

文章编号:1004-4213(2011)01-0041-4

基于半导体光放大器的慢光研究*

胡苗苗,王肇颖,杨天新,贾东方

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院;教育部光电信息技术科学重点实验室,天津 300072)

摘 要:根据半导体光放大器中四波混频效应产生的等效折射率光栅理论,利用调制折射率和载流子寿命的物理现象模型推导并分析了信号光延时量与半导体光放大器注入电流、泵浦光入射功率、泵浦光与信号光的频率失谐量之间的定量关系,并采用半导体光放大器分段模型的方法进行了数值模拟.相比于目前从降速因子的角度定性分析频率失谐量对延时效果影响的方法而言,本文可以将延时量同实际实验中可控参量直接联系起来,对于指导实验更具有可操作性,并且分段模型的方法具有更高的精确性,通过与现有实验结果对比证明该计算结果与实验结论一致.

关键词:慢光;四波混频;等效光栅;调制折射率;半导体光放大器

中图分类号:TN25

文献标识码:A

doi:11.3788/gzxb20114001.0041

0 引言

光通信网络中交换节点处需进行光电转换完成信息处理,这样不仅丢失光信号的相位和偏振信息,而且受光电转换速率极限的制约,交换速率与传输速率严重不匹配,因此急需采用全光存储技术直接对光信号进行存储与处理.光信号的传输时间由群速度和传输距离的乘积决定,因此实现光存储的思路有两种:一种是光纤延时线,即在延长传输距离的基础上进行缓存,延时量的增加是以牺牲脉冲信号的质量为代价的;另一种是慢光技术,即利用慢光介质降低光信号的群速度,它可以避免色散、损耗、偏振等光纤传输问题.就目前国际上研究慢光的热点技术来看,产生慢光的介质主要有以下几种:1)以光纤为慢光产生介质,利用光纤中的受激布里渊散射和受激喇曼散射效应实现慢光^[1-3].这种方法可以获得较大的相对延时量,但受激布里渊散射效应产生的慢光带宽窄,一般只在~MHz水平,而受激喇曼散射效应所需泵浦光功率很高.2)以掺镨硅酸钇、红宝石等晶体材料为慢光产生介质,利用相干布居振荡的方法产生慢光.人们在掺镨硅酸钇晶体中观测到群速度 33 m/s 的光,甚至还可以将光速减到零,但这些实验是在近 5 K 的温度下做出的,没有实际应用意义^[4].3)以谐振环、波导光栅、光子晶体、半导体量子点(阱)等作为慢光产生介质,利用材料独特

的光子带隙特性控制光子的运动状态来获得慢光^[5-9].这种方法是慢光技术上的一次突破,但目前这类器件的制备工艺不成熟,制备难度极高且成本昂贵,不易与光纤系统兼容.4)以半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)为慢光产生介质,利用四波混频(Four Wave Mixing, FWM)非线性效应形成的等效光栅产生慢光^[10-12].这种方法能同时实现对延时量的电控、光控,且延时量可调、慢光效应带宽宽、环境稳定性高、便于集成、成本低等优点.2007年,美国 Berkeley 大学的 B. Pesala 利用级联结构的 SOA 对 600 fs 脉冲进行时间延时,延时时间达 1.1 ps^[11].因此用 SOA 构建的慢光系统是未来光存储器和信息处理的有力竞争者.但目前已有的理论研究仅仅从降速因子的角度定性地分析了在 SOA 中能够产生慢光^[13],尚没有将延时量与实际实验物理量紧密联系的理论分析.

本文主要从四波混频效应引起的调制折射率和载流子寿命的物理模型角度考虑,分析推导出信号光延时量与外界可控参量(半导体光放大器的注入电流、信号光和泵浦光的频率失谐量、泵浦光功率)之间的关系式,并数值模拟分析出信号光延时量随频率失谐量的减小而增加,随电流、泵浦功率的增加而增加,但是当电流增大到一定程度后延时量并没有明显的变化,继续增大电流反而会降低延时量的结论.并且通过与实验结果相比发现本文的结论与

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No. 2010CB327806)和天津市应用基础及前沿技术研究计划(No. 08JCYBJC10100)资助

第一作者:胡苗苗(1986—),女,硕士研究生,主要研究方向为光通信领域中的慢光技术、多波长光源等. Email: humiaomiao68@163.com

导师:王肇颖(1977—),女,副教授,主要研究方向为光纤非线性光学及传感网络中的扫描多包场光源等. Email: wangzy@tju.edu.cn

收稿日期:2010-08-10;修回日期:2010-10-22

实际情况一致,与从降速因子的角度定性分析的方法相比具有更加直接的理论指导意义.

1 基于 SOA 四波混频效应的慢光产生原理

SOA 的非线性系数约为普通光纤的 10^9 倍,为光子晶体光纤的 10^7 倍,在一定条件下,SOA 中的非线性效应比较明显,尤其是四波混频,当两束偏振方向平行的光注入 SOA 中,强光束作为泵浦光,弱光束作为信号光,频率分别为 ω_p 和 ω_s ,泵浦光和信号光的频率失谐量 $\Delta\omega = \omega_s - \omega_p$. 由于 FWM 效应,

当 $\Delta\omega \sim \text{GHz}$ 量级时,强泵浦光和弱信号光的频率失谐量 $\Delta\omega$ 可以对载流子浓度进行调制,产生等效的动态载流子浓度光栅(其效率由载流子寿命 τ_s 决定)和等效增益光栅. 由于 SOA 载流子浓度与有效折射率具有相关性,动态的载流子浓度光栅引起 SOA 增益介质产生等效调制折射率光栅,又因折射率与群速度的关系为

$$v_g = \frac{c}{n_g} = \frac{c}{n(\omega) + \omega dn/d\omega} \quad (1)$$

折射率或者折射率变化率突然增大时导致光群速度突然减小,产生慢光. 调制折射率^[14]可以表示为

$$n_{\text{mod}} = n_{\text{gb}} + c\tau_s \Gamma g_0 \frac{P/P_{\text{sat}}}{1 + P/P_{\text{sat}}} \cdot \frac{1}{(\Delta\omega\tau_s)^2 + (1 + P/P_{\text{sat}})^2} \quad (2)$$

调制折射率的平均值为

$$\bar{n}_{\text{mod}} = n_{\text{gb}} + \frac{c\tau_s}{L} \frac{(P(L) - P(0))}{P(L) + P(0) + \frac{P(L)P(0)}{P_{\text{sat}}} + [(\Delta\omega\tau_s)^2 + 1]P_{\text{sat}}} \quad (3)$$

由于 SOA 的载流子寿命会随着注入电流的增加而急剧减小,因此我们设定载流子寿命满足

$$\tau_s = \tau_{s0} \exp(-I/I_{\text{ref}}) \quad (4)$$

式中, τ_{s0} 、 I_{ref} 为参考载流子浓度和参考电流. 最后,得到信号光的延时量为

$$\Delta t = \tau_{s0} \exp(-I/I_{\text{ref}}) \frac{(P(L) - P(0))/P_{\text{sat}}}{(\Delta\omega\tau_{s0})^2 \exp(-2I/I_{\text{ref}}) + 1 + \frac{(P(L) + P(0))}{P_{\text{sat}}} + \frac{P(L)P(0)}{P_{\text{sat}}^2}} \quad (5)$$

式中, n_{gb} 为背景折射率, P_{sat} 为饱和光功率, $P(0)$ 为输入光功率, $P(L)$ 为输出光功率.

2 数值模拟及分析

为了使理论计算结果更为精准,本文利用 SOA 分段模型的方法进行数值模拟. 采用的 SOA 的典型参数值如表 1, 泵浦光波长为 1 550 nm, 信号光输入功率为 0 dBm, 根据式(2)得到调制折射率与频率失谐量之间的关系如图 1.

表 1 SOA 的典型参量

Table 1 The typical parameters of SOA

Parameters	The values
The length(L/mm)	0.5
The width($W/\mu\text{m}$)	2
The height($H/\mu\text{m}$)	1.5
The overlap factor(Γ)	0.35
The line width enhancement factor(a)	0
The background refractive index(n_{gb})	3.5
The transparent carrier density(N_t/m^3)	1.1×10^{24}
The initial carrier density (N_0/m^3)	3.0×10^{24}
The reference current(I_{ref}/mA)	200
The reference carrier lifetime(τ_{s0}/ps)	30

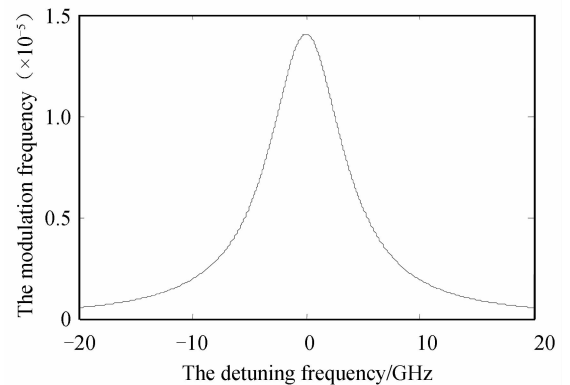


图 1 调制折射率与频率失谐量的关系

Fig. 1 The relationship of the modulation refraction and the detuning frequency

从图 1 中可以发现当频率失谐量趋于 0 时,调制折射率的变化率很大;频率失谐量小于 0 时,调制折射率的变化率为正,根据群速度的表达式可知信号光经过 SOA 时群速度会减慢.

根据式(4)可知,通过改变外界可控参量:SOA 的注入电流、输入泵浦光功率以及泵浦光与信号光的频率失谐量均可以实现信号光的延时可调(以下讨论中频率失谐量均代表其绝对值大小). 图 2 反映了在信号光功率为 -11 dBm、泵浦光与信号光的频

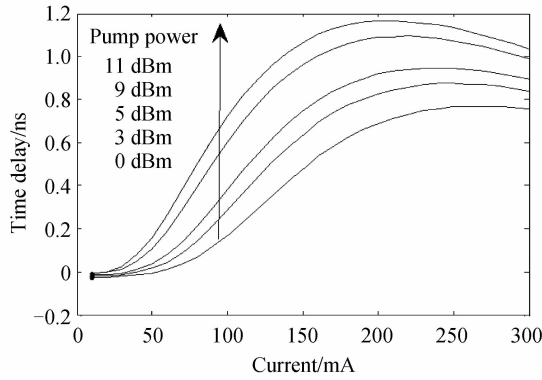


图2 信号光延时量随 SOA 注入电流的变化曲线模拟图
Fig.2 The relationship of the prober light delay time with the variation of current of SOA at different pump powers

率失谐量为 3 GHz 的情况下,泵浦光输入光功率 0 dBm、3 dBm、5 dBm、9 dBm、11 dBm 时,信号光的延时量随 SOA 的注入电流的变化曲线。

从图 2 中可以发现,随着 SOA 电流增加慢光延时量增大,但是当电流达到一定值后延时量反而减小.这是由于电流过大后,消耗的载流子过多,使 SOA 无法恢复原始载流子浓度状态,导致平均载流子寿命急剧减小.而载流子浓度调制光栅与载流子寿命相关,因此对应的延时量会相应减小.

图 3 反映了在信号光输入功率为 -9 dBm、SOA 注入电流为 200 mA 的情况下,泵浦光输入功率分别为 -3 dBm、0 dBm、3 dBm、5 dBm、9 dBm 时,信号光的延时量随频率失谐量的变化曲线。

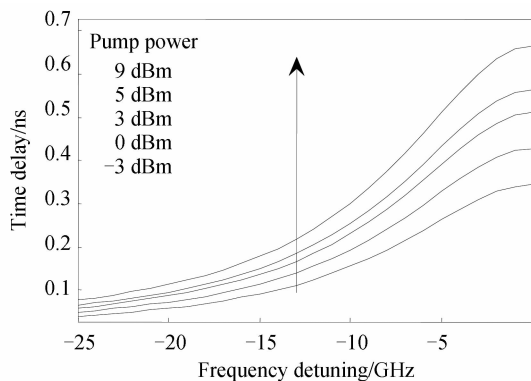


图3 信号光延时量随频率失谐量的变化曲线模拟图
Fig.3 The dependence of the prober light delay time on the variation of detuning frequency at different pump powers

从图 2 和图 3 中可以发现在同一频率失谐量的情况下,延时量随着泵浦光功率的增加而增加,从而可以通过改变泵浦光功率实现对慢光延时量的光控.另一方面,改变 SOA 注入电流的大小也可以实现对延时量大小的控制,实现延时的电控.从模拟曲线中可以得到以下几点结论:1)信号光延时量随 SOA 注入电流增加而增大,当增大到一定程度后不会继续增加;2)信号光延时量随着泵浦功率的增加而增大;3)信号光延时量随着泵浦光与信号光频率

失谐量的增加而减小.

为了对以上理论模拟结果的正确性进行验证,我们将其与已有实验研究数据^[15]进行对比,如图 4 和图 5 所示,这些结论同样可以在实验中得到验证.

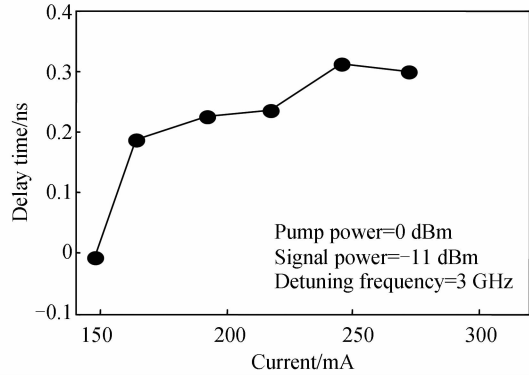


图4 信号光延时量随 SOA 注入电流的变化曲线实验图
Fig.4 Time delay as a function of SOA bias when the pump power was 0 dBm

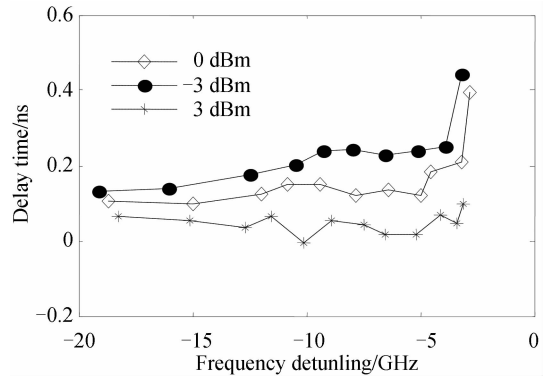


图5 信号光延时量随频率失谐量的变化曲线实验图
Fig.5 Delay curves for different pump powers when the probe power was -9 dBm and the current of SOA was 200 mA

从图中可以看出实验结果与理论模拟结果是完全一致的.

3 结论

本文对基于 SOA 四波混频效应的慢光从电控、光控、延时可变的角进行了数值模拟,对延时量与泵浦功率、SOA 注入电流和频率失谐量之间的关系进行了分析,并与已有实验结果进行了对比,本文利用 SOA 分段模型的方法数值模拟延时量与可控外界参量的关系比从降速因子的角度定性分析慢光延时量更具有精确性和实际指导意义.

参考文献

[1] ZHU Zhang-ming, ANDREW M C D, DANIEL J G, et al. Broadband SBS slow light in an optical fiber [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(1): 201-205.
[2] KIEN F L, LIANG J Q, HAKUTA K. Slow light produced by far-off-resonance Raman scattering [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, 9(1): 93-101.
[3] CALDERON O G, MELLE S, ANTON M A, et al. Propagation-induced transition from slow to fast light in highly

- doped erbium fibers [J]. *Physical Review A*, 2008, **78**(5): 053812.
- [4] TURUKHIN A V, SUDARSHANAM V S. Observation of ultraslow and stored light pulses in a solid [J]. *Physical Review Letters*, 2002, **88**(2): 023602.
- [5] CHANG S W, CHUANG S L. Slow light using excitonic population oscillation [J]. *Physical Review B*, 2004, **70**(23): 235333.
- [6] POVINELLI M, JONSON S, JOANNOPOULOS J. Slow-light, band-edge waveguides for tunable time delays [J]. *Optics Express*, 2005, **13**(18): 7145-7159.
- [7] LU Shu-yuan, ZHAO Jian-lin, ZHANG Dong. Slow light transmission in two-dimension square photonic crystal waveguide [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2555-2557.
吕淑媛, 赵建林, 张栋. 二维正方光子晶体波导中的慢光传输 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 2555-2557.
- [8] HOPMAN W C L, HOEKSTRA H J W M, DEKKER R, *et al.* Far-field scattering microscopy applied to analysis of slow light, power enhancement, and delay times in uniform Bragg waveguide gratings [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(4): 1851-1870.
- [9] PENG P C, LIN C T, KUO H C, *et al.* Tunable slow light device using quantum dot semiconductor laser [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(26): 12880-12886.
- [10] USKOV A V, HASNAIN C C. Slow and superluminal light in semiconductor optical amplifiers [J]. *Electronics Letters*, 2005, **41**(16): 55-56.
- [11] PESALA B, SEDGWICK F G, USKOV A V, *et al.* Tunable slow light and fast light of ultra-short pulse in semiconductor optical amplifiers [J]. *OSA*, 2007, STuA2.
- [12] MATSUDAIRA A, NIELSEN D, PESALA B, *et al.* Multiple bits slow light by cascading semiconductor optical amplifier in a loop configuration [J]. *Nano-Optoelectronics Workshop*, 2008, **2**(15): 297-298.
- [13] ZHANG Yin, ZHANG Xin-liang, HUANG Xi. Experimental investigation on slow light via four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers [J]. *SPIE*, 2009, 72791T-1.
- [14] MORK JESPER, KJAER RASMUS, POEL MIKEVAN DER, *et al.* Slow light in a semiconductor waveguide at gigahertz frequencies [J]. *Optics Express*, 2005, **13**(20): 8136-8145.
- [15] PESALA BALA, CHEN Zhang-yuan, ALEXANDER V, *et al.* Experimental demonstration of slow light in semiconductor optical amplifiers [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(26): 12968.

Slow Light Based on Semiconductor Optical Amplifier

HU Miao-miao, WANG Zhao-ying, YANG Tian-xin, JIA Dong-fang

(Key Laboratory of Opto-electronics Information and Technical Science (Ministry of Education),

College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In the semiconductor optical amplifier, based on the theory of four wave mixing effect and refractive modulation-index generated by equivalent grating, dynamic changes of the signal light time delay with the outside controllable parameters, such as the injection current into semiconductor optical amplifier (SOA), the pump light power, the detuning frequency between pump light and signal light, were numerically simulated by the method of subsections model of SOA. Compared with the former simulation of slow light from the slow down factor view, this method has the advantage of associating the signal time delay with outside controllable parameters and providing the intuitional guide for the experiment. Meanwhile, the method by subsections model of SOA has higher accuracy. Compared with the existing experimental results, it indicates that the numerically simulated results agree well with the measurements.

Key words: Slow light; Four wave mixing; Equivalent grating; Refractive modulation-index; Semiconductor optical amplifier