

文章编号: 0258-7025(2010)11-2864-08

半导体光放大器中入射光偏振不平行近简并四波混频效应的理论研究

李培丽¹ 施伟华¹ 黄德修² 张新亮²

(¹ 南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210046
² 华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 建立了当两输入光偏振方向不平行时半导体光放大器(SOA)中近简并四波混频(FWM)效应的宽带理论模型;以基于 SOA 的近简并 FWM 型波长转换器为例,通过数值模拟,对两输入光偏振方向不平行时,输入信号光、输入抽运光、两输入光之间的波长失谐量和偏振夹角对近简并 FWM 效应及波长转换特性的影响进行了理论研究。结果表明,对于输入信号光和抽运光来说存在着最佳功率值;增大输入信号光波长失谐量,转换效率随之下降;随着两输入光偏振夹角的增大,转换特性变差,同时输出光的偏振角随两输入光偏振夹角的增大而增大。

关键词 非线性光学;近简并四波混频;半导体光放大器;全光波长转换器;转换效率

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103711.2864

Theoretical Investigation of Nearly Degenerate Four-Wave Mixing in Semiconductor Optical Amplifier

Li Peili¹ Shi Weihua¹ Huang Dexiu² Zhang Xinliang²

¹ College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210046, China

² Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract A comprehensive broad-band dynamic model of nearly degenerate four-wave mixing (FWM) in semiconductor optical amplifier (SOA), in case of the polarization states of two input lights being not parallel, is presented. By numerical simulation, take the all-optical wavelength conversion based on nearly degenerate FWM in an SOA for an example, the effects of two input light powers, frequency detuning and polarization angle of two input lights on the nearly degenerate FWM and the performances of wavelength conversion are theoretically investigated. The results indicate that there exist the optimal powers of two input lights. As the frequency detuning between the two input signals and the polarization angle of two input lights increase, the conversion efficiencies are decreased. The polarization state of C13 becomes larger as the polarization angle of two input lights increases.

Key words nonlinear optics; nearly degenerate four-wave mixing; semiconductor optical amplifier; all-optical wavelength conversion; conversion efficiency

1 引 言

在未来高速光网络中,超快全光信号处理技术必将是关键技术之一。因此,超快全光信号处理技术的研究引起了国内外科研工作者的广泛关注。目

前,主要是利用半导体光放大器(SOA)、非线性光纤、激光器等非线性元件中的一些非线性效应来实现各种全光信号处理技术^[1~8]。由于 SOA 中四波混频(FWM)效应具有对调制格式和调制速率都严

收稿日期:2010-01-27;收到修改稿日期:2010-05-07

基金项目:国家自然科学基金(60707006)、江苏省高校自然科学基金项目(09KJB510009)和南京邮电大学引进人才科研启动基金(NY207142)资助课题。

作者简介:李培丽(1972—),女,博士,副教授,主要从事光通信器件和高速全光信号处理方面的研究。

E-mail:lp1thl@sohu.com

格透明的优点,被广泛地应用到各种全光信号处理技术中。因此,人们对 SOA 中的 FWM 效应在理论和实验上都进行了广泛深入的研究^[3~8]。由于 FWM 效应具有偏振相关性,在近简并 FWM 效应的理论研究中,一方面为了使 FWM 的效率最大,另一方面为了简单起见,都是假设输入到 SOA 的两束线偏光的偏振方向平行,而对输入到 SOA 的两束光偏振不平行的情况没有进行研究;另外,大多数的研究都集中在近简并 FWM 效应产生的信号光的共扼光上,而对产生的卫星波的研究很少。本文建立了当两输入光偏振方向不平行时的 SOA 中近简并 FWM 效应的宽带理论模型,在模型中考虑了两输入光的偏振夹角、SOA 的材料增益谱、载流子的空间分布、光场的纵向空间分布和宽带自发辐射;以基于 SOA 的近简并 FWM 型波长转换器为例,通过数值模拟,研究了两输入光偏振方向不平行时,输入信号光、输入抽运光、两输入光之间的波长失谐量和偏振夹角对近简并 FWM 效应产生的各个光波及波长转换特性的影响。

2 理论模型

一束携带强度信息的信号光 $S(\omega_S)$ 和一束连续光 $P(\omega_P)$ 通过耦合器耦合到 SOA 中,它们的偏振夹角为 θ 。假设其中一束光 P 的偏振方向平行于 SOA 的 TE 模,那么另一束光 S 在 SOA 中可分为两个偏振分量 S^{TE} 和 S^{TM} ,它们在 SOA 中发生 FWM 效应。用 FWM 效应的半经典理论来分析: S^{TE} 和 P 在 SOA 中形成增益光栅和相位光栅,这个光栅分别散

射 P 和 S^{TE} ,产生偏振方向平行于 P 的光波 $C1$ 和 $C2$,对应的频率分别为 $\omega_{C1} = 2\omega_S - \omega_P$ 和 $\omega_{C2} = 2\omega_P - \omega_S$;同时 S^{TM} 也被这个光栅散射,产生偏振方向垂直于 P 的光波 $C3$ 和 $C4$,对应的频率分别为 $\omega_{C3} = 2\omega_S - \omega_P$ 和 $\omega_{C4} = \omega_P$ 。可以看出, $C1$ 和 $C3, C4$ 和 P 分别为频率相同、偏振方向相互垂直的光,而在频率 $\omega_{C2} = 2\omega_P - \omega_S$ 处,只有 $C2$ 。图 1 给出了各光波的偏振方向及其频谱分布。

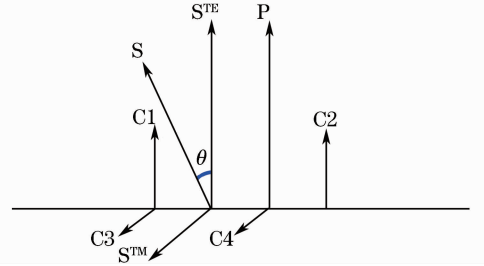


图 1 SOA 中近简并 FWM 效应中各光波的偏振方向及其频谱分布

Fig. 1 Output optical polarization states and spectra of the nearly degenerate FWM in an SOA

考虑了两输入光的偏振夹角及 SOA 的材料增益谱、载流子的空间分布、光场的纵向空间分布和宽带自发辐射,建立两入射光偏振方向不平行时的 SOA 中 FWM 效应的宽带理论模型。在数值模拟中采用了 SOA 的分段模型,即将整个 SOA 看成由 n 个子段串连而成,当 n 足够大时,可近似认为在这些子段中载流子浓度的分布是均匀的。在子段 i 中,信号光 S (包括 S^{TE} 和 S^{TM}),连续光 P ,转换光 $C1, C2, C3$ 和 $C4$ 的传输方程可表示为^[9~11]

$$\frac{dA_{S^{TE},i}}{dz} = \frac{1}{2} \left[\frac{\Gamma g_{S^{TE},i}}{1 + (P_i/P_{sat})} (1 - i\alpha_i) - \alpha_{int} \right] - \frac{1}{2} \frac{\Gamma g_{S^{TE},i}}{1 + (P_i/P_{sat})} [(\eta_{S^{TE}P} |A_{P,i}|^2 + \eta_{S^{TE}C1} |A_{C1,i}|^2 + \eta_{S^{TE}C2} |A_{C2,i}|^2) A_{S^{TE},i} + \eta_{PS^{TE}} A_{C1,i} A_{P,i} A_{S^{TE},i}^* + \eta_{PC2} A_{P,i}^2 A_{C2,i}^* + \eta_{S^{TM}C3} A_{C1,i} A_{S^{TM},i} A_{C3,i}^* + \eta_{S^{TM}C4} A_{P,i} A_{S^{TM},i} A_{C4,i}^* + \eta_{C1S^{TE}} A_{P,i} A_{C1,i} A_{S^{TE},i}^* + \eta_{C1P} A_{C2,i} A_{C1,i} A_{P,i}^* + \eta_{C2P} A_{C1,i} A_{C2,i} A_{P,i}^* + \eta_{C3S^{TM}} A_{P,i} A_{C3,i} A_{S^{TM},i}^* + \eta_{C3C4} A_{C2,i} A_{C3,i} A_{C4,i}^* + \eta_{C4S^{TM}} A_{C1,i} A_{C4,i} A_{S^{TM},i}^*], \quad (1)$$

$$\frac{dA_{P,i}}{dz} = \frac{1}{2} \left[\frac{\Gamma g_{P,i}}{1 + (P_i/P_{sat})} (1 - i\alpha_i) - \alpha_{int} \right] - \frac{1}{2} \frac{\Gamma g_{P,i}}{1 + (P_i/P_{sat})} [(\eta_{PS^{TE}} |A_{S^{TE},i}|^2 + \eta_{PC1} |A_{C1,i}|^2 + \eta_{PC2} |A_{C2,i}|^2) A_{P,i} + \eta_{S^{TE}P} A_{C2,i} A_{S^{TE},i} A_{P,i}^* + \eta_{S^{TE}C1} A_{S^{TE},i}^2 A_{C1,i}^* + \eta_{S^{TM}C3} A_{S^{TE},i} A_{S^{TM},i} A_{C3,i}^* + \eta_{S^{TM}C4} A_{C2,i} A_{S^{TM},i} A_{C4,i}^* + \eta_{C1S^{TE}} A_{C2,i} A_{C1,i} A_{S^{TE},i}^* + \eta_{C2S^{TE}} A_{C1,i} A_{C2,i} A_{S^{TE},i}^* + \eta_{C2P} A_{S^{TE},i} A_{C2,i} A_{P,i}^* + \eta_{C3S^{TM}} A_{C2,i} A_{C3,i} A_{S^{TM},i}^* + \eta_{C4S^{TM}} A_{S^{TE},i} A_{C4,i} A_{S^{TM},i}^* + \eta_{C4C3} A_{C1,i} A_{C4,i} A_{C3,i}^*], \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dA_{S^{TM},i}}{dz} = & \frac{1}{2} \left[\frac{\Gamma g_{S^{TM},i}}{1 + (P_i/P_{sat})} (1 - i\alpha_i) - \alpha_{int} \right] - \\ & \frac{1}{2} \frac{\Gamma g_{S^{TM},i}}{1 + (P_i/P_{sat})} [(\eta_{S^{TM}C_3} |A_{C_3,i}|^2 + \eta_{S^{TM}C_4} |A_{C_4,i}|^2) A_{S^{TM},i} + \\ & \eta_{S^{TE}P} A_{C_4,i} A_{S^{TE},i} A_{P,i}^* + \eta_{S^{TE}C_1} A_{C_3} A_{S^{TE},i} A_{C_1,i}^* + \eta_{PS^{TE}} A_{C_3,i} A_{P,i} A_{S^{TE},i}^* + \eta_{PC_2} A_{C_4,i} A_{P,i} A_{C_2,i}^* + \\ & \eta_{C_1S^{TE}} A_{C_4,i} A_{C_1,i} A_{S^{TE},i}^* + \eta_{C_2P} A_{C_3,i} A_{C_2,i} A_{P,i}^* + \eta_{C_3S^{TM}} A_{C_4,i} A_{C_3,i} A_{S^{TM},i}^* + \eta_{C_4S^{TM}} A_{C_3,i} A_{C_4,i} A_{S^{TM},i}^*], \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dA_{C_1,i}}{dz} = & \frac{1}{2} \left[\frac{\Gamma g_{C_1,i}}{1 + (P_i/P_{sat})} (1 - i\alpha_i) - \alpha_{int} \right] - \\ & \frac{1}{2} \frac{\Gamma g_{C_1,i}}{1 + (P_i/P_{sat})} [(\eta_{C_1S^{TE}} |A_{S^{TE},i}|^2 + \eta_{C_1P} |A_{P,i}|^2 + \eta_{C_1C_2} |A_{C_2,i}|^2) A_{C_1,i} + \\ & \eta_{S^{TE}P} A_{S^{TE},i}^2 A_{P,i}^* + \eta_{S^{TE}C_2} A_{P,i} A_{S^{TE},i} A_{C_2,i}^* + \eta_{PC_2} A_{S^{TE},i} A_{P,i} A_{C_2,i}^* + \\ & \eta_{S^{TM}C_4} A_{S^{TE},i} A_{S^{TM},i} A_{C_4,i}^* + \eta_{C_3S^{TM}} A_{S^{TE},i} A_{C_3,i} A_{S^{TM},i}^* + \eta_{C_3C_4} A_{P,i} A_{C_3,i} A_{C_4,i}^*], \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{dA_{C_2,i}}{dz} = & \frac{1}{2} \left[\frac{\Gamma g_{C_2,i}}{1 + (P_i/P_{sat})} (1 - i\alpha_i) - \alpha_{int} \right] - \\ & \frac{1}{2} \frac{\Gamma g_{C_2,i}}{1 + (P_i/P_{sat})} [(\eta_{C_2S^{TE}} |A_{S^{TE},i}|^2 + \eta_{C_2P} |A_{P,i}|^2 + \eta_{C_2C_1} |A_{C_1,i}|^2) A_{C_2,i} + \\ & \eta_{S^{TE}C_1} A_{P,i} A_{S^{TE},i} A_{C_1,i}^* + \eta_{PS^{TE}} A_{P,i}^2 A_{S^{TE},i}^* + \eta_{PC_1} A_{S^{TE},i} A_{P,i} A_{C_1,i}^* + \\ & \eta_{S^{TM}C_3} A_{P,i} A_{S^{TM},i} A_{C_3,i}^* + \eta_{C_4S^{TM}} A_{P,i} A_{C_4,i} A_{S^{TM},i}^* + \eta_{C_4C_3} A_{S^{TE},i} A_{C_4,i} A_{C_3,i}^*], \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{dA_{C_3,i}}{dz} = & \frac{1}{2} \left[\frac{\Gamma g_{C_3,i}}{1 + (P_i/P_{sat})} (1 - i\alpha_i) - \alpha_{int} \right] - \\ & \frac{1}{2} \frac{\Gamma g_{C_3,i}}{1 + (P_i/P_{sat})} [(\eta_{C_3S^{TM}} |A_{S^{TM},i}|^2 + \eta_{C_3C_4} |A_{C_4,i}|^2) A_{C_3,i} + \\ & \eta_{S^{TE}P} A_{S^{TM},i} A_{S^{TE},i} A_{P,i}^* + \eta_{S^{TE}C_2} A_{C_4,i} A_{S^{TE},i} A_{C_2,i}^* + \eta_{PC_2} A_{S^{TM},i} A_{P,i} A_{C_2,i}^* + \\ & \eta_{S^{TM}C_4} A_{S^{TM},i}^2 A_{C_4,i}^* + \eta_{C_1S^{TE}} A_{S^{TM},i} A_{C_1,i} A_{S^{TE},i}^* + \eta_{C_1P} A_{C_4,i} A_{C_1,i} A_{P,i}^*], \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dA_{C_4,i}}{dz} = & \frac{1}{2} \left[\frac{\Gamma g_{C_4,i}}{1 + (P_i/P_{sat})} (1 - i\alpha_i) - \alpha_{int} \right] - \\ & \frac{1}{2} \frac{\Gamma g_{C_4,i}}{1 + (P_i/P_{sat})} [(\eta_{C_4S^{TM}} |A_{S^{TM},i}|^2 + \eta_{C_4C_3} |A_{C_3,i}|^2) A_{C_4,i} + \\ & \eta_{S^{TE}C_1} A_{S^{TM},i} A_{S^{TE},i} A_{C_1,i}^* + \eta_{PS^{TE}} A_{S^{TM},i} A_{P,i} A_{S^{TE},i}^* + \eta_{PC_1} A_{C_3,i} A_{P,i} A_{C_1,i}^* + \\ & \eta_{S^{TM}C_3} A_{S^{TM},i}^2 A_{C_3,i}^* + \eta_{C_2S^{TE}} A_{C_3,i} A_{C_2,i} A_{S^{TE},i}^* + \eta_{C_2P} A_{S^{TM},i} A_{C_2,i} A_{P,i}^*], \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $A_{j,i}$ ($j = S^{TE}, S^{TM}, P, C_1, C_2, C_3, C_4$) 为光场的慢幅变化, $P_i = \sum_j |A_{j,i}|^2$ 为第 i 个子段中总的光功率, Γ 为限制因子, α_{int} 为 SOA 的内部损耗系数, $g_{j,i}$ 为第 i 子段中光波的材料增益系数, P_{sat} 为 SOA 的饱和功率, α_i 为载流子密度脉动引起的线宽增强因子, $\eta_{jj'}$ ($j \neq j'; j, j' = S^{TE}, S^{TM}, P, C_1, C_2, C_3, C_4$)

是 FWM 耦合因子, 代表 FWM 光波之间的非线性相互作用。

考虑了放大自发辐射 (ASE) 的宽带谱分布, 把整个 ASE 谱宽从 λ_1 到 λ_m 分为 m 段, 假设 ASE 只在分立的波长上存在。在 SOA 的第 i 子段, 波长为 λ_j 的 ASE 的传输方程可表示为

$$\pm \frac{dW_{j,i}^{\pm}(z,t)}{dz} = [\Gamma g(N_i, \lambda_j) - \alpha_{int}] W_{j,i}^{\pm}(z,t) + 2\Gamma R_{st}(N_i, \lambda_j) \frac{hc^2}{\lambda_j^3}, \quad (8)$$

式中 $W_{j,i}(z,t)$ 为功率谱密度, $R_{st}(N_i, \lambda_j)$ 为在第 i 子段、波长为 λ_j 的受激发射系数。

描述 SOA 中载流子变化的速率方程为

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{I}{ewdL} - (c_1 N_i + c_2 N_i^2 + c_3 N_i^3) - \sum_j g_{j,i} \frac{G_{j,i} - 1}{\ln G_{j,i}} \frac{|A_{j,i}|^2 \lambda_j}{hcwd} -$$

$$\sum_{j=1}^m g_{j,i} \left[\frac{2g_{j,i}}{g_{j,i}} \left(\frac{G_{j,i} - 1}{\ln G_{j,i}} - 1 \right) + \frac{G_{j,i} - 1}{\ln G_{j,i}} \frac{\Delta\lambda(W_{j,i}^+ + W_{j,i}^-)\lambda_j}{hc\omega d} \right], \quad (9)$$

$$(j = S^{TE}, S^{TM}, P, C1, C2, C3, C4)$$

式中 h 为普朗克常量, I 为注入电流, L, ω 和 d 分别为 SOA 有源区的长、宽和高, c_1, c_2, c_3 分别为缺陷和捕获中心引起的非辐射复合系数、辐射复合系数和 Auger 复合系数, $\bar{g}_{j,i}$ 和 $G_{j,i}$ 分别为 λ_j 在 SOA 第 i 子段中的净增益系数和经过第 i 子段获得的增益。

3 结果分析

利用 2 节建立的两入射光偏振方向不平行时的 SOA 中近简并 FWM 效应的宽带理论模型进行了理论模拟。取输入信号光为 40 Gb/s 的归零(RZ)无啁啾理想高斯脉冲序列, RZ 的占空比为 1:4, 调制格式为 11101010101011101010, 中心波长为

1549 nm, 峰值功率为 -10 dBm; 输入连续抽运光的波长为 1550 nm, 功率为 -10 dBm; 两输入光的偏振夹角为 45° 。如无特殊说明, 上述参数不变, 其他计算所用的参数值同文献[12]。

图 2(a) 为输入信号光的波形, 图 2(b)~(e) 分别为输出光 C1, C2, C3 和 C4 的波形。由于 C1 和 C3 的偏振方向相互垂直, 而波长相同, 因此忽略它们的偏振态, 直接探测其强度, 记为 C13, 图 2(f) 给出了 C13 的波形。可以看出 C1, C2, C3, C4 和 C13 上都携带了和输入信号光相同的强度信息, 也就是说 C1, C2, C3, C4 和 C13 都可以实现强度调制的波长转换。

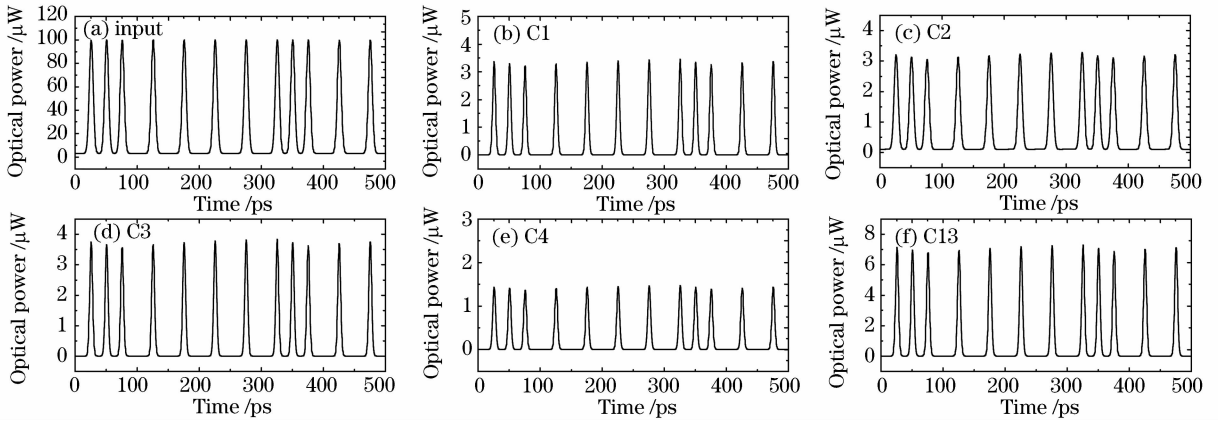


图 2 输入信号光、输出光 C1, C2, C3, C4 和 C13 的波形

Fig. 2 Waveforms of the input signal, the output signal C1, C2, C3, C4 and C13

为简单起见, 只利用 C2 和 C13 来实现波长转换, 用转换效率 1 和 2 分别表示转换为 C2 和 C13 时的转换效率。下面研究当两入射光偏振方向不平行时, 输出光 C1, C2, C3, C13, 两个转换效率和 C13 的偏振方向随输入信号光、抽运光功率、两输入光波长失谐量和偏振夹角的变化情况。

图 3(a) 为输出光 C1, C2, C3 和 C13 的光功率随输入信号光功率的变化情况。当输入信号光比较弱时, SOA 尚未达到饱和, 随着输入信号光的增强, 输出光 C1, C2, C3 和 C13 随之增强; 进一步增强输入信号光, SOA 就处于深饱和状态, 增益下降, 导致输出光开始减弱。由于 C1 和 C3 的光功率分别与 S^{TE} 功率的平方和 $S^{TE} S^{TM}$ 功率之积成正比, 与输入抽运光功率成正比; 而 C2 的光功率与 S^{TE} 功率成正比, 与抽运光功率的平方成正比。因此, 当输入信号

光比较弱时, 由于输入抽运光相对较强, C2 比 C1 和 C3 强, 先达到峰值; 随着输入信号光的增强, 输入信号光相对比抽运光强时, C1 和 C3 则比 C2 强, 如图 3(a) 所示。

图 3(b) 为转换效率 1 和转换效率 2 随输入信号光功率的变化情况。可以看出随着输入信号光功率的增强, 转换效率 1 随之先缓慢后迅速下降, 转换效率 2 先增大后减小。当输入信号光比较弱时, 转换效率 1 大于转换效率 2; 随着输入信号光的增强, 转换效率 2 大于转换效率 1。

图 3(c) 为合成光 C13 的偏振角随输入信号光功率的变化情况。可以看出随着输入信号光功率的增大, C13 的偏振角有微小的减小。这是由于 C13 是由频率相同、偏振相互垂直的 C1 和 C3 两束光合成, 随着输入信号光的增强, C1 和 C3 的相对大小发

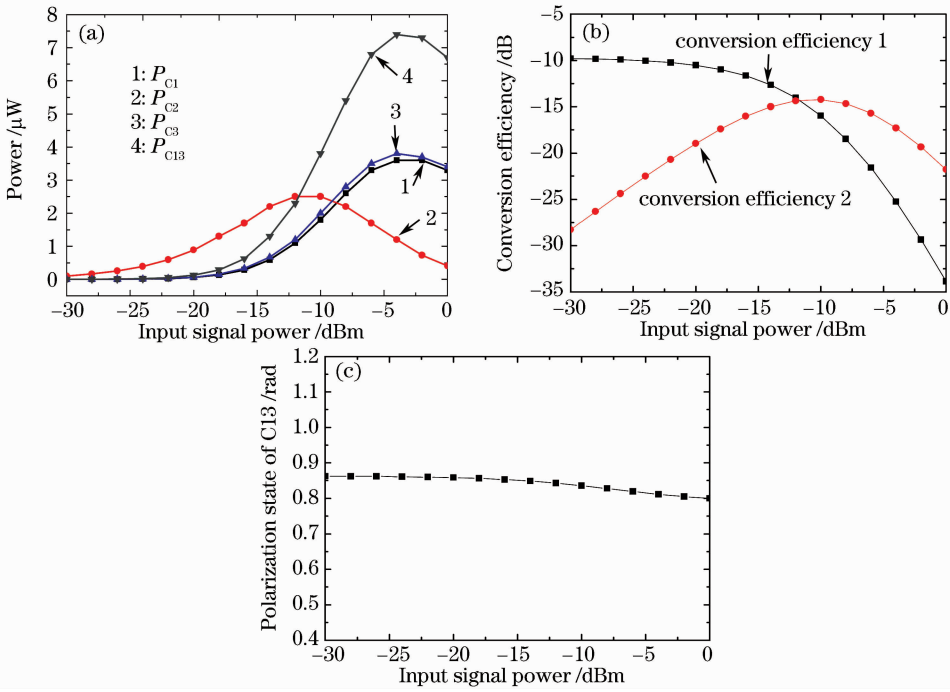


图 3 输出光功率(a),转换效率(b)和输出光 C13 的偏振角(c)随输入信号光功率的变化

Fig. 3 Dependence of output power (a), conversion efficiency (b) and polarization state of C13 (c) on input signal power

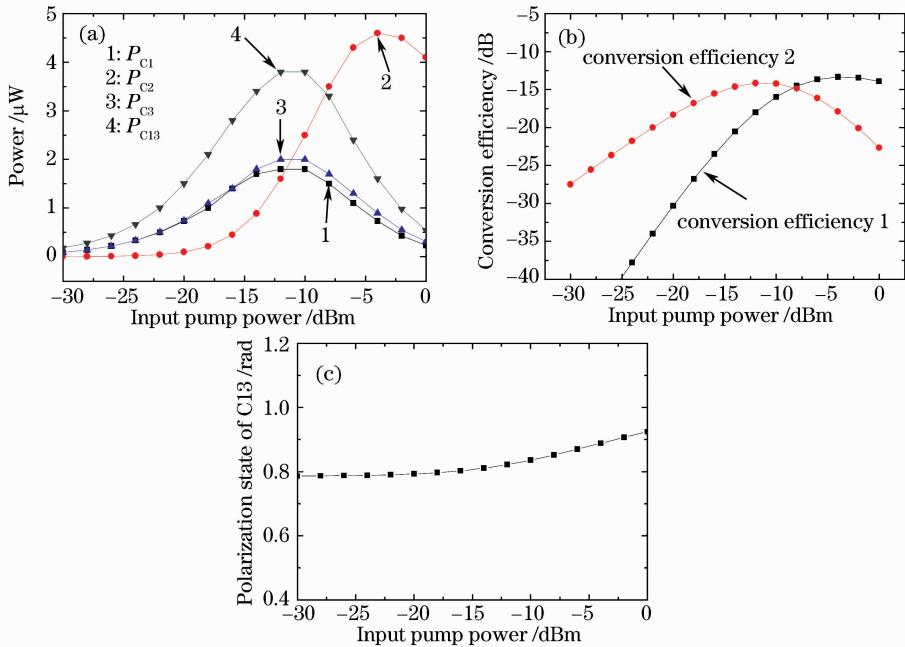


图 4 输出光功率(a),转换效率(b)和输出光 C13 的偏振角(c)随输入抽运光功率的变化

Fig. 4 Dependence of output power (a), conversion efficiency (b) and polarization state of C13 (c) on input pump power

生微小的改变,因此合成光 C13 的偏振方向也随之改变。

输出光 C1,C2,C3 和 C13 的光功率随输入抽运光功率的变化情况如图 4(a)所示。同 C1,C2,C3 和 C13 的光功率随输入信号光功率的变化趋势一样,随着输入抽运光的增强,输出光 C1,C2,C3 和 C13 先增强后减弱。但不同的是,当输入抽运光比

较弱时,由于输入信号光相对较强,C1 和 C3 比 C2 强;进一步增强输入抽运光, C1,C3 和 C13 比 C2 先达到峰值,当输入抽运光比较强,此时由于输入抽运光相对比信号光强,C2 则比 C1 和 C3 强。

图 4(b)为转换效率 1 和 2 随输入抽运光功率的变化情况。由于随着抽运光功率的增强,输出光 C1,C2,C3 和 C13 先增强后减弱,而信号光功率不

变,转换效率 1 和转换效率 2 都是先增大后减小。这与文献[13~15]中的理论和实验结果都是一致的。当输入抽运光比较弱时,转换效率 2 大于转换效率 1;随着输入抽运光的增强,转换效率 1 大于转换效率 2。

图 4(c)为输出光 C13 的偏振角随输入抽运光功率的变化情况。可以看出与 C13 的偏振角随输入信号光功率的变化趋势不同,随着输入抽运光功率的增大,C13 的偏振角略有增大。

固定输入信号光波长为 1549 nm,改变抽运光波长来改变两输入光的波长失谐量。图 5(a)给出

了输出光 C1,C2,C3 和 C13 的光功率随输入光波长失谐量的变化情况。可以看出,当两输入光失谐量增大时,输出光 C1,C2,C3 和 C13 的光功率急剧下降。这主要是由于在失谐量小的情况下带间过程载流子密度脉动(CDP)效应占主导地位,在失谐量大的情况下快速带内过程载流子加热(CH)和光谱烧孔(SHB)占主导地位,而带内过程比带间过程弱导致了 FWM 效应随波长失谐量的增大迅速减弱。这也导致了随着输入信号光和抽运光波长失谐量的增大,转换效率 1 和转换效率 2 也随之下降,如图 5(b)所示。这与文献[16]中的结果一致。

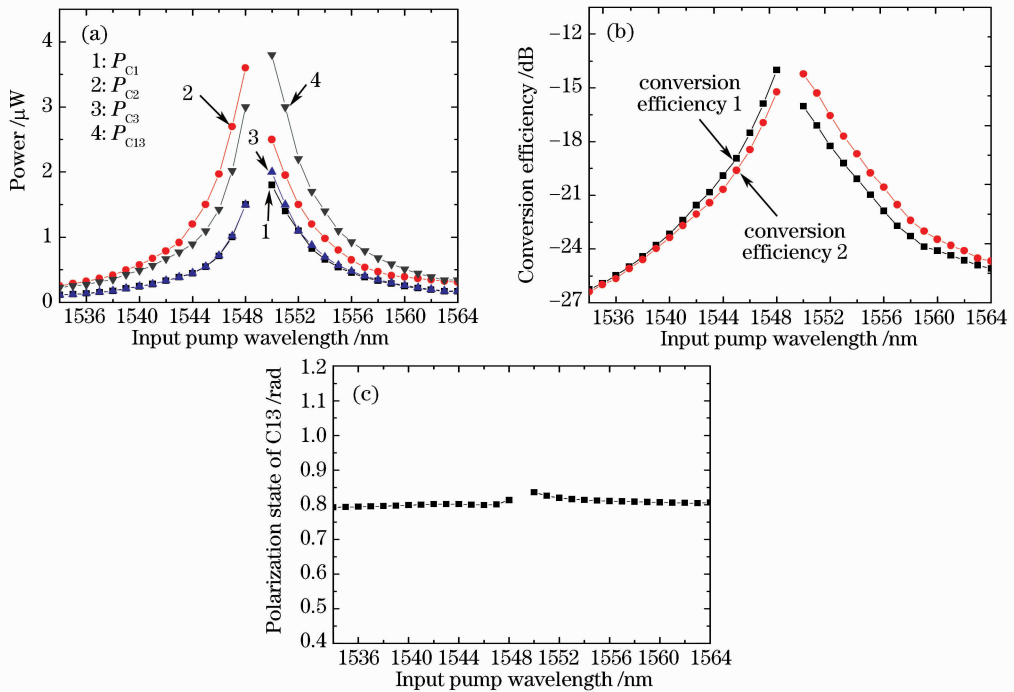


图 5 输出光功率(a),转换效率(b)和输出光 C13 的偏振角(c)随输入抽运光波长的变化

Fig. 5 Dependence of output power (a), conversion efficiency (b) and polarization state of C13 (c) on input pump wavelength

图 5(c)为输出 C13 的偏振角随输入信号光和抽运光波长失谐量的变化情况。可以看到 C13 的偏振角随两输入光的波长失谐量的增大略有减小。

图 6(a)给出了输出光 C1,C2,C3 和 C13 的光功率随输入信号光和抽运光的偏振夹角的变化情况。由于偏振夹角的增大,意味着 S^{TE} 的减小和 S^{TM} 的增大。因此,随着偏振夹角的增大,C1 和 C2 的光功率随之减小,C3 的光功率则先增大后减小,C1 和 C3 的合成光 C13 随之减小。另外由图可以看出,在夹角为 45° 时,C1 和 C3 的光功率基本相等。

随着输入信号光和抽运光的偏振夹角的增大,转换效率 1 和转换效率 2 也随之下降,如图 6(b)所示。这是由于随着两输入光偏振夹角的增大,C2 和

C13 随之减小的缘故。

图 6(c)为输出 C13 的偏振角随输入信号光和抽运光的偏振夹角的变化情况。可以看出,随着输入夹角的增大,C13 的偏振角随之增大。随着两输入光的偏振夹角 θ 的改变,C1 和 C3 的相对大小发生较大改变,因此合成光 C13 的偏振方向也随之改变。这与文献[6]中的结果是一致的。但是 C13 的偏振方向与输入信号光和抽运光的偏振夹角并不是呈线性关系的。

4 结 论

建立了当两束输入光偏振方向不平行时 SOA 中近简并 FWM 效应的宽带理论模型,并以基于

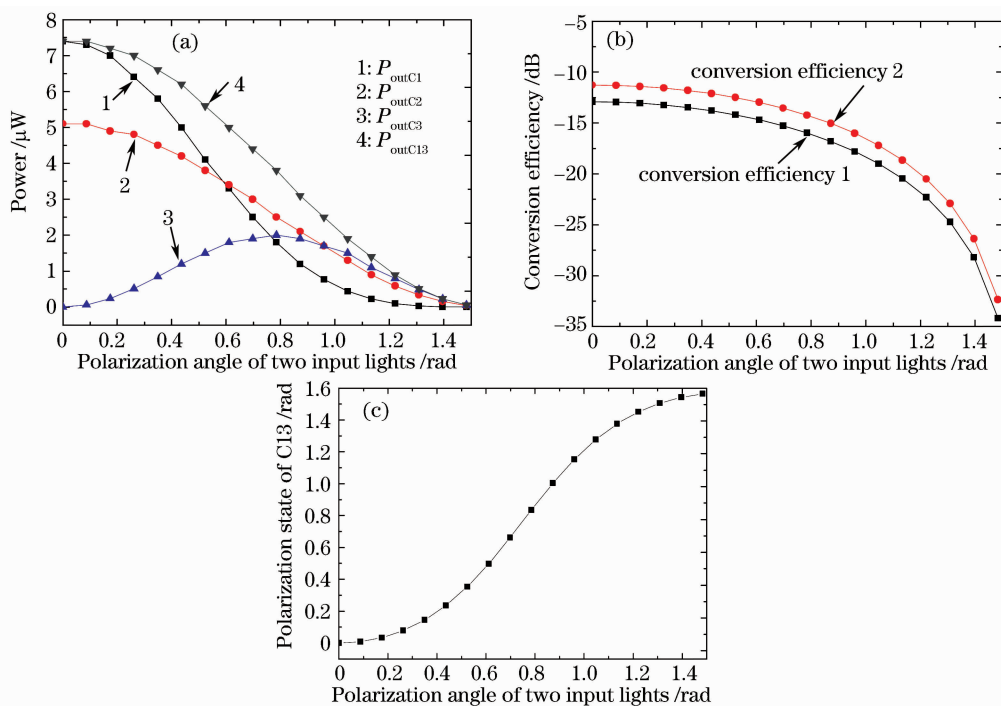


图6 输出光功率(a),转换效率(b)和输出光 C13 的偏振角(c)随两输入光的偏振夹角的变化
Fig. 6 Dependence of output power (a), conversion efficiency (b) and polarization state of C13 (c) on polarization angle of two input lights

SOA 的近简并 FWM 型波长转换器为例,通过数值模拟的方法,研究了输入光偏振方向不平行时,输入信号光、输入抽运光以及两输入光之间的波长失谐量和偏振夹角对近简并 FWM 效应及波长转换特性的影响。结果表明,SOA 中近简并 FWM 效应产生的光随着输入信号光和抽运光的变化趋势都是先增强后减弱;波长转换效率 1 随输入信号光的增强先缓慢后迅速下降,随着输入抽运光的增强先增大后减小;波长转换效率 2 随输入信号光和抽运光的增强都是先增大后减小。因此对于输入信号光和抽运光来说存在着最佳功率值。随着输入信号光波长失谐量的增大,转换效率随之下降。随着两输入光偏振夹角的增大,虽然 C3 的光功率先增大后减小,但其他的光功率都随之减小,两个转换效率也随之减小。输出光 C13 的偏振角随着输入信号光、抽运光功率和两输入光波长失谐量的变化仅有微小的变化,而随两输入光偏振夹角的增大有较大的增大,但不呈线性关系。

参 考 文 献

1 Wang Jiangfeng, Zhu Haidong, Li Xuechun *et al.*. Highly stable, laser diode-pumped Nd:YLF regenerative amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2):187~190
王江峰,朱海东,李学春等.高稳定激光二极管抽运 Nd:YLF 再生放大器[J].*中国激光*, 2008, **35**(2):187~190

2 Han Bingchen, Yu Jinlong, Zhang Litai *et al.*. Reconfigurable all-optical logic gates with not-inverted data technique by using single semiconductor optical amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9):2367~2371
韩丙辰,于晋龙,张立台等.利用单个半导体光放大器实现非反转归零码的可重构全光逻辑门[J].*中国激光*, 2009, **36**(9):2367~2371
3 G. Contestabile, M. Presi, E. Ciaramella. Multiple wavelength conversion for WDM multicasting by FWM in an SOA [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(7):1775~1777
4 Li Zhihong, Dong Yi, Mo Jinyu *et al.*. Cascade all-optical wavelength conversion for RZ-DPSK signal based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(7):1685~1687
5 Hsu Dar-Zu, Lee San-Liang, Pei-Miin Gong *et al.*. High-efficiency wide-band SOA-based wavelength converters by using dual-pumped four-wave mixing and an assist beam [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(8):1903~1905
6 L. Han, H. Wen, H. Zhang *et al.*. All-optical wavelength conversion for polarization shift keying signal based on four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier [J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(9):090504
7 Dong Jianji, Zhang Xinliang, Huang Dexiu. Experimental study of wavelength conversion at various modulation formats based on four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7):1327~1332
董建绩,张新亮,黄德修.基于半导体光放大器四波混频效应的多种调制格式的波长转换实验[J].*光学学报*, 2008, **28**(7):1327~1332
8 Dong Ze, Cao Zizheng, Lu Jia *et al.*. All-optical wavelength conversion based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifier for OFDM optical signal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11):2952~2956
董泽,曹子峥,卢嘉等.基于半导体光放大器的四波混频效应对正交频分复用光信号进行全光波长转换[J].*中国激光*,

- 2009, **36**(11):2952~2956
- 9 Kyo Inoue, Takaaki Mukai, Tadashi Saitoh. Nearly degenerate four-wave mixing in a traveling-wave semiconductor laser amplifier [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**(14):1051~1053
- 10 T. Mukai, T. Saitoh. Detuning characteristics and conversion efficiency of nearly degenerate four-wave mixing in a 1.5- μm traveling-wave semiconductor laser amplifier [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**(6):865~875
- 11 Hsieh Jyh-Tsung, Gong Pei-Miin, Lee San-Liang *et al.*. Improved dynamic characteristics on four-wave mixing wavelength conversion in light-holding SOAs [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2004, **10**(5):1187~1196
- 12 Li Peili, Huang Dexiu, Zhang Xinliang *et al.*. Ultrahigh-speed all-optical half adder based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifier [J]. *Opt. Express*, 2006, **14** (24): 11839~11847
- 13 A. D. Ottavi, E. Iannone, A. Mecozzi *et al.*. Efficiency and noise performance of wavelength converters based on FWM in semiconductor optical amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(4):357~359
- 14 M. A. Summerfield, R. S. Tucker. Optimization of pump and signal powers for wavelength converters based on FWM in semiconductor optical amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(10):1316~1318
- 15 N. C. Kothari, D. J. Blumenthal. Influence of gain saturation, gain asymmetry, and pump/probe depletion on wavelength conversion efficiency of FWM in semiconductor optical amplifiers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(10):1810~1816
- 16 Yonggyoo Kim, Hanlim Lee, Sungkee Kim *et al.*. Analysis of frequency chirping and extinction ratio of optical phase conjugate signals by four-wave mixing in SOA's [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1999, **5**(3):873~879