

# 半导体光放大器参数对高速全光波长变换系统的影响

马杰, 卢嘉\*, 伍萍辉, 刘剑飞, 常海悦, 王杨

河北工业大学电子信息工程学院, 天津 300401

**摘要** 理论分析并模拟仿真了半导体光放大器(SOA)参数对高速偏振复用-正交频分复用(PM-OFDM)全光波长变换系统的影响。SOA参数(包括增益饱和、光场限制因子、有源区内载流子浓度)均与系统波长转换效率有关。在达到SOA的增益饱和之前或在SOA的增益饱和附近,通过改变注入电流、载流子浓度、光场限制因子均可引起SOA增益系数的改变,从而影响系统的波长转换效率。通过改善SOA参数,实现了速率为40 Gbit/s的PM-OFDM信号在全光波长变换后的无串扰直接接收。

**关键词** 光纤光学; 全光波长变换; 偏振复用; 正交频分复用; 半导体光放大器; 四波混频

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.030606

## Influence of Semiconductor Optical Amplifier Parameters on High Speed All-Optical Wavelength Conversion System

Ma Jie, Lu Jia, Wu Pinghui, Liu Jianfei, Chang Haiyue, Wang Yang

School of Electronic and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

**Abstract** The influences of semiconductor optical amplifier parameters on all-optical wavelength conversion system with high speed polarization multiplexing-orthogonal frequency division multiplexing (PM-OFDM) are analyzed and simulated. The SOA parameters, such as gain saturation, optical confinement factor and carrier concentration in active region, are related to the wavelength conversion efficiency. Before achieving SOA gain saturation or nearby SOA gain saturation, the injection current, the carrier concentration, and the optical confinement factor effect on the SOA gain coefficient changing, and ultimately effect the wavelength conversion efficiency. The PM-OFDM signal with the rate of 40 Gbit/s is achieved directly without crosstalk after all-optical wavelength conversion when we improve the SOA parameters.

**Key words** fiber optics; all-optical wavelength conversion; polarization multiplexing; orthogonal frequency division multiplexing; semiconductor optical amplifier; four-wave mixing

**OCIS codes** 060.1155; 060.4230; 060.4370; 060.4510

## 1 引言

全光波长变换(AOWC)可实现通信网络中的波长复用,解决通信网络内部多个波长信道的波长争用,提高网络的容量利用率与传输速率,从而实现对网络便捷灵活的管理。对于下一代高容量光通信网络,波长变换在全光通信网络中发挥关键作用。全光波长变换技术有多种实现方式,目前多采用半导体光放大器(SOA)或高非线性光纤。由于SOA中具有多种非线性效应,所需信号功率较小,便于集成,容易满足相位匹配条件,因此成为近年来的研究热点<sup>[1-4]</sup>。SOA中基于四波混频(FWM)效应的AOWC可以实现对信号比特率及调制形式完全透明的波长转换,被广泛用于全光信号处理。

**收稿日期:** 2016-10-12; **收到修改稿日期:** 2016-11-14

**基金项目:** 河北省自然科学基金(F2014202036)、河北省高层次人才资助(C2013001048)、河北省高等学校高层次人才科学研究项目(GCC2014011)、天津市自然科学基金(15JCYBJC17000)

**作者简介:** 马杰(1990—),女,硕士研究生,主要从事光通信等方面的研究。E-mail: 1341959371@qq.com

**导师简介:** 伍萍辉(1970—),女,博士,教授,主要从事通信工程等方面的研究。E-mail: wuphui@126.com

\* **通信联系人.** E-mail: lujia8299@163.com

随着通信质量及业务量的增加,低速率 AOWC 已经无法满足日益增长的带宽需求。研究人员对基于直接检测的超快非线性效应对 SOA 增益的影响进行了研究,力求在 SOA 中实现基于 FWM 效应的高速 AOWC 系统。SOA 内载流子动态过程引起的增益变化引起了研究人员的广泛关注和深入研究。通过引入局部载流子概念,详细分析了动态载流子加热效应、频谱烧孔和双光子吸收效应对超快增益动态特性的影响,建立了比较完整的 SOA 载流子动态过程模型<sup>[5-7]</sup>。随着 SOA 应用的不断发展,SOA 的理论模型一直不断被修改和完善<sup>[8-13]</sup>。利用 SOA 超快动态特性实现的高速 AOWC 系统大多基于交叉增益调制效应和交叉相位调制效应,而对基于 FWM 效应的研究却很少<sup>[14]</sup>。Mark 等<sup>[15]</sup>利用垂直双抽运结构在单个 SOA 中实现了速率为 10 Gbit/s 的波长转换。Lu 等<sup>[16]</sup>在 SOA 中基于平行双抽运结构实现了速率为 2.5 Gbit/s 的偏振复用(PM)非归零复用信号的 AOWC;在 SOA 中研究了垂直双抽运结构的偏振复用-正交频分复用(PM-OFDM)信号对 AOWC 系统的影响<sup>[17]</sup>;在 SOA 中实现了基于 FWM 效应的速率为 10 Gbit/s 的 PM-OFDM 信号的 AOWC<sup>[18]</sup>。上述研究主要分析了信号光与抽运光等影响系统波长转换效率因素。

对基于 FWM 效应的超快动态特性进行了理论分析和模拟仿真。基于 SOA 的基本传输方程和载流子速率方程,讨论了 SOA 参数对 SOA 增益及波长转换效率的影响,如增益饱和、光场限制因子及载流子浓度。通过模拟仿真,实现了基于 SOA 垂直双抽运结构的速率为 40 Gbit/s 的 PM-OFDM 信号的无串扰直接接收。

## 2 系统原理及理论分析

### 2.1 理论模型分析

正交频分复用(OFDM)技术是一类特殊的多子载波调制技术,利用频谱重叠的多个子载波来传输数据,具有很高的频谱效率。偏振复用(PM)与 OFDM 相结合,提高了信道频谱利用率和系统容量,抗衰落性强,且可以动态调整子信道和上下行链路的带宽分配。图 1 为基于 SOA 的垂直双抽运结构的高速 PM-OFDM 信号的 AOWC 系统图,在发送端采用激光器 CW1、CW2 和 CW3 产生垂直双抽运光  $E_1$ 、 $E_2$  和信号光  $E_3$ ,对应的表达式为  $E_j(\omega_j, t) = A_j \exp[i(k_j z - \omega_j t + f_j)]$  ( $j = 1, 2, 3$ ),图中 OC 为光耦合器,PD 为光电探测器,MZ 为马赫-曾德尔调制器,PBS 为偏振分束器,PBC 为偏振合束器。信号光和两个抽运光耦合注入 SOA,由于受到快速非线性效应[如载流子密度脉动(CDP)、载流子加热(CH)和光谱烧孔(SHB)]的影响,因此产生了 FWM 效应和携带原始信号光信息的转换光。

基于 SOA 的全光信号处理技术主要源于 SOA 中的光致非线性特性<sup>[5-7]</sup>,光波在角频率  $\omega_j$  处的感应电极化矢量  $P$  为

$$P_j = P_j^L + P_j^{NL}, \quad (1)$$

$$P_j^{NL}(z) = \epsilon_0 \left[ \chi_j^{(1)} E_j(z) + \sum_{k,l,m} \chi_{jklm}^{(3)} \omega_j E_k(z) E_l^*(z) E_m(z) \right], \quad (2)$$

式中  $\epsilon_0$  为真空中的介电常数, $\omega_j = \omega_k - \omega_l + \omega_m$  ( $\omega_k, \omega_l, \omega_m$  为角频率),  $P_j^L$  和  $P_j^{NL}$  分别为感应电极化矢量的线性和非线性部分,  $\chi_j^{(1)}$ 、 $\chi_{jklm}^{(3)}$  为非线性极化率,  $E_k(z)$ 、 $E_l^*(z)$ 、 $E_m(z)$  分别为频率为  $k$ 、 $l$  和  $m$  对应的电场矢量。由于 SOA 为对称结构,偶次阶非线性极化率均为 0。本研究中 SOA 内的 FWM 效应仅考虑三阶非线性极化项。由(2)式可知,SOA 中一阶和三阶非线性极化率均与载流子浓度有关,而载流子浓度又与电场强度有关。需注意,对应载流子密度脉动作用的载流子浓度的谐振部分对非线性极化的贡献包含在三阶非线性极化率中,因此  $\chi_j^{(1)} E_j(z)$  项对应载流子消耗引起的饱和,而饱和是 SOA 中最强的非线性效应,  $\chi_{jklm}^{(3)}$  对应  $j$ 、 $k$ 、 $l$  和  $m$  所表示的不同非线性效应。载流子消耗考虑了 FWM 过程,SOA 中多路信号光输入条件下的基本传输方程和载流子速率方程分别为<sup>[7]</sup>

$$\frac{dA_j(z)}{dz} = \frac{1}{2} [\Gamma g_j(N)(1 - i\alpha) - \alpha_{int}] A_j(z) + i \frac{\Gamma \omega_j}{2c n_{j,k,l,m}} \sum \chi_{jklm}^{(3)} \omega_j A_k(z) A_l^*(z) A_m(z) \exp(i\Delta k_{jklm}), \quad (3)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{I}{eV} - R(N) - S_{ASE} - \sum_j \frac{\Gamma g_j(N)}{A_{area} \hbar \omega_j} |A_j(z)|^2, \quad (4)$$

式中  $A_j(z)$ 、 $A_k(z)$ 、 $A_l^*(z)$ 、 $A_m(z)$  分别为  $\mathbf{E}_j(z)$ 、 $\mathbf{E}_k(z)$ 、 $\mathbf{E}_l^*(z)$ 、 $\mathbf{E}_m(z)$  的振幅； $g_j(N)$  为材料增益系数， $N$  为载流子浓度； $\alpha$  为线宽增强因子； $\alpha_{\text{int}}$  为 SOA 内部损耗； $\Gamma$  为光场限制因子； $c$  为光速； $n_j$  为不同模式下对应的有效折射率； $\Delta k_{jklm} = k_k - k_l + k_m - k_j$ ； $I$  为注入电流； $e$  为电子电荷； $V$  为 SOA 有源区体积， $V = LWD$ ， $L$ 、 $W$ 、 $D$  为有源区长度、宽度和高度； $A_{\text{area}}$  为有源区的横截面积； $R(N)$  为复合速率， $R(N) = N/\tau$ ， $\tau$  为载流子寿命，复合速率正比于载流子浓度； $S_{\text{ASE}}$  为由放大自发辐射 (ASE) 引起的复合速率； $\hbar = h/2\pi$  为归一化普朗克常数， $h$  为普朗克常数。(4) 式中右边第 1 项表示注入电流引起的有源区内载流子的变化，第 2 项表示由自发辐射复合和非辐射复合引起的载流子消耗，第 3 项为由 ASE 引起的载流子消耗，第 4 项表示放大注入光信号诱发的受激辐射导致的载流子消耗。

已知抽运光、信号光和转换光在 SOA 的光波导内仅激发横电基模传输，且传输方向相同，则 SOA 内传输的总光场为

$$\mathbf{E}_j(\omega_j, t) = A_j \exp[i(k_j z - \omega_j t + \phi_j)], \quad j = 1, 2, 3, c, \quad (5)$$

式中  $\mathbf{E}_c$  表示转换光的电场。忽略 FWM 效应对抽运光场的作用及转换光对信号光的作用，在考虑有源区内部损耗和增益色散的条件下，采用数值模型算法求解 SOA 模型。将 SOA 有源区长度  $L$  划分为  $M$  个等长子段，每个子段的长度  $\Delta z = L/M$ ，分段越多，数值求解越精确。将  $L = 500 \mu\text{m}$  的 SOA 分为  $M$  段 ( $M = 50$ )，每个子段内的载流子浓度可近似相等<sup>[6-7]</sup>。在任一子段  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, 50$ ) 内，得到频率  $\omega_c = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3$  的转换光场的耦合方程为

$$\frac{dA_{ci}}{dz} = \left[ \frac{\Gamma g_{ci}}{1 + P_i/P_{\text{sat}}} (1 - i\alpha) - \alpha_{\text{int}} \right] A_{ci} - \frac{\Gamma g_{ci}}{1 + P_i/P_{\text{sat}}} (\eta_{c1} |A_{1i}|^2 + \eta_{c2} |A_{2i}|^2 + \eta_{c3} |A_{3i}|^2) A_{ci} - \frac{1}{2} \frac{\Gamma g_{ci}}{1 + P_i/P_{\text{sat}}} [(\eta_{12} + \eta_{3c}) + (\eta_{1c} + \eta_{32})] A_{1i} A_{3i} A_{2i}^*, \quad (6)$$

式中  $A_{ci}$  为第  $i$  子段内转换光的电场振幅； $A_{1i}$ 、 $A_{2i}$  为第  $i$  子段内两个抽运光的振幅； $A_{3i}$  为第  $i$  子段内信号光的振幅； $P_{\text{sat}}$  为饱和功率； $P_i$  为第  $i$  子段内的总功率， $P_i = \sum |A_j|^2$ ， $j = 1, 2, 3, c$ ； $g_{ci}$  为 SOA 内第  $i$  子段内转换光的增益系数； $\eta_{p,q}$  ( $p \neq q$ ； $p, q = 1, 2, 3, c$ ) 为耦合系数，表示不同光波间的相互作用，由 CDP、CH 和 SHB 三种机制决定<sup>[6-7]</sup>，可分别表示为

$$\begin{cases} \eta_{p,q} = \eta_{p,q}^{\text{CDP}} + \eta_{p,q}^{\text{CH}} + \eta_{p,q}^{\text{SHB}}, \\ \eta_{p,q}^{\text{CDP}} = \frac{\epsilon_{\text{CDP}} (1 - i\alpha_{\text{CDP}})}{P_{\text{sat}}} \frac{1}{[1 - i(\omega_p - \omega_q)\tau_{\text{CDP}}] [1 - i(\omega_p - \omega_q)\tau_{\text{SHB}}]}, \\ \eta_{p,q}^{\text{CH}} = \frac{\epsilon_{\text{CH}} (1 - i\alpha_{\text{CH}})}{P_{\text{sat}}} \frac{1}{[1 - i(\omega_p - \omega_q)\tau_{\text{CH}}] [1 - i(\omega_p - \omega_q)\tau_{\text{SHB}}]}, \\ \eta_{p,q}^{\text{SHB}} = \frac{\epsilon_{\text{SHB}} (1 - i\alpha_{\text{SHB}})}{P_{\text{sat}}} \frac{1}{1 - i(\omega_p - \omega_q)\tau_{\text{SHB}}} \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $\alpha_{\text{CDP}}$ 、 $\alpha_{\text{CH}}$  和  $\alpha_{\text{SHB}}$  分别为与 CDP、CH 和 SHB 的线宽增强因子； $\epsilon_{\text{CDP}}$ 、 $\epsilon_{\text{CH}}$ 、 $\epsilon_{\text{SHB}}$  分别为与 CDP、CH 或 SHB 相关的增益压缩因子； $\tau_{\text{CDP}}$ 、 $\tau_{\text{CH}}$ 、 $\tau_{\text{SHB}}$  分别为载流子驰豫时间。(6) 式右边第 1 项表示增益压缩、增益饱和和对传输场的作用，右边第 2 项表示抽运光、转换光的作用；右边第 3 项表示 CDP、CH 和 SHB 对转换光的影响。

如图 1 所示，在接收端对转换光进行无串扰直接接收。转换光经 PBS 后分别用 PD 直接拍频，得到两束相互正交的偏振转换光的功率分别为

$$\begin{cases} P_{c-x} = \frac{1}{2} A_1^2 A_2^2 A_3^2 A_{\text{OFDM}} \prod_{j=1}^3 G_j R(\omega_1 - \omega_3) \\ P_{c-y} = \frac{1}{2} A_1^2 A_2^2 A_3^2 A_{\text{OFDM}} \prod_{j=1}^3 G_j R(\omega_2 - \omega_3) \end{cases}, \quad (8)$$

式中  $A_1$ 、 $A_2$  为两个抽运光的幅度， $A_3$  为信号光幅度， $A_{\text{OFDM}}$  为 OFDM 调制信号光的幅度， $R(\omega_1 - \omega_3)$  为角频率为  $\omega_1 - \omega_3$  的拍频波的转换效率系数， $R(\omega_2 - \omega_3)$  为角频率为  $\omega_2 - \omega_3$  的拍频波的转换效率系数， $G_j$  为 SOA 内的增益。由于转换光与原始信号光的偏振角无关，可得频率  $\omega_c = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3$  的转换光是偏振不敏感的。

不同波长的光获得的增益为

$$G_j = \exp \left\{ \int_0^L [\Gamma g_j(z) - \alpha_{\text{int}}] dz \right\}, \quad (9)$$

式中  $L$  为 SOA 的有源区长度。FWM 的过程是一个三阶非线性作用的过程,是 CH、CDP 和 SHB 三种超快非线性过程共同作用的结果。SOA 的增益系数与 FWM 产生的转换光的放大程度有关,较小的 SOA 增益会导致转换光功率过低而无法接收,因此必须将 SOA 的增益控制在一定的范围内,才能在接收端接收到无串扰的转换光。通过分析由非线性过程引起的增益系数变化,研究影响系统波长转换效率的因素。

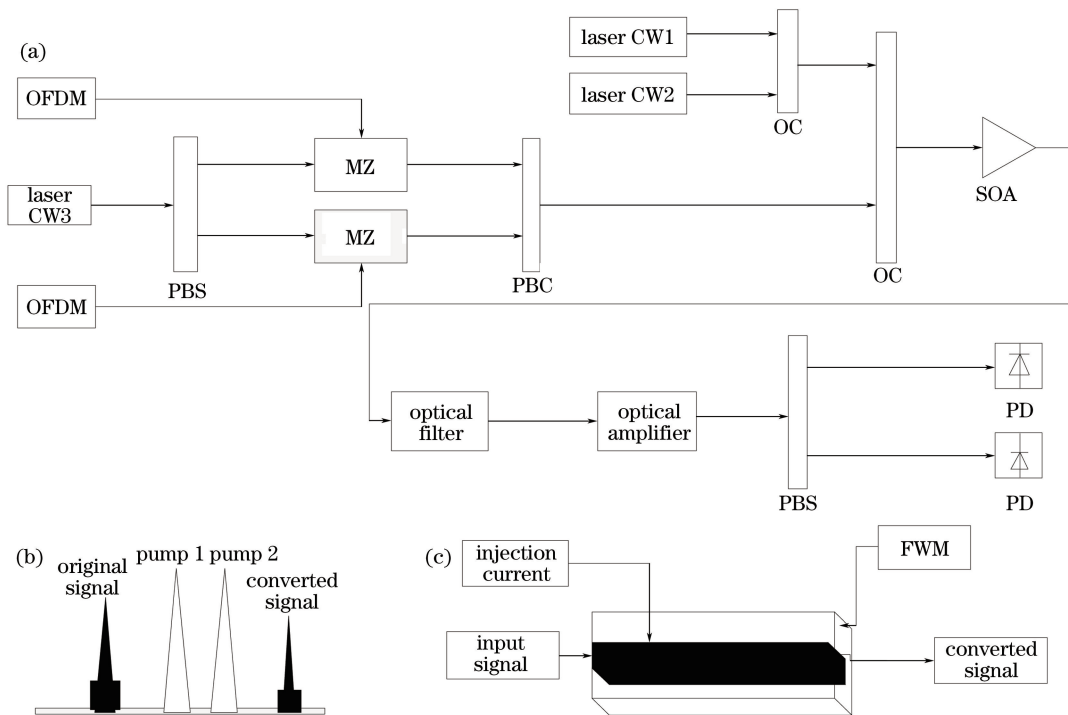


图 1 (a) 系统原理图; (b) 波长变换示意图; (c) SOA 中的 FWM 效应理论模型示意图

Fig. 1 (a) Diagram of system principle; (b) diagram of wavelength conversion; (c) theoretical model diagram of FWM effect in SOA

## 2.2 影响 SOA 中全光波长转换效率的因素

### 2.2.1 SOA 的增益饱和

光的受激发射是由有源层中光子与电子间的相互作用引起的。高密度的载流子注入或高强度的光输入均会引起 SOA 内的增益饱和。当高密度的电子或光子注入时,增益系数会偏离线性增长,系数增长很慢甚至呈负增长趋势。随着注入电子密度的增加,载流子对光场的屏蔽作用逐渐增强,减弱了由光子作用引起的受激辐射复合。当输入较高功率的信号光时,大量载流子消耗与及时补充之间失衡,使得增益增长受到限

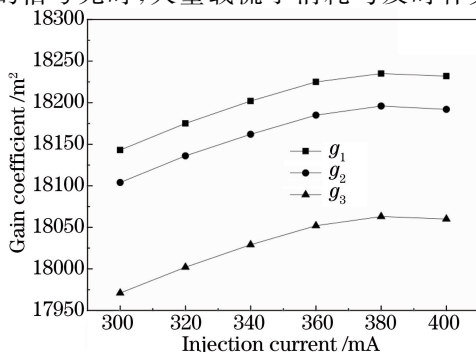


图 2 SOA 增益系数随注入电流的变化

Fig. 2 Variation in gain coefficient with injection current

制。因此,进行 FWM 时必须充分考虑 SOA 的增益饱和效应,将输入光功率及注入电流控制在一定的范围内,防止出现增益饱和效应,导致信号畸变。当光场限制因子为 0.25、有源区腔长为  $500 \mu\text{m}$ 、透明载流子浓度为  $1.4 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ 、腔内损耗为  $4000 \text{ m}^{-1}$ ,由(3)式可得,SOA 增益系数随注入电流的变化如图 2 所示。 $g_1$ 、 $g_2$  和  $g_3$  分别为两个抽运光和信号光的增益系数。SOA 的增益系数随注入电流的增大而增大。当注入电流增大至 380 mA 时,SOA 逐渐达到增益饱和,增益系数趋于平缓且不再随注入电流的增大而增大。

用饱和输出功率表示增益饱和<sup>[7]</sup>,SOA 的饱和输出功率可近似表示为

$$P_{3\text{dB}} = \frac{h\nu A \eta_0}{\tau \Gamma dg/dN}, \quad (10)$$

式中  $h\nu$  为光子能量, $\eta_0$  为 SOA 与光纤的耦合系数, $\tau$  为载流子寿命, $dg/dN$  为增益介质的微分增益, $A$  为 SOA 的横截面积。由(10)式可知,饱和输出功率与有源区横截面积成正比,与载流子寿命、光场限制因子及微分增益成反比。当注入的光功率低于 SOA 的饱和光功率时,由于没有达到 SOA 的增益饱和,波长转换效率随增益系数的增加而增加。当注入的光功率高于 SOA 的饱和光功率时,达到 SOA 的增益饱和,增益系数不再增加反而出现降低趋势,波长转换效率逐渐降低。因此,注入的抽运光功率和信号光功率均存在一个最佳点,不能达到 SOA 的增益饱和,最多也只能在增益饱和和附近。由此可知,SOA 的增益饱和对系统的波长转换效率有较大的影响。

### 2.2.2 SOA 内载流子浓度

由于 SOA 中的 FWM 效应主要依赖于载流子的变化,载流子的变化引起增益折射率的调制。载流子的变化速率直接影响通过 SOA 的输出信号质量。初始阶段,SOA 工作在稳定状态,各个分段内载流子浓度不随时间变化,则(3)式右边为 0。在初始时刻增大注入电流,可以增大有源区内的载流子浓度,缩短载流子寿命。

SOA 内的材料增益系数与载流子浓度和入射波长有关<sup>[7]</sup>,可表示为

$$g = (N - N_{\text{th}})dg/dN - a_2(\lambda - \lambda_N)^2 + a_3(\lambda - \lambda_N)^3, \quad (11)$$

式中  $a_2$ 、 $a_3$  为增益常数; $N_{\text{th}}$  为峰值  $\lambda_{\text{th}}$  处的透明载流子密度; $\lambda_N = \lambda_0 - a_4(N - N_{\text{th}})$ , $\lambda_0$  为透明峰值波长, $a_4$  为增益常数。由于 SOA 内各个波长的放大均以载流子消耗为代价,增益系数随 SOA 的节数逐渐减小,越到 SOA 的后端,增益系数越小,因此 SOA 的增益饱和一般发生在 SOA 的后端。对(3)、(4)和(9)式进行数值求解,可得增益系数随载流子浓度的变化如图 3 所示。当有源区内载流子浓度为  $2.055 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$  时,相应的增益系数分别为  $1.814 \times 10^4$ , $1.810 \times 10^4$ , $1.797 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。当载流子浓度为  $2.057 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$  时,相应的增益系数分别为  $1.820 \times 10^4$ , $1.816 \times 10^4$ , $1.802 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。由此可知,增益系数随载流子浓度的增大而增大。由(8)式可知,SOA 的增益系数与 FWM 产生的转换光的放大程度有关,较小的 SOA 增益会导致转换光功率过低而无法接收,必须将 SOA 增益控制在一定的范围内,才能在接收端接收到转换光信号。通过适当增加输入功率或注入电流,可提高载流子浓度,从而提高 SOA 的增益。

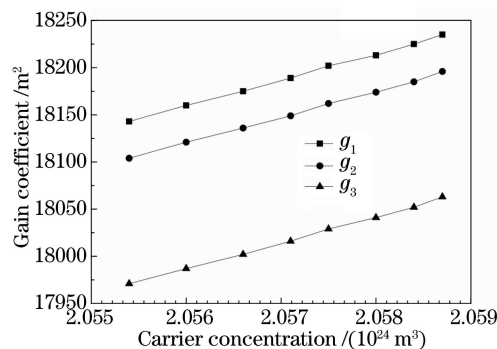


图 3 增益系数随载流子浓度的变化

Fig. 3 Variation in gain coefficient with carrier concentration

### 2.2.3 光场限制因子

光场限制因子  $\Gamma$  用于描述光场与 SOA 有源区的交叠程度,可表示为<sup>[7]</sup>

$$\Gamma = \frac{\int_{-W/2}^{W/2} \int_{-D/2}^{D/2} |U(x, y)|^2 dx dy}{\iint_{xy} |U(x, y)|^2 dx dy}, \quad (12)$$

式中  $U(x, y)$  为横向光强分布函数。光子密度可表示为

$$S(z, t) = \frac{\Gamma P(z, t)}{h\nu A\nu_g}, \quad (13)$$

式中  $P(z, t)$  为光强,  $\nu_g$  为群速率。由于光信号的增益主要来源于受激辐射, 由(12)、(13)式可知, 光场限制因子越大, SOA 有源区内对光场的限制能力越强, 有源区内光子数密度越大, 受激辐射速率越快, 载流子浓度越高。由图 3 可知, SOA 的增益系数随载流子浓度的升高而增大。在一定范围内增大光场限制因子, 则转换光功率增大, 系统误码率降低。由式(10)可知, 输出光的饱和功率与光场限制因子成反比, 且随着光场限制因子的增大继续增大, 受激辐射速率加快, 消耗了大量的载流子, 导致无法及时补充载流子, 从而加速了 SOA 的增益饱和。当光场限制因子增大到一定程度时, SOA 的增益系数不再增大, 转换光功率趋于平缓, 系统误码率( $R_{\text{BER}}$ )趋于稳定。若继续增大光场限制因子, 由于 SOA 的增益饱和效应, 增益系数不但不增大, 反而减小, 导致转换光发生畸变, 波长转换效率降低, 系统误码率升高。

### 3 仿真结果及分析

采用 VPI 软件搭建系统平台, 对基于 SOA 的垂直双抽运结构的高速 PM-OFDM 信号的 AOWC 进行模拟仿真, 如图 1 所示。垂直双抽运光的频率为 193.24 THz 和 193.2 THz, 信号光的频率为 193.1 THz。设定 SOA 的注入电流为 320 mA, 光场限制因子为 0.25, 有源区长度为 500  $\mu\text{m}$ , 透明载流子浓度为  $1.4 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ , 腔内损耗为 4000  $\text{m}^{-1}$ 。OFDM 信号光的调制速率为 5 Gbit/s, 子载波个数为 64。采用正交振幅调制(16QAM)编码格式, 经过串并变换和傅里叶逆变换, 将并行数据转化为串行数据, 再添加保护间隔, 形成 OFDM 码元。OFDM 信号经过马赫-曾德尔调制器的调制后与垂直双抽运光耦合, 耦合后的信号进入 SOA 发生 FWM 效应, 由光滤波器将频率为 193.34 THz 的偏振不敏感转换光滤出。转换光经 PBS 后分别用 PD 直接拍频, 最后对 16QAM-OFDM 信号进行解调。接收端先进行同步和信道估计, 再经过 FFT 变换得到 16QAM 的已调数据, 对该数据进行相应解调, 最后得到比特流。通过改变 SOA 的参数, 分析影响系统波长转换效率的因素。图 4 为系统中 16QAM-OFDM 信号  $x$  和  $y$  方向的星座图, 当注入电流为 360 mA、接收端功率为 -21.71 dBm 时, 相应的误码率分别为  $5.97 \times 10^{-4}$  和  $5.64 \times 10^{-4}$ , 实现了转换速率为 40 Gbit/s 的转换光的无串扰直接接收。PM-OFDM 信号在信道中传输时, 受到由光纤不对称引起的偏振模色散等非线性效应的影响, 通过信道估计和信道补偿可提高系统传输性能<sup>[19-20]</sup>。

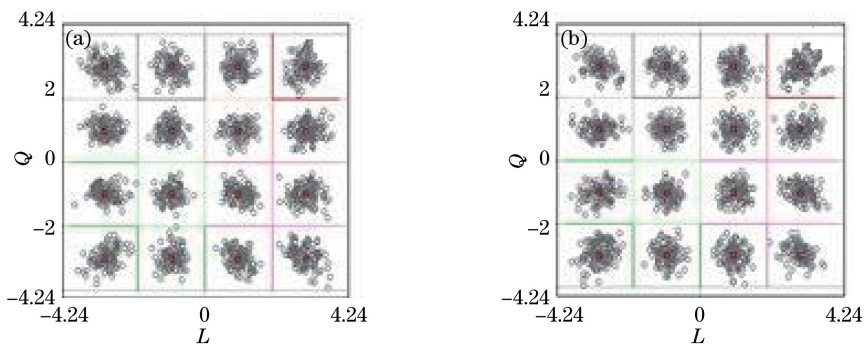


图 4 16QAM-OFDM 转换光的星座图。(a)  $x$  方向; (b)  $y$  方向

Fig. 4 Constellation diagrams of 16QAM-OFDM conversion light. (a)  $x$  direction; (b)  $y$  direction

如图 5 所示, 在达到 SOA 的增益饱和之前, 增加 SOA 的注入电流可以增加 SOA 有源区内的载流子个数并提高 SOA 的增益系数。当 SOA 的注入电流为 340 mA 时,  $x$ 、 $y$  方向系统的误码率分别为  $6.08 \times 10^{-4}$  和  $6.56 \times 10^{-4}$ 。当 SOA 的注入电流为 360 mA 时,  $x$ 、 $y$  方向系统的误码率分别为  $5.97 \times 10^{-4}$  和  $5.64 \times 10^{-4}$ 。由此可知, 未达到 SOA 的增益饱和之前, 随着 SOA 注入电流的增大, 系统误码率降低, 波长转

换效率增加。当 SOA 的注入电流增大到 380 mA 时,达到 SOA 的增益饱和,此时增益系数不再随注入电流的增大而增大,系统误码率趋于平缓。仿真结果与理论分析一致。

如图 6 所示,当注入电流为 360 mA、SOA 腔长为 500  $\mu\text{m}$  时,在一定范围内增大光场限制因子,有源光子密度增加,转换光功率增大,系统误码率降低。当光场限制因子为 0.15 时, $x$ 、 $y$  方向系统的误码率分别为  $1.04 \times 10^{-3}$  和  $3.08 \times 10^{-3}$ ;当光场限制因子为 0.25 时, $x$ 、 $y$  方向系统的误码率分别为  $5.97 \times 10^{-4}$  和  $5.64 \times 10^{-4}$ ;当光场限制因子增大到 0.30 时, $x$ 、 $y$  方向系统的误码率分别为  $7.54 \times 10^{-4}$  和  $6.18 \times 10^{-4}$ ,系统误码率趋于稳定。由于无法及时补充消耗的大量载流子,加速了 SOA 的增益饱和,导致 SOA 的增益系数不再增大,转换光功率趋于平缓。继续增大光场限制因子,由于达到 SOA 的增益饱和,转换光发生畸变,导致系统误码率升高,波长转换效率降低。仿真结果验证了理论分析的准确性。

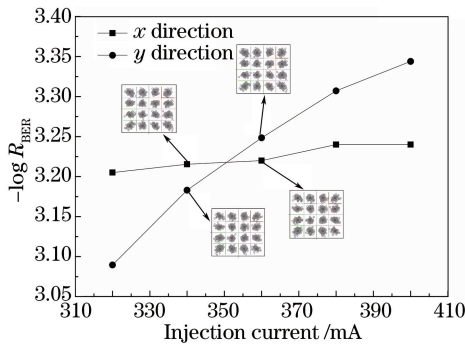


图 5 SOA 注入电流对误码率的影响

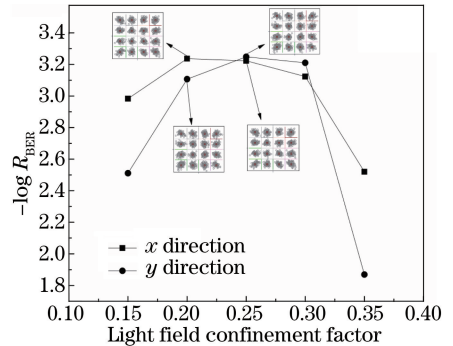


图 6 光场限制因子对误码率的影响

Fig. 5 Influence of SOA injection current on bit error rate

Fig. 6 Influence of light field confinement factor on bit error rate

## 4 结 论

理论分析并模拟仿真了基于 SOA 的高速 PM-OFDM 信号的 AOWC。SOA 的增益饱和、光场限制因子、载流子浓度均与系统波长转换效率有关。在未达到 SOA 的增益饱和之前或在 SOA 的增益饱和附近,增加注入电流,载流子浓度或光场限制因子均可提高系统波长转换效率。当输入功率或注入电流过高且达到 SOA 增益饱和,会导致信号发生畸变,接收端无法解调出转换光。仿真结果表明,采用垂直双抽运结构,当接收功率为  $-21.71$  dBm 时,相应的误码率分别为  $5.97 \times 10^{-4}$  和  $5.64 \times 10^{-4}$ ,实现了速率为 40 Gbit/s 的偏振不敏感 PM-OFDM 信号的无串扰直接接收。

## 参 考 文 献

- [1] Krzczanowicz L, Connelly M J. 40 Gb/s NRZ-DQPSK data all-optical wavelength conversion using four wave mixing in a bulk SOA[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(24): 2439-2441.
- [2] Filion B, Amiralizadeh S, An T N, *et al.* Wideband wavelength conversion of 16 Gbaud 16-QAM signals in a semiconductor optical amplifier[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2013: OTh1C.5.
- [3] Zhou Hui, Dong Ze, Cao Zizheng, *et al.* All-optical wavelength conversion for orthogonal frequency division multiplexing optical signal[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 959-964.  
周 慧, 董 泽, 曹子峥, 等. 正交频分复用信号的全光波长变换性能研究[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 959-964.
- [4] Liu Li, Xu Tiefeng, Dai Zhenxiang, *et al.* Research progress on optical millimeter-wave generation based on four-wave mixing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 050001.  
刘 丽, 徐铁峰, 戴振祥, 等. 四波混频光生毫米波技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 050001.
- [5] Mecozzi A, Mork J. Saturation effects in nondegenerate four-wave mixing between short optical pulses in semiconductor laser amplifiers[J]. IEEE Journal Selected Topics Quantum Electronics, 1997, 3(5): 1190-1207.
- [6] Wu B, Fu S, Wu J, *et al.* 40 Gb/s multifunction optical format conversion module with wavelength multicast capability using nondegenerate four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(20): 4446-4454.

- [7] Huang Dexiu, Zhang Xinliang, Huang Lirong. Semiconductor optical amplifier and its application[M]. Beijing: Science Press, 2012.  
黄德修, 张新亮, 黄黎蓉. 半导体光放大器及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [8] Kothari N C, Blumenthal D J. Influence of gain saturation, gain asymmetry, and pump/probe depletion on wavelength conversion efficiency of FWM in semiconductor optical amplifiers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1996, 32(10): 1810-1816.
- [9] Li P L, Huang D X, Zhang X L, *et al.* Ultrahigh-speed all-optical half adder based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifier[J]. Optics Express, 2006, 14(24): 11839-11847.
- [10] Li Z H, Li G F. Ultrahigh-speed reconfigurable logic gates based on four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(12): 1341-1343.
- [11] Mukai T, Saitoh T. Detuning characteristics and conversion efficiency of nearly degenerate four-wave mixing in a 1.5- $\mu\text{m}$  traveling-wave semiconductor laser amplifier[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1990, 26(5): 865-875.
- [12] Mecozzi A. Analytical theory of four-wave mixing in semiconductor amplifiers[J]. Optics Letters, 1994, 19(12): 892-894.
- [13] Cassioli D, Scotti S, Mecozzi A. Time-domain computer simulator of the nonlinear response of semiconductor optical amplifiers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(9): 1072-1080.
- [14] Lu J, Chen L, Dong Z, *et al.* Polarization insensitive wavelength conversion based on orthogonal pump four-wave mixing for polarization multiplexing signal in high-nonlinear fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(24): 5767-5774.
- [15] Mark M W K, Tsang H K, Chan K. Widely tunable polarization-independent all-optical wavelength converter using a semiconductor optical amplifier[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(5): 525-527.
- [16] Lu J, Yu J J, Zhou H, *et al.* Polarization insensitive wavelength conversion based on dual pump four wave mixing for polarization multiplexing signal in SOA[J]. Optics Communications, 2011, 284(22): 5364-5371.
- [17] Lu Jia, Ma Jie, Liu Jianfei, *et al.* Influence of orthogonal dual-pump PM-OFDM signal on all-optical wavelength conversion system[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(6): 0606001.  
卢嘉, 马杰, 刘剑飞, 等. 垂直双抽运结构 PM-OFDM 信号对全光波长变换系统的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0606001.
- [18] Lu Jia, Hu Yuanyuan, Liu Jianfei, *et al.* All-optical wavelength conversion based on parallel dual-pump for polarization multiplexing OFDM signal in SOA[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0205005.  
卢嘉, 胡园园, 刘剑飞, 等. 基于 SOA 的平行双抽运结构偏振复用 OFDM 信号的全光波长变换[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0205005.
- [19] Zeng Xiangye, Liu Jianfei, Wang Jingyi, *et al.* An improved ISFA channel estimation algorithm[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2014, 25(8): 1481-1487.  
曾祥焯, 刘剑飞, 王静宜, 等. 一种改进的 ISFA 信道估计算法[J]. 光电子 • 激光, 2014, 25(8): 1481-1487.
- [20] Liu Jianfei, Shi Huimin, Zeng Xiangye, *et al.* Channel estimation method based on wavelet and improved ISFA for CO-OFDM systems[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(12): 1205002.  
刘剑飞, 石慧敏, 曾祥焯, 等. 基于小波降噪和改进 ISFA 的 CO-OFDM 信道估计方法[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1205002.