光子和光电子集成专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022032102

辅助光注入下半导体光放大器的快慢光性能

覃　翠*，蒋　煜，甄　理

（南京工程学院 信息与通信工程学院，南京 211167）

摘　要： 随着全光网络的快速发展，快慢光技术受到了广泛关注。为了研究半导体光放大器（SOA）的快慢光效应，文章构建了辅助光注入半导体光放大器的理论模型。比较了辅助光注入SOA前后，直流电流、调制电流、调制频率、相移以及增益系数等参数对相位延时量的影响。仿真结果表明：辅助光的注入使输出信号光由慢光变为快光，辅助光功率越强，效果越明显。同时，注入辅助光信号后，直流电流越大，相位延时量越大；调制电流、调制频率、相移及增益系数越大，相位延时量越小。

关键词： 半导体光放大器；辅助光；快慢光

中图分类号： TN256　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0311－05

Performance of Fast and Slow Light in Semiconductor Optical Amplifier under Assist Light Injection

QIN Cui, JIANG Yu, ZHEN Li

(School of Information and Communication Engin., Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, CHN)

Abstract: With the rapid development of all-optical networks, fast and slow light technology has gained widespread attention. In this paper, a theoretical model of assist light injection into semiconductor optical amplifier (SOA) was constructed to study the fast and slow light effect. The effects of the gain coefficient and the magnitude of DC current, modulation current, modulation frequency and phase shift on the phase delay with and without the injection of assist light were compared. The simulation results show that the output signal light changes from slow light to fast light under the injection of assist light, and the stronger the assist light power, the more obvious the effect. Meanwhile, it can be observed that after the injection of the assist light signal, the larger the DC current, the larger the phase delay. On the contrary, the larger the modulation current, modulation frequency, phase shift and gain coefficient, the smaller the phase delay.

Key words: semiconductor optical amplifier; assist light; fast and slow light

0　引言

在光通信网络的信息处理中使用全光网络，就是信号仅仅在进出网络时进行光电转换，在网络中传输和交换时始终以光的形式存在[1]，在传输过程中没有电的处理，因此不受原有网络中电子设备响应速度的影响[2]。在传输的物理路径中，光放大器会补偿因光纤造成的光信号衰减，同时也会带来额外噪声并劣化光信号。快慢光效应是利用某种物理机理调控光信号的群延时，在光域中实现高速信号的快速、精确同步，避免了信号在电域内完成同步后的电光转换过程，是全光信号处理的关键技术之一[3]。慢光技术利用光纤、晶体材料、半导体等作为介质来降低光信号的群速度，可以解决色散损耗等光纤在传输中出现的问题[4]。因此，在半导体中引入快慢光，通过快慢光效应增强半导体中的非线性效应，减少传输损耗。半导体光放大器（SOA）是一

收稿日期：2022－03－21.

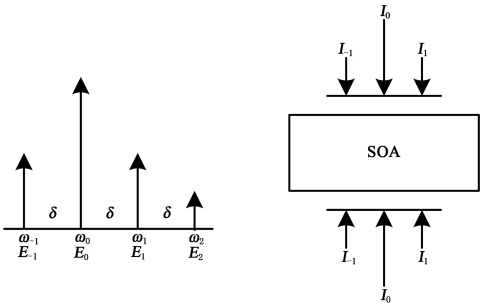
基金项目：江苏省自然科学青年基金项目（BK20191012）.

*通信作者：覃　翠　　E-mail：qincui@njit.edu.cn

种把发光器件作为放大装置使用的器件，以半导体为增益介质，能够对小信号光进行功率放大并且不明显降低其他光学指标。本文以 SOA 为介质，利用相干布居振荡效应(CPO)引起快慢光现象，计算中考虑了四波混频效应的作用[5-6]，将辅助光注入 SOA，分析辅助光对 SOA 快慢光性能的影响。

1 理论模型

本文使用以电流驱动的 SOA，假设注入四束光信号，分别为直流光信号 E_0，边带光信号 E_{-1}，E_1 和辅助光信号 E_2，且相邻光信号的角频率相差 δ。因此，注入该 SOA 光场的光谱分量和电流 $I(t)$ 如图 1 所示。



(a) 注入光场光谱含量 (b) 注入 SOA 电流

图 1 注入光场的光谱分量和注入 SOA 的电流

当光束 $\varepsilon(t)$ 入射 SOA 上，光场可以用式(1)表示[7]：

$$\varepsilon(t)=\frac{1}{2}E(t)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega t}+c.c. \tag{1}$$

其中，$E(t)$ 为缓慢变化的振幅，ω 为光场的角频率，t 为时间，$c.c.$ 为复共轭。而 $E(t)$ 是由一个强直流光束 E_0，两个较弱边带光束 E_{-1} 和 E_1，以及辅助光束 E_2 组成，相邻光束之间的角频率均为 δ，则 $E(t)$ 可表示为

$$E(t)=E_0(t)+E_{-1}(t)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\delta t}+E_1(t)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\delta t}+E_2(t)\mathrm{e}^{-2\mathrm{i}\delta t} \tag{2}$$

而载流子浓度 N 的速率方程为

$$\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t}=\frac{I}{qV}-\frac{N}{\tau}-\frac{1}{2}n_{\mathrm{bg}}c\varepsilon_0\frac{\Gamma g(N)}{\hbar\omega_0}|E(t)|^2 \tag{3}$$

其中，I 为注入电流，q 为电子电荷，V 为有源区体积，N 为载流子浓度，τ 为载流子寿命，n_{bg} 为材料的背景折射率，c 为真空中的光速，ε_0 为真空介电常数，Γ 为光场限制因子，$\hbar\omega_0$ 为光子能量，$g(N)$ 为模式增益：

$$g(N)=\alpha(N-N_{\mathrm{t}}) \tag{4}$$

其中，α 为微分增益系数，N_{t} 为有源区透明载流子浓度。$|E(t)|^2$ 可以表示为

$$\begin{aligned}|E(t)|^2=&|E_0|^2+|E_{-1}|^2+|E_{-1}|^2+|E_2|^2+\\&(E_{-1}E_0^*+E_0E_1^*+E_1E_2^*)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\delta t}+(E_{-1}^*E_0+E_0^*E_1+\\&E_1^*E_2)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\delta t}+(E_{-1}E_1^*+E_0E_2^*)\mathrm{e}^{2\mathrm{i}\delta t}+(E_{-1}^*E_1+\\&E_0^*E_2)\mathrm{e}^{-2\mathrm{i}\delta t}+E_{-1}E_2^*\mathrm{e}^{3\mathrm{i}\delta t}+E_{-1}^*E_2\mathrm{e}^{-3\mathrm{i}\delta t}\end{aligned} \tag{5}$$

注入电流可以表示为

$$I(t)=I_0+I_{-1}\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\delta t-\Psi)}+I_1\mathrm{e}^{-\mathrm{i}(\delta t-\Psi)} \tag{6}$$

其中，I_0 为直流电流，$I_{-1,1}$ 为调制电流，Ψ 为相移。当光束经过 SOA 时，电场的四个分量会相互作用而产生相对相移。直流光束、边带光束、辅助光束之间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。

光场 $E(t)$ 的标量波动方程为[8]

$$\frac{\mathrm{d}E(t)}{\mathrm{d}z}=\frac{1}{2}g(N)(1-\mathrm{i}\beta)E(t) \tag{7}$$

其中，β 为线宽增强因子。同时，载流子浓度可以表示为

$$N(t)=N_0+N_{-1}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\delta t}+N_1\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\delta t}+N_2\mathrm{e}^{-2\mathrm{i}\delta t} \tag{8}$$

其中，N_0 是静态载流子浓度，$N_{-1,1,2}$ 是相应边带及辅助光的载流子群振荡幅度。与式(3)联立可得出以下载流子密度振幅表达式：

$$N_0=N_{\mathrm{t}}\frac{R_0+q_0}{1+q_0} \tag{9}$$

$$N_1=N_{\mathrm{t}}\frac{R_1\mathrm{e}^{\mathrm{i}\Psi}-(R_0-1)q_1}{\omega_{\mathrm{c}}-\mathrm{i}\delta\tau} \tag{10}$$

$$N_{-1}=N_{\mathrm{t}}\left[\frac{R_{-1}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\Psi}-R_1q_2^*}{\omega_{\mathrm{c}}+\mathrm{i}\delta\tau}-\frac{(R_0-1)q_1^*}{\omega_{\mathrm{c}}+\mathrm{i}\delta\tau}\right] \tag{11}$$

$$N_2=-N_{\mathrm{t}}\left[\frac{R_{-1}q_3+R_1q_1}{\omega_{\mathrm{c}}-2\mathrm{i}\delta\tau}-\frac{(R_0-1)q_2}{\omega_{\mathrm{c}}-2\mathrm{i}\delta\tau}\right] \tag{12}$$

其中，$\omega_{\mathrm{c}}=1+q_0$，将归一化电流 $R_{0,-1,1}$ 和饱和功率 P_{sat} 定义为

$$R_{0,\pm1}=\frac{\tau}{qVN_{\mathrm{t}}}I_{0,\pm1} \tag{13}$$

$$P_{\mathrm{sat}}=\frac{\hbar\omega_0}{\Gamma\alpha\tau} \tag{14}$$

将归一化光功率定义为

$$q_0=\frac{n_{\mathrm{bg}}c\varepsilon_0}{2P_{\mathrm{sat}}}(|E_0|^2+|E_1|^2+|E_{-1}|^2+|E_2|^2) \tag{15}$$

$$q_1=\frac{n_{bg}c\varepsilon_0}{2P_{sat}}(E_{-1}^{*}E_0+E_0^{*}E_1+E_1^{*}E_2) \tag{16}$$

$$q_2=\frac{n_{bg}c\varepsilon_0}{2P_{sat}}(E_{-1}^{*}E_1+E_0^{*}E_2) \tag{17}$$

$$q_3=\frac{n_{bg}c\varepsilon_0}{2P_{sat}}E_{-1}^{*}E_2 \tag{18}$$

因此，将式(2)，(4)，(8)代入式(7)中，可得出光场振幅的增益：

$$\frac{\partial E_0}{\partial z}=\frac{1}{2}(1-i\beta)\frac{\alpha N_t}{\omega_c}\left[(R_0-1)E_0+\frac{\omega_c R_{-1}e^{-i\Psi}-R_1q_2^{*}-(R_0-1)q_1^{*}}{\omega_c+i\delta\tau}E_1+\frac{\omega_c R_1e^{i\Psi}-(R_0-1)q_1}{\omega_c-i\delta\tau}E_{-1}+\frac{-R_{-1}q_3-R_1q_1-(R_0-1)q_2}{\omega_c-2i\delta\tau}E_2\right] \tag{19}$$

$$\frac{\partial E_1}{\partial z}=\frac{1}{2}(1-i\beta)\frac{\alpha N_t}{\omega_c}\left[(R_0-1)E_1+\frac{\omega_c R_{-1}e^{-i\Psi}-R_1q_2^{*}-(R_0-1)q_1^{*}}{\omega_c+i\delta\tau}E_2+\frac{\omega_c R_1e^{i\Psi}-(R_0-1)q_1}{\omega_c-i\delta\tau}E_0\right] \tag{20}$$

$$\frac{\partial E_{-1}}{\partial z}=\frac{1}{2}(1-i\beta)\frac{\alpha N_t}{\omega_c}\left[(R_0-1)E_{-1}+\frac{\omega_c R_{-1}e^{-i\Psi}-R_1q_2^{*}-(R_0-1)q_1^{*}}{\omega_c+i\delta\tau}E_0+\frac{-R_{-1}q_3-R_1q_1-(R_0-1)q_2}{\omega_c-2i\delta\tau}E_1\right] \tag{21}$$

$$\frac{\partial E_2}{\partial z}=\frac{1}{2}(1-i\beta)\frac{\alpha N_t}{\omega_c}\left[(R_0-1)E_2+\frac{\omega_c R_1e^{i\Psi}-(R_0-1)q_1}{\omega_c-i\delta\tau}E_1\right] \tag{22}$$

对于半导体波导中的慢光和快光，通常使用群折射率作为衡量参数：

$$v_g=\frac{c}{n_g} \tag{23}$$

$$n_g=n_{bg}+\omega\frac{dn_{bg}}{d\omega}=n_{bg}+\Delta n_g \tag{24}$$

其中，n_g 为群折射率，v_g 为波导中的群速度。由式(23)可以看出群速度与群折射率成反比，即群折射率越大，波导群速度越小。同时，群折射率是由材料的背景折射率 n_{bg} 和因相干布居振荡效应引起折射率的变化量 Δn_g 两部分组成。而 Δn_g 可以由相位延时量体现：

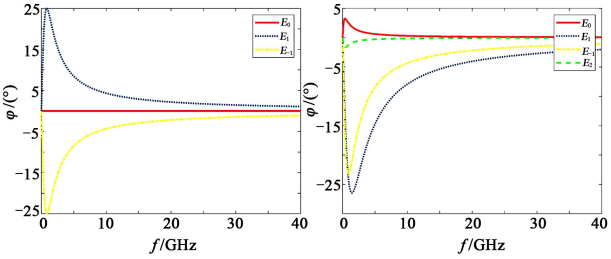
$$\Delta n_g=\frac{c}{L}\Delta t=\frac{c\varphi}{L\delta} \tag{25}$$

其中，Δt 是传播时间，L 是波导长度，φ 是光波的相位延时量。从式(25)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的幅度和相位探测得到。

2　结果与讨论

基于以上理论模型，接下来分析在辅助光的注入下，SOA 的参数对快慢光效应的影响。在该模型中，光子能量 $\hbar\omega_0=0.8$ eV，直流光波长 $\lambda_0=1\,550$ nm，光场限制因子 $\Gamma=0.5$，载流子寿命 $\tau=300$ ps，SOA 的长度 $L=0.3$ mm，线宽增强因子 $\beta=0$，材料背景折射率 $n_{bg}=3.2$，透明载流子浓度 $N_t=1\times10^{24}$ m^{-3}。

当增益系数 $\alpha=3\times10^{-20}$ m^2，相移 $\Psi=0°$，注入电流 $I_0=100$ mA 和 $I_1=I_{-1}=10$ mA 时，输出信号的相位延时量 φ 随调制频率的变化如图 2 所示。此时的直流光功率为35 dBm，边带光功率为20 dBm。图 2(a)为无辅助光时相位延时量的变化，可以看出这两条曲线对称，而图 2(b)为注入辅助光 $E_2=20$ dBm 后相位延时量的变化，可以看出曲线非对称，且除去直流光束 E_0 外其他三束光 $E_{\pm1,2}$ 的延时量均为负。这是因为无辅助光的光场传播方程是共轭的，而注入辅助光后的光场传播方程非共轭，如式(20)～(22)。



(a)　注入辅助光前　　(b)　注入辅助光后

图 2　注入辅助光前后相位延时量随调制频率的变化

当增益系数 $\alpha=3\times10^{-20}$ m^2，相移 $\Psi=0°$，调制电流 $I_1=I_{-1}=10$ mA 时，对于不同的直流电流，注入辅助光前后的相位延时量随调制频率的变化如图 3 所示。可以看出，当直流电流由 50 mA 提高到 150 mA，无辅助光时，相位延时量变化较小且均为正值，即均为慢光；注入辅助光后，相位延时量逐渐变大，且均为负值。同时，当直流电流恒定时，辅助光的注入使相位延时量减小，例如 $I_0=50$ mA 时，注入辅助光后的相位延时量小于无辅助光的情况。

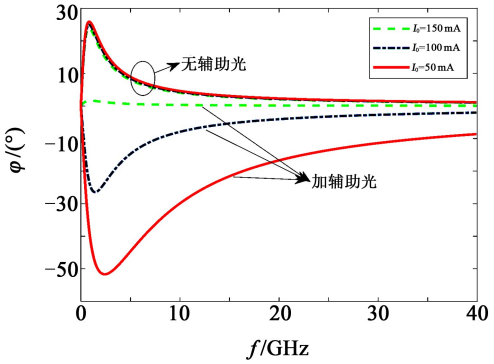


图 3 不同直流电流下，注入辅助光前后相位延时量随着调制频率的变化

在增益系数 $\alpha=3\times10^{-20}$ m^2，相移 $\Psi=0°$，直流电流 $I_0=100$ mA 的条件下，调整调制电流的大小为 4～10 mA，相位延时量随调制频率的变化如图 4 所示。可以看出，随着调制电流由 4 mA 增大至 10 mA，无辅助光的相位延时量随之增大，而注入辅助光的相位延时量随之减小。同时，如调制电流 $I_1=10$ mA，注入辅助光的相位延时量小于无辅助光的情况，且从正值减为负值，由此可以得出，在相同调制电流的情况下，注入辅助光使相位延时量减小，且由正值变为负值，即慢光变为快光。

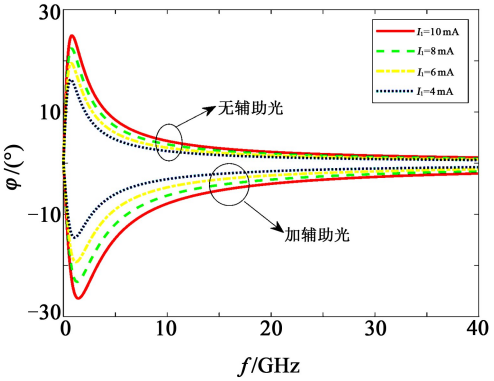


图 4 不同调制电流下，加入辅助光前后相位延时量随调制频率的变化

当增益系数 $\alpha=3\times10^{-20}$ m^2，相移 $\Psi=0°$，注入电流 $I_0=100$ mA，$I_1=I_{-1}=10$ mA，直流信号光功率为 35 dBm，两个边带信号光功率均为 20 dBm 时，调整辅助光信号的光功率，相位延时量的变化如图 5 所示。可以看出，当辅助光 E_2 的光功率为 0 dBm 时，输出信号的相位延时量为正值，表现为慢光，当辅助光功率增大至 5 dBm 时，所得相位延时量减小，随着辅助光光功率继续增大，至 10 dBm 左右降为负值，即由慢光逐渐变为快光。因此，随着注入辅助光的光功率逐渐增大，输出信号的相位延时量逐渐减小到负值。

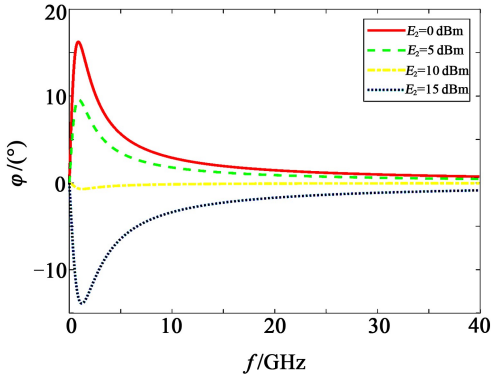


图 5 不同辅助光功率下，相位延时量随调制频率的变化

当增益系数 $\alpha=3\times10^{-20}$ m^2，注入电流 $I_0=100$ mA 和 $I_1=I_{-1}=10$ mA 时，对于不同的相移 Ψ，注入辅助光前后光信号的相位延时量随调制频率的变化如图 6 所示。可以看出，当 Ψ 为 0°，45°和 90°时，相位延时量均呈现先增大后减小的趋势；未注入辅助光时，相位延时量恒为正值，为慢光；而注入辅助光后，相位延时量呈现先减小后增大的趋势，当 Ψ 由 0°增至 90°，趋势更明显。且正如 Ψ 为 0°时注入辅助光后的相位延时量小于无辅助光的情况，由正值变为了负值，因此，辅助光的注入使相位延时量减小。同时，对于不同的相移，随着调制频率的不断增大，相位延时量均不断趋向于 0，说明在调制频率过大时，快慢光的效果不明显。

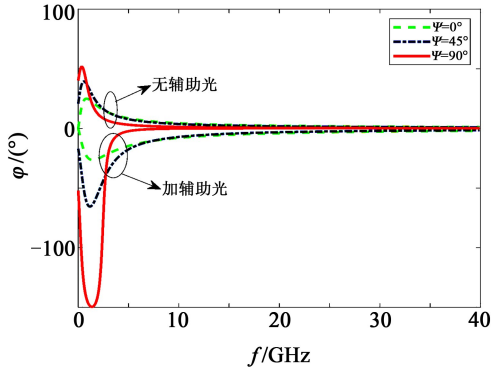


图 6 不同相移 Ψ 下，注入辅助光前后相位延时量随调制频率的变化

当增益系数 $\alpha=3\times10^{-20}$ m^2，相移 $\Psi=0°$，注入电流 $I_0=100$ mA，$I_1=I_{-1}=10$ mA 时，调整调制频率分别为 0.5，2.5，4.5 GHz，相位延时量随辅助光功率的变化如图 7 所示。可以看出，当调制频率恒定时，辅助光功率越大，相位延时量越小，且逐渐由正变为负，即由慢光变为快光。同时可以观察出：当辅助光功率小于 10 dBm 时，调制频率越大，相位延

时量越小，且均为正值，即为慢光。因此，在辅助光功率小于 10 dBm 的情况下减小调制频率可以增强慢光效应。

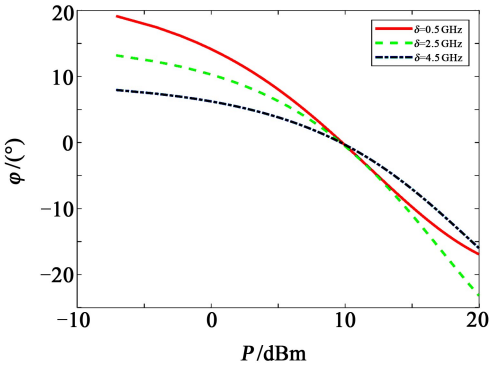


图 7　不同调制频率 δ 下，相位延时量随辅助光功率的变化

当增益系数 $\alpha=3\times10^{-20}$ m^2，相移 $\Psi=0°$，注入电流 $I_0=100$ mA，$I_1=I_{-1}=10$ mA 时，调整增益系数 α 分别为 3×10^{-20}，2×10^{-20}，1×10^{-20} m^2，注入辅助光前后光信号的相位延时量随调制频率变化的情况如图 8 所示。可以看出，随着调制频率的增大，相位延时量的绝对值均呈现先增大后减小的趋势。同时，随着增益系数由 $\alpha=1\times10^{-20}$ m^2 增至 $\alpha=3\times10^{-20}$ m^2，无辅助光时，相位延时量增大；注入辅助光后，相位延时量减小，且从正值逐渐减小至负值。同时，从增益系数 $\alpha=1\times10^{-20}$ m^2 的图像可以看出，相位延时量因为辅助光的注入而变小。

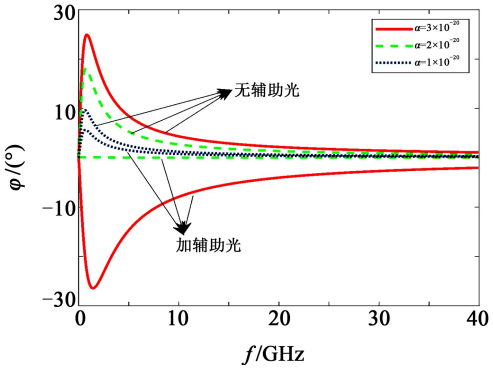


图 8　不同的增益系数 α 下，注入辅助光前后相位延时量随调制频率的变化

3　结束语

本文构建了辅助光注入 SOA 的理论模型，证明了辅助光对 SOA 的快慢光性能存在一定的影响。通过调节直流电流、调制电流、相移、调制频率和增益系数等参数，观察相位延时量发生的变化，证明了辅助光的注入使相位延时量减小，且注入的辅助光功率越强，相位延时量越小。同时，注入辅助光信号后，直流电流越大，相位延时量越大，慢光效应越强；调制电流、调制频率、相移及增益系数越大，相位延时量越小。

参考文献：

[1] Kumar Nahata P, Ahmed A, Yadav S, et al. All optical full-adder and full-subtractor using semiconductor optical amplifiers and all-optical logic gates[C]// 2020 7th Inter. Conf. on Signal Processing and Integrated Networks, 2020: 1044-1049.

[2] 胡成旭. 全光网络的关键技术及其发展研究[J]. 无线互联科技, 2019, 16(13): 29-30.
Hu Chengxu. Research on key technologies and development of all-optical network[J]. Wireless Internet Technology, 2019, 16(13): 29-30.

[3] 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.
Wang Fu. Superluminal and slow light propagation in the active media based on coherent population oscillations[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.

[4] Sumetsky M. Dispersionless low-loss miniature slow light delay lines based on optical fibers[C]// 2014 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2014: 1-3.

[5] Anton M A, Carreno F, Calderon O G, et al. Phase-controlled slow and fast light in current-modulated semiconductor optical amplifiers[J]. J. of Phys., B. Atomic, Molecular and Optical Physics: An Institute of Physics J., 2009, 42(9): 1-8.

[6] Arez N, Mohammad R, Ghafar D. Numerical analysis of four wave mixing in photonic crystal semiconductor optical amplifier[J]. Optics Communications: A Journal Devoted to the Rapid Publication of Short Contributions in the Field of Optics and Interaction of Light with Matter, 2019, 433: 104-110.

[7] Berger P, et al. Experimental demonstration of enhanced slow and fast light by forced coherent population oscillations in a SOA[C]// Proc. of 22nd IEEE Inter. Semiconductor Laser Conf., 2010: 105-106.

[8] Duill 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 J. of Sel. Top. in Quantum Electronics: A Publication of the IEEE Lasers and Electro-optics Society, 2009, 15(3): 578-584.

作者简介：

覃　翠(1984—)，女，广西人，博士，副教授，主要研究方向为光电子器件。