

半导体光放大器的参数对慢光效应影响的研究

朱博文,覃翠*,蒋煜,许星楠

(南京工程学院 信息与通信工程学院,南京 211167)

摘要:为了分析半导体光放大器(SOA)中慢光效应,构建了基于SOA中相干布居振荡效应引起慢光现象的理论模型,分析了SOA中电流的调制频率、调制电流大小、直流电流大小、线宽增强因子以及调制电流的相移与相对相位对相位延时量的影响。分析结果表明:慢光效应可以由调制电流的大小和调制频率控制;当输入直流电流小于200 mA时,对控制SOA中的慢光效果不明显;与透明电流相比,输入的直流电流较大或较小分别得到快光、慢光;当线宽增强因子不为0时,边带信号光从快光变为慢光;当相移 $\varphi=0^\circ$ 或 90° 时一直为慢光,当相移 $\varphi=180^\circ$ 时一直为快光;改变调制电流的相对相位可以让信号在慢光和快光之间变换。

关键词:半导体光放大器;慢光;相干布居振荡

中图分类号:TN256 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2022)01-0039-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.01.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on the influence of the parameters of semiconductor optical amplifier on the slow light effect

ZHU Bowen, QIN Cui*, JIANG Yu, XU Xingnan

(School of Information and Communication Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: In order to analyze the slow light effect in semiconductor optical amplifier (SOA), a theoretical model based on the slow light phenomenon induced by the coherent population oscillation effect in SOA is constructed. The effects of current modulation frequency, modulation current, direct current, linewidth enhancement factor, phase shift and relative phase of modulation current on phase delay in SOA are analyzed. The analysis results indicate that the slow light effect can be controlled by the magnitude of the modulating current and the modulating frequency. When the input direct current is less than 200 mA, the effect on controlling slow light in SOA is not obvious. Compared with the transparent current, the input direct current is larger or smaller to obtain fast light and slow light respectively. When the linewidth enhancement factor is not zero, the sideband signal light changes from fast light to slow light. It is always slow light when phase shift $\varphi = 0^\circ$ or 90° and it is always fast light when phase shift $\varphi = 180^\circ$. Changing the relative phase of the modulating current enables the signal to be shifted between slow and fast light.

Key words: semiconductor optical amplifier, slow light, coherent population oscillation

0 引言

半导体光放大器(SOA)是全光信号处理的重要非线性器件^[1-2],近年来得到了飞速发展。然而,SOA的缺

收稿日期:2021-04-07。

基金项目:江苏省自然科学基金项目(批准号:BK20191012)资助。

作者简介:朱博文(2000—),男,本科生,现就读于南京工程学院信息与通信工程学院光电信息科学与工程专业,华为认证ICT工程师,主要研究方向为光通信与光电子器件(半导体光放大器)。

*通信作者:覃翠(1984—),女,博士,副教授,主要研究方向为光电子器件的研究和设计。



点也十分明显,主要表现在非线性不强,处理光信号速度不够快等方面,因此现在有一些学者正在研究如何提高SOA的非线性^[3-4]。在半导体介质中引入慢光是提高其非线性的方法之一^[5]。目前,慢光产生的方法有2种^[6-7]:一种是利用材料的色散效应,通过增大材料的折射率使光速变慢,这种方法是结构化的,即通过几何特性寻找一种增强非线性响应的最佳结构产生慢光;另一种是利用如电磁感应透明、相干布居振荡、喇曼和布里渊放大等非线性光学效应,以及光场和材料的相互作用,改变光场的群折射率,从而产生慢光。2种方法相比,由于相干布居振荡技术具有常温下易于

实现、结构简单等优势,因此本文基于 SOA 中的相干布居振荡产生慢光原理,研究 SOA 参考对慢光效应的影响。

1 理论模型

1.1 光场理论

在电流驱动的 SOA 中,假定注入的光信号由直流光信号 E_0 和 2 个边带光信号 E_{+1} 和 E_{-1} 组成,电流调制的 SOA 和注入光场的光谱分量如图 1 所示。通过调节 SOA 的注入电流 $I(t)$,实现半导体介质的放大和吸收特性。

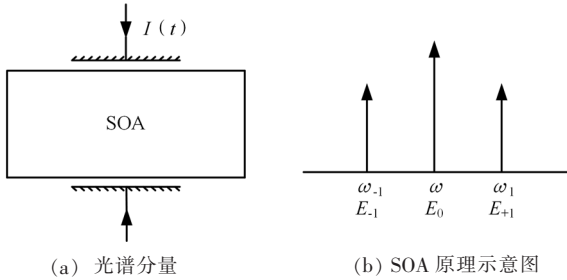


图 1 电流调制的 SOA 和注入光场的光谱分量

为了模拟半导体结构中的光场传播,需要考虑光束入射到介质上的情况。光场^[8]可以表示为:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{2} E(t) e^{-i\omega t} + \text{C.C.} \quad (1)$$

其中, ω 为光场的角频率, $E(t)$ 是缓慢变化的光场振幅, C.C. 表示复共轭, t 表示时间。假设该场由一束直流光束 E_0 和 2 个边带光信号 E_{+1} 和 E_{-1} 组成, 则 $E(t)$ 可以表示为:

$$E(t) = E_0(t) + E_{+1}(t) e^{i\delta t} + E_{-1}(t) e^{-i\delta t} \quad (2)$$

当此调制光束通过 SOA 时,电场的 3 个分量通过受激发射与半导体中的载流子相互作用。载流子浓度的调制可以使得光波之间产生拍频。当拍频足够小时,半导体中的载流子在导带和价带之间振荡,产生时间光栅,并引发直流场和边带场之间的能量交换^[9]。载流子浓度 N 的速率方程为:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{qV} - \frac{N}{\tau} - \frac{1}{2} n_{bc} \varepsilon_0 \frac{\Gamma g(N)}{h\omega_0} < |E(t)|^2 > \quad (3)$$

其中, q 是电子电荷, V 是有源区体积, Γ 是光场限制因子, ω_0 是半导体价带和导带之间的角频率, τ 是载流子寿命, c 是真空中光速, n_{bc} 是材料的折射率, $g(N)$ 是模式增益,可表示为:

$$g(N) = \alpha(N - N_t) \quad (4)$$

其中, α 是微分增益系数, N_t 是有源区的透明载流子浓度。

1.2 相干布居振荡理论

研究 SOA 的相干布居振荡时,本文将光场和偏置电流调制在相同的频率 δ ,通过调制偏置电流 $I(t)$ 产生振荡,该偏置电流可描述为:

$$I(t) = I_0 + I_{+1} e^{-i(\delta t - \Psi)} + I_{-1} e^{i(\delta t - \Psi)} \quad (5)$$

其中, I_0 为直流电流, $I_{\pm 1}$ 为调制电流, Ψ 为相对相移。假设探测光场的调制可以由调制电流的相位来表示和控制,电流与空间坐标无关。当光束经过 SOA 时,电场的 3 个分量会相互作用并产生相对相移。边带与直流光束的相互作用产生了相干布居振荡效应,造成折射率和光信号的群折射率的变化,从而产生相位的变化^[10]。此时,光场振幅 $E(t)$ 的标量波动方程可以表示为:

$$\frac{dE(t)}{dz} = \frac{1}{2} g(N) (1 - i\beta) E(t) \quad (6)$$

其中, z 是光场的传播方向, β 是线宽增强因子,求解标量波动方程可获得系统对光信号的响应。假设光信号 π 与半导体材料的跃迁能级处于共振状态,并通过缓变波包络近似得出光场的传播方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial E_0}{\partial z} = \frac{1}{2} (1 - i\beta) (g_0 E_0 - g_{-1} E_{-1} - g_{+1} E_{+1}) \\ \frac{\partial E_{+1}}{\partial z} = \frac{1}{2} (1 - i\beta) (g_0 E_{+1} - g_{-1} E_0) \\ \frac{\partial E_{-1}}{\partial z} = \frac{1}{2} (1 - i\beta) (g_0 E_{-1} - g_{+1} E_0) \end{cases} \quad (7)$$

其中,线宽增强因子 β 定义了载流子增益由直流项 g_0 与 2 个交流项 g_{-1} 和 g_{+1} 组成,则:

$$g(N) = g_0 - g_{-1} \exp(-i\delta t) - g_{+1} \exp(i\delta t) \quad (8)$$

$$g_0 = \frac{\Gamma \bar{g}}{1 + S_0 / P_{sat}} \quad (9)$$

$$g_{\pm 1} = g_0 \frac{S_{\pm 1} / P_{sat}}{1 + S_0 / P_{sat} \pm j\delta \tau} \quad (10)$$

其中, $\bar{g}$ 是线性增益, S_0 是平均光功率, $S_{\pm 1}$ 是边带光功率,饱和光功率 $P_{sat} = \frac{h\omega_0}{\Gamma \alpha \tau}$,其中 h 是普朗克常数。

1.3 基于相位延时量的慢光理论

对于半导体波导中的慢光和快光,通常用群折射率作为衡量参数,可以表示为:

$$v_g = \frac{c}{n_u} \quad (11)$$

$$n_u = n_{bu} + \omega \frac{dn_{bu}}{d\omega} = n_{bu} + \Delta n_u \quad (12)$$

其中, v_g 是波导中的群速度, n_u 为群折射率。可以看出,群速度与群折射率成反比,即群折射率越大,群速度越小。群折射率由材料固有折射率 n_{bu} 和因相干布居振荡等效引起折射率的变化量 Δn_u 两部分组成。而

Δn_0 可以由相位延时量体现:

$$\Delta n_0 = \frac{c}{L} \Delta t = \frac{c}{L} \frac{\varphi}{\delta} \quad (13)$$

其中, Δt 是传播时间, L 是波导的长度, φ 是光波相位延时量。从式(13)可知群折射率的变化与相位的变化成正比。慢光和快光效应可以通过对调制信号 $E_{\pm 1}$ 的幅度和相位探测得到。

2 结果与讨论

本文基于上述理论模型研究 SOA 参数对慢光和快光效应的影响。理论模型中, 光场限制因子 $\Gamma=0.5$, 有效载流子寿命 $\tau=300$ ps, SOA 的长度 $L=0.3$ mm, 增益系数 $\alpha=3 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 。

2.1 调制频率和相对相位对相位延时量的影响

当线宽增强因子 $\beta=0$ 、直流电流 $I_0=100$ mA 和 $I_{+1}=I_{-1}=5$ mA 时, 输出信号的相位延时量随着调制频率的变化如图 2 所示。可以看出, E_{+1} 、 E_{-1} 这 2 条曲线呈现对称形状, 这是由于式(7)中的边带信号传播方程是共轭方程, 导致相位相反。方程右边第二项体现了四波混频效应, 正是由于四波混频效应导致相干布居振荡, 从而产生慢光与快光现象。当线宽增强因子 $\beta=0$ 、角频率 $\omega_0=\delta\tau$ 时, 相位的延时量正比于 $\delta\tau/[\omega_0^2+(\delta\tau)^2]$, 并产生共振, 得到相位延时量的最大值。

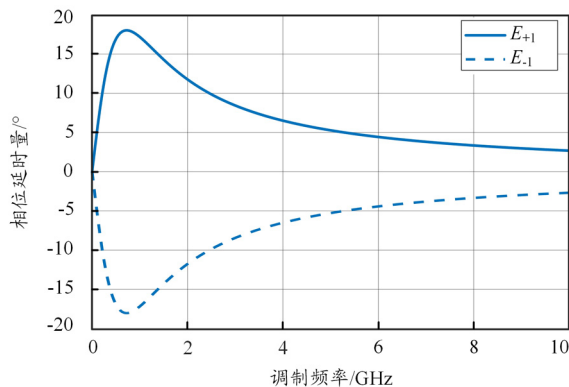


图 2 相位延时量随着调制频率的变化

对于不同的调制频率, 光信号的相位延时量随着相对相位的变化如图 3 所示。可以看出, 随着相对相位的增大, 相位延时量呈现类似正弦波的变化规律。当调制频率 $\delta=0$ 时, 相位延时量曲线呈现关于 $\varphi=0^\circ$ 对称的状态, 并且相位延时量随相对相位的变化量最大。当调制频率逐渐增大时, 曲线的变化幅度逐渐减小。由此可见, 较低的调制频率更有利于对慢光和快光进行控制; 同时, 改变相对相位可以让信号在慢光和快光之间变换。

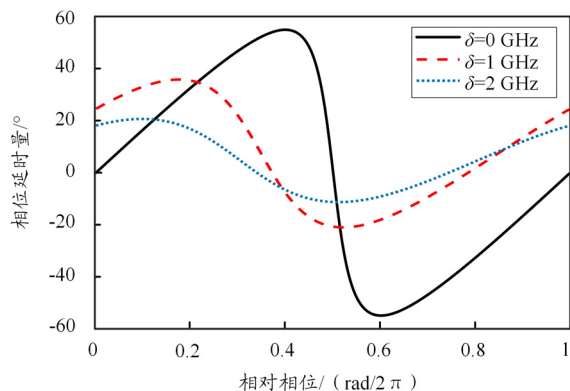


图 3 对于不同的调制频率, 光信号的相位延时量随着相对相位的变化

2.2 调制电流大小对相位时延的影响

在线宽增强因子 $\beta=0$ 、直流电流 $I_0=100$ mA 和输入不同大小的调制电流情况下, 输出信号的相位延时量随着调制频率的变化如图 4 所示。可以看出, 随着调制频率的增大, 相位延时量曲线呈现先上升后下降的变化规律, 最大的相位延时量大约出现在调制频率为 1 GHz 处; 同时, 最大的相位延时量随着调制电流增大而增大。由此可见, 慢光效应可以由调制电流的大小和调制频率控制。

对于不同的输入调制电流, 相位延时量随着直流电流大小的变化如图 5 所示。可以看出, 随着注入的

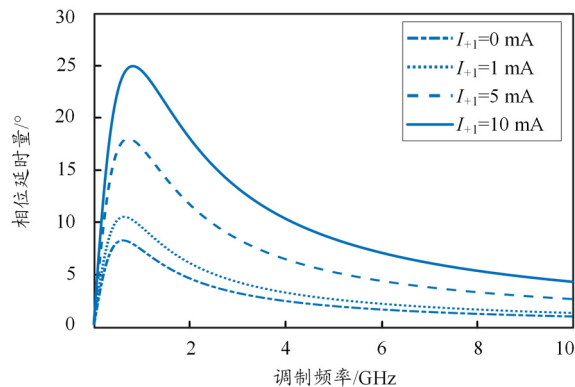


图 4 对于不同的调制电流, 相位延时量随着调制频率的变化

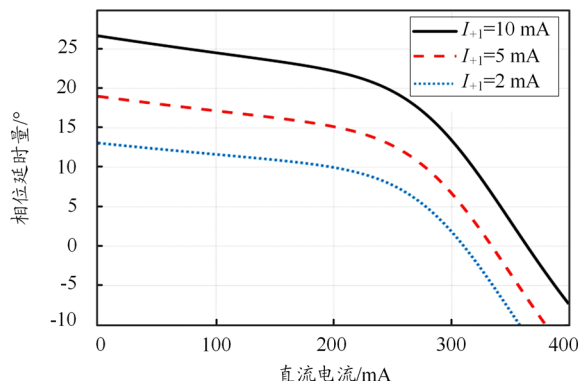


图 5 对于不同的调制电流, 相位延时量随着直流电流大小的变化

直流电流变大,相位延时量呈现逐渐变小的趋势;在相同的直流电流下,随着输入的调制电流变大,所得到的相位延时量也变大;对于不同的调制电流,使得相位延时量为零的电流也不一样,即透明电流不一样,随着调制电流增大,透明传输电流也增大。当输入的直流电流小于透明传输电流时,相位延时量是正数,即得到的是慢光;当输入的直流电流大于透明传输电流时,相位延时量是负数,即得到的是快光。

2.3 直流电流大小对相位时延的影响

在假设调制频率为定值 1 GHz 时,作相位延时量随着调制电流大小变化的曲线图,如图 6 所示。可以看出,随着注入的调制电流变大,得到的相位延时量也逐渐变大。当输入的直流 I_0 小于 300 mA 时,即输入的直流低于透明传输电流,相位延时量都是正数,得到的是慢光;当输入的直流 I_0 大于 300 mA 时,在低的调制电流处相位延时量是负数,随着调制电流增大,相位延时量逐渐增大为正数,即光信号由快光转变为慢光。同时,当直流电流 I_0 小于 200 mA 时,相位延时量随着注入调制电流的大小变化不大。因此,将直流电流调节到低于 200 mA,对控制 SOA 中的慢光和快光效果不明显。

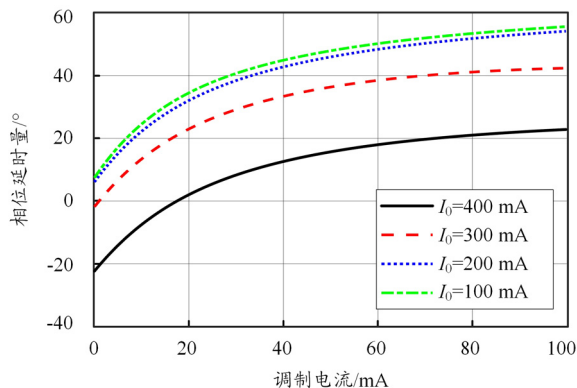


图 6 对于不同的直流电流,相位延时量随着调制电流大小的变化

2.4 线宽增强因子对相位时延的影响

对于不同的线宽增强因子,直流光信号和边带光信号的相位延时量随着调制频率的变化如图 7 所示。当线宽增强因子 $\beta=0$ 时,直流光信号的相位延时量 $\varphi=0$,不随调制频率发生变化,2 个边带光信号呈现对称的相位变化关系;当线宽增强因子 $\beta \neq 0$ 时,直流光信号和 2 个边带光信号的相位延时量整体上移,直流光信号的相位延时量 $\varphi \neq 0$,2 个边带光信号的相位延时量不再是对称关系;另外,信号光 E_1 的相位延时量由负值变为正值,即此边带信号光从快光变为慢光。

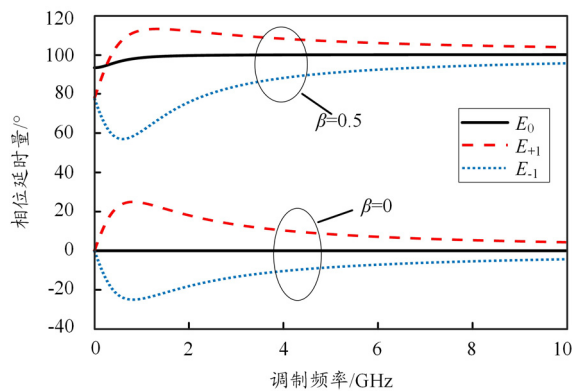


图 7 对于不同的线宽增强因子, E_0 、 E_{+1} 和 E_{-1} 光信号的相位延时量随着调制频率的变化

2.5 调制电流相移对相位时延的影响

对于不同调制电流的相移 Ψ ,光信号的相位延时量随着调制频率的变化如图 8 所示。可以看出,随着调制频率的增大,当 $\Psi=0^\circ$ 和 $\Psi=90^\circ$ 时,相位延时量呈先增大后缓慢减小的现象;当 $\Psi=180^\circ$ 时,相位延时量先迅速减小后缓慢上升。对于不同的 Ψ ,随着调制频率的不断升高,相位延时量都将趋于 0,因此调制频率过高将失去对慢光和快光控制作用。当 $\Psi=0^\circ$ 或 90° 时,相位延时量恒为正值,即一直为慢光;当 $\Psi=180^\circ$ 时,相位延时量恒为负值,即一直为快光。

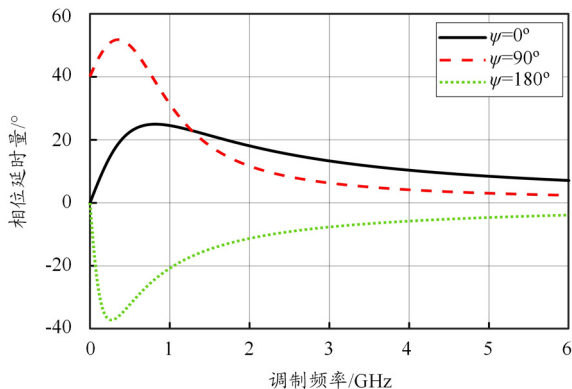


图 8 对于不同的相移 ψ ,光信号的相位延时量随着调制频率的变化

3 结束语

本文构建了 SOA 相干布居振荡的非线性效应引起慢光效应的数值分析模型,证明了 SOA 中高阶非线性效应对光和物质间的相互作用有着重要的影响。通过调节 SOA 中电流的调制频率、调制电流大小、直流电流大小和线宽增强因子等参数可以改变相位延时量,从而证明在 SOA 中慢光效应可以由调制电流的大小、调制频率和直流电流大小等参数控制。当调制电

流较大且调制频率为 1 GHz 时,可以得到较大的相位延时量;当直流电流较大时,利用直流电流大小来调节慢光和快光的相位延时量的效果更明显。另外,控制相对相位可以实现信号在慢光和快光之间转换。

参考文献:

- [1] ZOU X H, ZHANG S J, WANG H, et al. Microwave photonic harmonic down-conversion based on cascaded four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10 (1): 5500308-1-5500308-6.
- [2] ZHAN W H, ZHOU P, ZENG Y X, et al. Optimization of modulation canceling reflective semiconductor optical amplifier for colorless WDM transmitter applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(2): 274-279.
- [3] QIN J. Simultaneous multichannel wavelength multicasting and XOR logic gate multicasting for three DPSK signals based on four-wave mixing in quantum-dot semiconductor optical amplifier [J]. Optics Express, 2014, 22(24): 29413-29423.
- [4] MARINA Z, BENJAMIN L, KATHY L. Four-wave mixing in quantum-dot semiconductor optical amplifiers: a detailed analysis of the

朱博文,覃翠,蒋煜,等:半导体光放大器的参数对慢光效应影响的研究

- nonlinear effects [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(6): 300112-1-300112-12.
- [5] SAEED A, HASSAN K, BAHRAM C. Analysis and simulation of strained quantum wells slow light devices according to V-type EIT [C] //ICEE. Proceedings of 2017 Iranian Conference on Electrical Engineering. Tehran: ICEE, 2017: 298-301.
- [6] TRINES R, ALVES E P, WEBB E, et al. New criteria for efficient Raman and Brillouin amplification of laser beams in plasma [EB/OL]. [2021-04-07]. <https://www.nature.com/articles/s41598-020-76801-z>.
- [7] ZHANG X J, WANG H H, WANG L, et al. Optically tunable gratings based on coherent population oscillation[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 193903-193314.
- [8] DUIL S O, O'DOWD R F, EISENSTEIN G. On the role of high-order coherent population oscillations in slow and fast light propagation using semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(3): 578-584.
- [9] 王甫. 基于相干布居振荡的有源介质中快慢光研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.
- [10] 王宝珠,李文娟,彭凯,等. 基于时间序列分析的光栅信号时域细分方法[J]. 纳米技术与精密工程,2018(1):48-53.