</sup>。其中,SOA 由于具有工艺成熟,商用产品丰富,以及体积小,易于实现光子集成等优点,已经在全光波长转换、光放大、光判决等领域得到了广泛的研究<sup>[3-5]</sup>。参考文献[6]利用 SOA 中四波混频(FWM)的强度与偏振相关特性实现了对两路独立信号的波长变换,实验结果表明,两路波长变换后的信号消光比提高超过 5 dB;参考文献[7]利用 SOA 的交叉增益调制(XGM)对“0”码和“1”码的选择性增益特性,设计了一种相位调制信号的全光再生方案,该方案可有效抑制相位噪声对调相系统的影响,提高系统的 Q 值;参考文献[8]采用 SOA 中交叉相位调制(XPM)结合偏移滤波的结构实现了高速光判决,并在此基础上设计了 100 Gb/s 信号的波长转换方案。

尽管利用 SOA 的 FWM、XGM 和 XPM 等非线性效应均可以实现不同的全光处理功能,然而任意一种效应都不是单独起作用的,而是同时存在并相互影响的。其中,SPM 效应由于是光信号对自身相位进行调制的现象,因此对所有基于 SOA 的全光处理技术都会产生一定的影响,尤其是在高速率的相位调制系统中,SPM 效应对 SOA 全光处理性能的影响将更加明显。

文中研究了 SOA 中 SPM 效应产生的机理及对光脉冲时频特性的影响,仿真分析了高斯脉冲经 SOA 放大后时频特性的变化情况,并针对无啁啾光脉冲和带啁啾光脉冲两种情况进行了讨论,所得结论对基于 SOA 的全光处理技术研究具有一定的参考意义。

## 1 理论分析

假设入射光为线性偏振光,并且在 SOA 内传输时始终保持线性偏振,则光脉冲沿 SOA 长度方向幅度的演变情况可表示为:

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A(z,t)}{\partial t} = \frac{i\omega_0 \Gamma}{2nc} \chi A(z,t) - \frac{1}{2} \alpha_{int} A(z,t) \quad (1)$$

式中: $A(z,t)$ 为光脉冲的包络; $v_g$ 为群速度; $\Gamma$ 为模式

限制因子,表示有源区对横向场分布的限制作用,一般取值在 0.3~0.5 范围内; $\omega_0$ 为光子的频率; $n$ 为有效模式指数; $c$ 为光速; $\chi$ 为电极化率; $\alpha_{int}$ 为 SOA 的内部损耗。

载流子速率方程是用来描述载流子浓度变化的基本方程,在光脉冲宽度大于 1 ps 的情况下,载流子速率方程可写为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau_c} - \frac{g(z,t)}{wd \cdot hw_0} |A(z,t)|^2 \quad (2)$$

式中: $N$ 为载流子浓度; $I$ 为注入电流; $q$ 为电子电荷; $V$ 为 SOA 有源区体积; $w$ 为有源区宽度; $d$ 为有源区高度; $hw_0$ 为光子能量; $\tau_c$ 为载流子自发寿命,它决定了当强光耗尽了导带中的载流子之后,导带中载流子恢复所需要的时间。在考虑吸收和散射等损耗情况下,净增益系数  $g(z,t)$  被定义为:

$$g(z,t) = \Gamma A_g (N - N_{th}) - \alpha_{int} \quad (3)$$

式中: $A_g$ 为微分增益系数; $N_{th}$ 为透明载流子浓度。将公式(3)带入公式(2)可得:

$$\frac{\partial g(z,t)}{\partial t} = \frac{g_0 - g(z,t)}{\tau_c} - \frac{g(z,t) |A(z,t)|^2}{E_{sat}} \quad (4)$$

式中: $E_{sat} = hw_0 wd / \Gamma A_g$ 为饱和能量; $g_0$ 为小信号增益,可写为:

$$g_0 = \Gamma A_g N_{th} (I / I_{th} - 1) \quad (5)$$

式中: $I_{th} = qV N_{th} / \tau_c$ 为透明电流。

对公式(1)和公式(4)进行简化,并将  $A(z,t)$  的幅度和相位信息分开,写成  $A(z,t) = \sqrt{P} \exp(i\Phi)$  的形式,同时引入变换  $\tau = t - z/v_g$ ,可得:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = (g(z,\tau) - \alpha_{int}) P \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = -\frac{1}{2} \alpha g(z,\tau) \quad (7)$$

$$\frac{\partial g(z,\tau)}{\partial \tau} = \frac{g_0 - g(z,\tau)}{\tau_c} - \frac{g(z,\tau) P}{E_{sat}} \quad (8)$$

式中: $P$ 为光脉冲功率; $\Phi$ 为光脉冲的相位; $\alpha$ 为线宽增强因子。由公式(6)、(7)可以看出,净增益系数  $g(z,\tau)$  对时间的依赖性导致了脉冲功率和相位随时间的变化,即 SOA 的 SPM 效应将影响光脉冲的时频特性。

在 SOA 中,一般有  $\alpha_{int} \ll g(z,\tau)$ ,因此联合公式(6)、(7)可得:

$$P_{out}(\tau) = P_{in}(\tau) \exp[h(\tau)] \quad (9)$$

$$\Phi_{out}(\tau) = \Phi_{in}(\tau) - \frac{1}{2} \alpha h(\tau) \quad (10)$$

式中:  $P_{in}(\tau)$ 、 $P_{out}(\tau)$ 和  $\Phi_{in}(\tau)$ 、 $\Phi_{out}(\tau)$ 分别为 SOA 输入输出的光脉冲功率和相位;  $h(\tau)$ 为脉冲包络上各点的累积增益, 表达式为:

$$h(\tau) = \int_0^L g(z, \tau) dz \quad (11)$$

将公式(8)带入公式(11), 并对两边求导可得:

$$\frac{dh(\tau)}{d\tau} = \frac{g_0 L - h(\tau)}{\tau_c} - \frac{P_{in}(\tau)}{E_{sat}} [\exp(h(\tau)) - 1] \quad (12)$$

如果给定输入脉冲波形  $P_{in}(\tau)$ 和增益  $g_0 L$ , 通过求解公式(12)就可以得到, 再通过公式(9)、(10)就可以分别求得输出脉冲的波形和相位变化。脉冲的输出频谱可表示为:

$$S(\omega) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} [P_{out}(\tau)]^{1/2} \cdot \exp[i\Phi_{out}(\tau) + i(\omega - \omega_0)\tau] d\tau \right|^2 \quad (13)$$

由于对公式(12)进行直接求解十分复杂, 下面通过仿真对以上分析进行验证。

## 2 仿真结果

为了进一步观察 SPM 效应对光脉冲传输性能的影响, 采用 Optisystem 仿真软件对光脉冲通过 SOA 前后的波形和频谱特性进行了研究, SOA 参数设置如表 1 所示。

表 1 SOA 参数设置

Tab.1 Setup of SOA parameters

Name	Symbol	Value	Units
Active region length	L	0.000 5	m
Active region width	W	3e-006	m
Active region thickness	d	8e-008	m
Optical confinement factor	$\Gamma$	0.3	-
Differential gain	$A_g$	2e-020	$m^2$
Carrier density at transparency	$N_{th}$	1.4e+024	$m^3$
Initial carrier density	N	8e+024	$1/m^3$
Recombination coefficient A	A	6.8e+008	1/s
Recombination coefficient B	B	3e-016	$m^3/s$
Recombination coefficient D	D	3e-041	$m^6/s$
Linewidth enhancement factor	$\alpha$	5	-

其中, 复合系数 A、B、D 与载流子浓度 N 共同决定了载流子自发寿命  $\tau_c$  的大小, 它们之间的关系为:

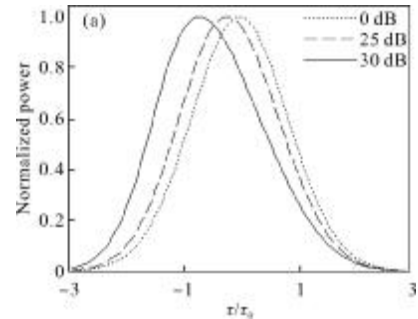
$$\tau_c = \frac{1}{A + BN + DN^2} \quad (14)$$

通常, 线性啁啾高斯脉冲的入射场可以写为:

$$A(\tau) = \sqrt{P_{in}(\tau)} \exp \left[ -\frac{(1+iC)}{2} \frac{\tau^2}{\tau_0^2} \right] \quad (15)$$

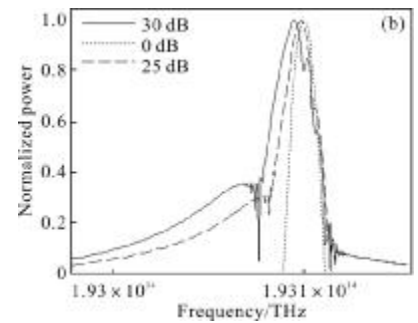
式中: C 为啁啾系数, 根据 C 值的正或负, 称高斯脉冲为正啁啾或负啁啾。C=0 表示无啁啾脉冲。

对无啁啾的高斯脉冲, 在脉冲重复速率为 10 Gb/s 时, 分别取 SOA 的放大增益为 25 dB 和 30 dB 得到的脉冲波形和频谱如图 1(a)和(b)所示。图 1(a)表明光脉冲经 SOA 放大后, 波形整体向前沿发生了“倾斜”, 而且随着 SOA 增益的提高, “倾斜”的程度明显增强。这种现象可以从 SOA 的增益饱和特性中得到解释。从公式(14)可知  $\tau_c=200$  ps, 与脉冲宽度大小相当。当脉冲前沿进入 SOA 时, 高的载流子浓度使前沿光功率迅速放大, 而功率放大的同时, 载流子浓度不断降低, 由于载流子浓度在脉冲后沿经过的时间里不能完全恢复, 因此放大的倍数也相应减小。这种脉冲



(a) 波形特性

(a) Characteristic of pulse shape



(b) 频谱特性

(b) Characteristic of pulse spectrum

图 1 无啁啾脉冲经 SOA 后波形及频谱变化

Fig.1 Shape and spectrum variation of pulse with no chirp after SOA

前沿放大倍数大, 后沿放大倍数小的特性就导致了脉冲整体波形的“倾斜”。从图 1(b)中可以看出, 脉冲的频谱较放大前也明显被展宽, 表现出严重的不对称, 说明 SOA 对脉冲引入了频率啁啾, 并且啁啾分量集中在频谱的低频部分, 即产生了红移分量。当放大倍数达到 30 dB 时, 频谱出现了双峰, 且低频分量的能量显著增强。

保持其他参数不变, 图 2 给出了带啁啾脉冲经 SOA 放大后频谱的变化特性。图 2(a)为啁啾系数  $C=2$  时的脉冲频谱。与图 1(b)相比, 啁啾的存在进一步加剧了脉冲频谱的展宽程度, 使频谱的边带部分出现了明显的震荡, 并且随着增益变大震荡结构显著增强。图 2(b)给出了在啁啾系数分别取 -2、0 和 2 时频谱的变化情况。与无啁啾和正啁啾的情况不同, 当啁啾系数  $C=-2$  时, 频谱结构明显向高频部分偏移, 即产生了蓝移分量。同时,  $C=-2$  时频谱高频部分的震荡程度要明显弱于  $C=2$  时频谱的低频部分, 这是因为负啁啾产生的蓝移分量一部分被用来抵消了 SOA 本身产生的红移分量。由此可以得出一个启

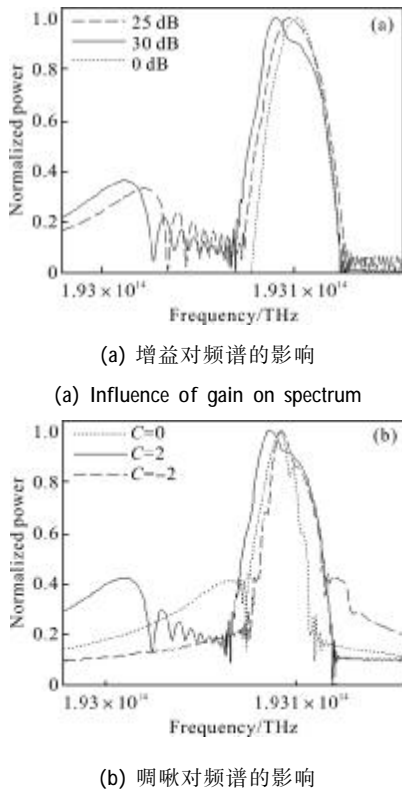


Fig.2 Spectrum variation of pulse with chirp after SOA

示: 在实际通信系统中, 可以人为地对信号引入一定的负啁啾, 只要合理调整负啁啾的大小, 就可以抵消由 SOA 放大器产生的频率红移。

其它条件保持不变, 图 3 给出了脉冲重复速率为 40 Gb/s 时光脉冲经过 SOA 放大后的波形和频谱图。与 10 Gb/s 时相比, 脉冲波形的“倾斜”程度和频谱展宽程度都明显增强, 并且当增益较高时表现得尤为突出。这是因为 40 Gb/s 脉冲的宽度只有 10 Gb/s 时的 1/4, 在  $\tau_c$  不变的情况下, 脉冲宽度相对于载流子浓度恢复的时间更短, 脉冲前沿迅速放大导致载流子浓度的急剧下降, 在脉冲后沿经过的时间载流子浓度几乎无法恢复, 因此放大倍数锐减, 导致了脉冲“倾斜”程度的加剧。

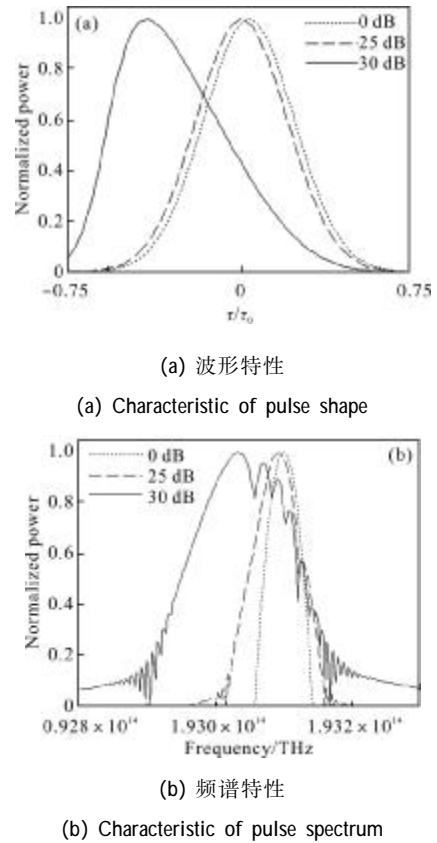


图 3 40 Gb/s 光脉冲波形及频谱变化

Fig.3 Shape and spectrum variation of pulse with 40 Gb/s bit rate

### 3 结论

目前, 利用 SOA 的高非线性实现对信号的全光处理是光通信网研究的一个重点方向。SOA 中的非线性效应主要包括 SPM、XPM、XGM 和 FWM, 利用任何一种非线性效应对光信号进行处理时都可能受

到其它效应的影响,尤其是 SPM 效应源于光信号对自身性能的调制,它对光信号的影响更是不可避免。

文中对 SOA 中 SPM 效应的产生机理进行了推导,分析了 SPM 效应对光脉冲传输性能的影响,讨论了啁啾符号对 SPM 致脉冲频谱展宽的影响。结果表明:对于无初始啁啾的光脉冲,SPM 效应使脉冲波形发生了向前沿的“倾斜”,使脉冲频谱产生了红移分量而展宽,“倾斜”和展宽的程度随 SOA 增益的提高而增强,而且这一现象在更高脉冲速率时表现得更为突出;对于带初始啁啾的光脉冲,啁啾系数的符号和大小可以影响频谱地展宽是向低频方向还是高频方向。

#### 参考文献:

- [1] Carsten Langrock, Saurabh Kumar, McGeehan J E, et al. All-optical signal processing using x2 nonlinearities in guided-wave devices[J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(7): 2579-2592.
- [2] Wang Tingyu, Yu Jinlong, Han Bingchen, et al. Multi-wavelength clock extraction based on F-P filter[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2010, 21 (8): 1138-1140. (in Chinese)  
王廷宇, 于晋龙, 韩丙辰, 等. 基于 F-P 滤波器的多波长时钟提取[J]. *光电子 激光*, 2010, 21(8): 1138-1140.
- [3] Contestabile G, Maruta A, Sekiguchi S, et al. All-optical wavelength multicasting in a QD-SOA[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2011, 47(4): 541-547.
- [4] Hui Zhanqiang. Performance analysis of semiconductor optical amplifier under double assist light injection near transparency wavelength [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39 (4): 664-670. (in Chinese)
- [5] Zhang Yi, Peng Yufeng, Wu Jianwei. Spectral characteristic of ultra short optical pulses in semiconductor optical amplifiers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 812-815. (in Chinese)  
张毅, 彭玉峰, 吴建伟. 半导体光放大器对超短光脉冲频谱特性的影响[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(6): 812-815.
- [6] Han Bingchen, Yu Jinlong, Zhang Litai, et al. Experimental research of simultaneously wavelength conversions with two independent signals based on a single semiconductor optical amplifier[J]. *Acta Optica Sinic*, 2010, 30(2): 330-334. (in Chinese)  
韩丙辰, 于晋龙, 张立台, 等. 利用单个半导体光放大器实现两个独立信号同时波长变换的实验研究 [J]. *光学学报*, 2010, 30(2): 330-334.
- [7] Vladimir S Grigoryan, Myunghun Shin, Preetpaul Devgan, et al. SOA-based regenerative amplification of phase-noise-degraded DPSK signals: dynamic analysis and demonstration [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(1): 135-142.
- [8] Leuthold J, Joyner C H, Mikkelsen B, et al. 100Gbit/s all-optical wavelength conversion with integrated SOA delayed-interference configuration [J]. *Electronics Letters*, 2000, 36 (13): 1129-1130.