

半导体光放大器中垂直双抽运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, 南京 210046)

2) (华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

(2011年8月2日收到; 2011年8月10日收到修改稿)

建立了输入信号光偏振方向任意情况下的半导体光放大器(SOA)中垂直双抽运四波混频(FWM)效应的完整宽带理论模型. 以基于SOA的垂直双抽运FWM型全光波长转换器为例, 通过数值模拟的方法, 理论研究了输入信号光与两抽运光功率、两抽运光与信号光之间的波长失谐量和输入信号光偏振方向等工作参数对SOA的垂直双抽运FWM效应及基于SOA的垂直双抽运FWM型波长转换器特性的影响.

关键词: 垂直双抽运四波混频, 半导体光放大器, 全光波长转换器, 转换效率

PACS: 42.65.-k, 42.65.Hw, 42.79.Nv

1 引言

超快全光信号处理技术是未来高速光网络中的关键技术之一. 目前, 各种全光信号处理技术主要是利用半导体光放大器(SOA)、非线性光纤和激光器等非线性元件中的一些非线性效应来实现的^[1-9]. SOA中的四波混频(FWM)效应具有对调制格式和调制速率都严格透明等优点, 因而被广泛地应用到各种全光信号处理技术中. 但FWM效应具有转换效率低、转换范围窄、偏振相关、噪声大等缺点, 使其应用受到了很大限制. 垂直双抽运FWM效应可以消除FWM效应的偏振相关性, 扩大转换范围, 基于SOA中垂直双抽运FWM效应的全光信号处理技术引起了广泛的关注, 研究者们对SOA中的垂直双抽运FWM效应在理论上和实验上都进行了研究^[1-7]. 在理论研究方面, 为了简单起见, 研究者主要采用简洁、直观的分块模型^[3-5]. 但是在分块模型中采用了一些近似和假设, 如把SOA中垂直双抽运FWM效应的整个过程简化为饱和增益段、三阶非线性段和放大自发

辐射(ASE)噪声段, 并假设SOA的增益谱和ASE谱是平坦的. 因此, 利用分块模型不能分析SOA内部载流子和光场随时间和空间的变化. 为了能够比较准确地研究SOA中垂直双抽运FWM效应载流子和光场的时间和空间分布等稳态和动态特性, 文献[7]建立了一种特殊情况下SOA中垂直双抽运FWM效应的分段理论模型, 该分段理论模型只考虑了两抽运光的偏振方向相互垂直、信号光与其中一个抽运光平行的情况. 对于输入信号光偏振方向任意情况下SOA中的垂直双抽运FWM效应, 尚未建立宽带理论模型进行深入准确的理论研究.

本文考虑了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ASE谱, 建立了当输入信号光偏振方向任意情况下SOA中垂直双抽运FWM效应的完整宽带理论模型. 在宽带理论模型中, 不仅考虑了SOA中发生的主要FWM过程, 也没有忽略一些比较微弱的FWM过程. 因此, 利用宽带理论模型可以更准确地对SOA中的垂直双抽运FWM效应进行理论研究. 利用宽带理论模型, 以基于SOA中垂直双抽运FWM效应的全

* 国家自然科学基金(批准号: 60707006)和江苏省高等学校自然科学基金(批准号: 09KJB510009)资助的课题.

† E-mail: lplthl@sohu.com

光波长转换为例,用数值模拟的方法从理论上研究了SOA的垂直双抽运FWM效应和基于SOA的垂直双抽运FWM型波长转换器特性与输入信号光、两抽运光功率、两抽运光与信号光之间的波长失谐量及输入信号光偏振方向等工作参数的关系.

2 SOA 中垂直双抽运 FWM 效应的宽带理论模型

SOA 中的垂直双抽运 FWM 效应是指三束不同波长的光 S1, S2 和 S3(波长分别为 λ_{S1} , λ_{S2} 和 λ_{S3}) 耦合输入到 SOA 中,在 SOA 中发生的 FWM 效应,其中两束输入抽运光 S1 和 S3 的偏振方向相互垂直,信号光 S2 的偏振方向任意.假设两抽运光分别对应 SOA 中的 TE 模和 TM

模(以下记为 $S1^{TE}$ 和 $S3^{TM}$),信号光 S2 可以分解为相互垂直的两分量 $S2^{TE}$ 和 $S2^{TM}$. 使信号光和其中一个抽运光 $S1^{TE}$ 的频差很小,而与另外一个抽运光 $S3^{TM}$ 的频差较大.在 SOA 中, $S1^{TE}$, S2 和 $S3^{TM}$ 发生 FWM 效应,主要包含以下几个过程: $S1^{TE}$ 和 $S2^{TE}$ 之间能够形成光栅,光栅散射 $S1^{TE}$ 和 $S2^{TE}$,产生两束新的光 $C1^{TE}$ ($\lambda_{C1} = 2\lambda_{S1} - \lambda_{S2}$) 和 $C2^{TE}$ ($\lambda_{C2} = 2\lambda_{S2} - \lambda_{S1}$); 光栅散射 $S2^{TM}$,产生 $C2^{TM}$ 和 $S1^{TM}$; 同时,光栅也散射 $S3^{TM}$,产生两束新的光 $C3^{TM}$ ($\lambda_{C3} = \lambda_{S1} + \lambda_{S3} - \lambda_{S2}$) 和 $C4^{TM}$ ($\lambda_{C4} = \lambda_{S2} + \lambda_{S3} - \lambda_{S1}$),这一过程即为垂直双抽运 FWM 效应.由垂直双抽运 FWM 效应产生的光 $C3^{TM}$ 上携带了输入信号光的强度和相位信息. SOA 中垂直双抽运 FWM 效应中各光波的偏振方向及其频率分布如图 1 所示.

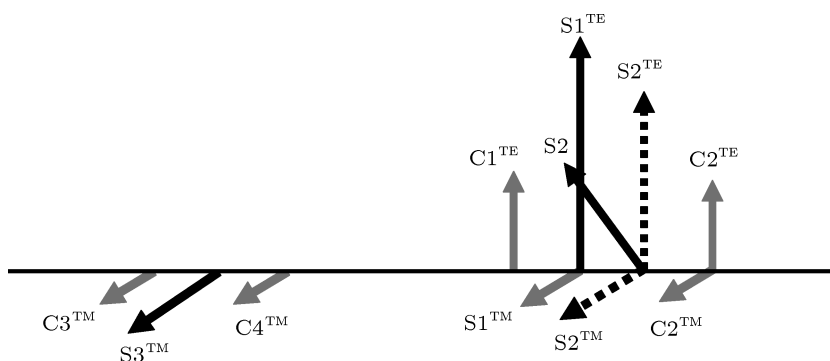


图 1 SOA 中垂直双抽运 FWM 效应中各光波的偏振方向及其频率分布

考虑了 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 ASE,建立输入信号光偏振方向任意情况下 SOA 中垂直双抽运 FWM 效应的宽带理论模型.在宽带理论模型中,不仅考虑了 SOA 中主要发生的 FWM 过程,也考虑了一些比较微弱的 FWM 过程.所以利用建立的宽带理论模型,可以更准确地对 SOA 中的垂直

双抽运 FWM 效应进行理论研究.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、抽运光和产生的新频率光的传输方程可表示为^[10,11](为了简单起见,在以下方程中省略了下标 i)

$$\begin{aligned} \frac{dA_{S1}^{TE}}{dz} = & \frac{1}{2} \left[\frac{\Gamma g_{S1}^{TE}}{1 + P/P_{sat}} (1 - i\alpha) - \alpha_{int} \right] A_{S1}^{TE} - \frac{1}{2} \frac{\Gamma g_{S1}^{TE}}{1 + P/P_{sat}} \left[(\eta_{S1^{TE}S2^{TE}} |A_{S2}^{TE}|^2 + \eta_{S1^{TE}C1^{TE}} |A_{C1}^{TE}|^2 \right. \\ & + \eta_{S1^{TE}C2^{TE}} |A_{C2}^{TE}|^2) A_{S1}^{TE} + \eta_{S2^{TE}S1^{TE}} A_{C1}^{TE} A_{S2}^{TE} A_{S1}^{TE*} + \eta_{S2^{TE}C2^{TE}} A_{S2}^{TE2} A_{C2}^{TE*} \\ & + \eta_{C1^{TE}S1^{TE}} A_{S2}^{TE} A_{C1}^{TE} A_{S1}^{TE*} + \eta_{C1^{TE}S2^{TE}} A_{C2}^{TE} A_{C1}^{TE} A_{S2}^{TE*} + \eta_{C2^{TE}S2^{TE}} A_{C1}^{TE} A_{C2}^{TE} A_{S2}^{TE*} \\ & + \eta_{S2^{TM}S1^{TM}} A_{C1}^{TE} A_{S2}^{TM} A_{S1}^{TM*} + \eta_{S2^{TM}C2^{TM}} A_{S2}^{TE} A_{S2}^{TM} A_{C2}^{TM*} + \eta_{S3^{TM}C3^{TM}} A_{C1}^{TE} A_{S3}^{TM} A_{C3}^{TM*} \\ & \left. + \eta_{S3^{TM}C4^{TM}} A_{S2}^{TE} A_{S3}^{TM} A_{C4}^{TM*} + \eta_{C2^{TM}S2^{TM}} A_{C1}^{TE} A_{C2}^{TM} A_{S2}^{TM*} + \eta_{C3^{TM}S3^{TM}} A_{S2}^{TE} A_{C3}^{TM} A_{S3}^{TM*} \right] \end{aligned}$$

$$+ \eta_{C_3 T M C_4 T M} A_{C_2}^{T E} A_{C_3}^{T M} A_{C_4}^{T M*} + \eta_{C_4 T M S_3 T M} A_{C_1}^{T E} A_{C_4}^{T M} A_{S_3}^{T M*} \Big], \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dA_{S_2}^{T E}}{dz} = & \frac{1}{2} \left[\frac{\Gamma g_{S_2}^{T E}}{1 + P/P_{sat}} (1 - i\alpha) - \alpha_{int} \right] A_{S_2}^{T E} - \frac{1}{2} \frac{\Gamma g_{S_2}^{T E}}{1 + P/P_{sat}} \\ & \times \left[(\eta_{S_2 T E S_1 T E} |A_{S_1}^{T E}|^2 + \eta_{S_2 T E C_1 T E} |A_{C_1}^{T E}|^2 + \eta_{S_2 T E C_2 T E} |A_{C_2}^{T E}|^2) A_{S_2}^{T E} \right. \\ & + \eta_{S_1 T E S_2 T E} A_{C_2}^{T E} A_{S_1}^{T E} A_{S_2}^{T E*} + \eta_{S_1 T E C_1 T E} A_{S_1}^{T E 2} A_{C_1}^{T E*} + \eta_{C_1 T E S_1 T E} A_{C_2}^{T E} A_{C_1}^{T E} A_{S_1}^{T E*} \\ & + \eta_{C_2 T E S_1 T E} A_{C_1}^{T E} A_{C_2}^{T E} A_{S_1}^{T E*} + \eta_{C_2 T E S_2 T E} A_{S_1}^{T E} A_{C_2}^{T E} A_{S_2}^{T E} \\ & + \eta_{S_1 T M S_2 T M} A_{C_2}^{T E} A_{S_1}^{T M} A_{S_2}^{T M*} + \eta_{S_3 T M C_3 T M} A_{S_1}^{T E} A_{S_3}^{T M} A_{C_3}^{T M*} + \eta_{S_3 T M C_4 T M} A_{C_2}^{T E} A_{S_3}^{T M} A_{C_4}^{T M*} \\ & + \eta_{C_2 T M S_1 T M} A_{C_1}^{T E} A_{C_2}^{T M} A_{S_1}^{T M*} + \eta_{C_2 T M S_2 T M} A_{S_1}^{T E} A_{C_2}^{T M} A_{S_2}^{T M*} + \eta_{C_3 T M S_3 T M} A_{C_2}^{T E} A_{C_3}^{T M} A_{S_3}^{T M*} \\ & \left. + \eta_{C_4 T M S_3 T M} A_{S_1}^{T E} A_{C_4}^{T M} A_{S_3}^{T M*} + \eta_{C_4 T M C_3 T M} A_{C_1}^{T E} A_{C_4}^{T M} A_{C_3}^{T M*} \right], \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dA_{C_1}^{T E}}{dz} = & \frac{1}{2} \left[\frac{\Gamma g_{C_1}^{T E}}{1 + P/P_{sat}} (1 - i\alpha) - \alpha_{int} \right] A_{C_1}^{T E} - \frac{1}{2} \frac{\Gamma g_{C_1}^{T E}}{1 + P/P_{sat}} \\ & \times \left[(\eta_{C_1 T E S_1 T E} |A_{S_1}^{T E}|^2 + \eta_{C_1 T E S_2 T E} |A_{S_2}^{T E}|^2 + \eta_{C_1 T E C_2 T E} |A_{C_2}^{T E}|^2) A_{C_1}^{T E} + \eta_{S_1 T E S_2 T E} A_{S_1}^{T E 2} A_{S_2}^{T E*} \right. \\ & + \eta_{S_1 T E C_2 T E} A_{S_2}^{T E} A_{S_1}^{T E} A_{C_2}^{T E*} + \eta_{S_2 T E C_2 T E} A_{S_1}^{T E} A_{S_2}^{T E} A_{C_2}^{T E*} + \eta_{S_1 T M S_2 T M} A_{S_1}^{T E} A_{S_1}^{T M} A_{S_2}^{T M*} \\ & + \eta_{S_1 T M C_2 T M} A_{S_2}^{T E} A_{S_1}^{T M} A_{C_2}^{T M*} + \eta_{S_2 T M C_2 T M} A_{S_1}^{T E} A_{S_2}^{T M} A_{C_2}^{T M*} + \eta_{S_3 T M C_4 T M} A_{S_1}^{T E} A_{S_3}^{T M} A_{C_4}^{T M*} \\ & \left. + \eta_{C_3 T M S_3 T M} A_{S_1}^{T E} A_{C_3}^{T M} A_{S_3}^{T M*} + \eta_{C_3 T M C_4 T M} A_{S_2}^{T E} A_{C_3}^{T M} A_{C_4}^{T M*} \right], \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dA_{C_2}^{T E}}{dz} = & \frac{1}{2} \left[\frac{\Gamma g_{C_2}^{T E}}{1 + P/P_{sat}} (1 - i\alpha) - \alpha_{int} \right] A_{C_2}^{T E} - \frac{1}{2} \frac{\Gamma g_{C_2}^{T E}}{1 + P/P_{sat}} \\ & \times \left[(\eta_{C_2 T E S_1 T E} |A_{S_1}^{T E}|^2 + \eta_{C_2 T E S_2 T E} |A_{S_2}^{T E}|^2 + \eta_{C_2 T E C_1 T E} |A_{C_1}^{T E}|^2) A_{C_2}^{T E} \right. \\ & + \eta_{S_1 T E C_1 T E} A_{S_2}^{T E} A_{S_1}^{T E} A_{C_1}^{T E*} + \eta_{S_2 T E S_1 T E} A_{S_2}^{T E 2} A_{S_1}^{T E*} + \eta_{S_2 T E C_1 T E} A_{S_1}^{T E} A_{S_2}^{T E} A_{C_1}^{T E*} \\ & + \eta_{S_2 T M S_1 T M} A_{S_2}^{T E} A_{S_2}^{T M} A_{S_1}^{T M*} + \eta_{S_3 T M C_3 T M} A_{S_2}^{T E} A_{S_3}^{T M} A_{C_3}^{T M*} \\ & \left. + \eta_{C_4 T M S_3 T M} A_{S_2}^{T E} A_{C_4}^{T M} A_{S_3}^{T M*} + \eta_{C_4 T M C_3 T M} A_{S_1}^{T E} A_{C_4}^{T M} A_{C_3}^{T M*} \right], \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dA_{S_1}^{T M}}{dz} = & \frac{1}{2} \left[\frac{\Gamma g_{S_1}^{T M}}{1 + P/P_{sat}} (1 - i\alpha) - \alpha_{int} \right] A_{S_1}^{T M} - \frac{1}{2} \frac{\Gamma g_{S_1}^{T M}}{1 + P/P_{sat}} \\ & \times \left[(\eta_{S_1 T M S_2 T M} |A_{S_2}^{T M}|^2 + \eta_{S_1 T M S_3 T M} |A_{S_3}^{T M}|^2 + \eta_{S_1 T M C_2 T M} |A_{C_2}^{T M}|^2 + \eta_{S_1 T M C_3 T M} |A_{C_3}^{T M}|^2 \right. \\ & + \eta_{S_1 T M C_4 T M} |A_{C_4}^{T M}|^2) A_{S_1}^{T M} + \eta_{S_2 T M S_3 T M} A_{C_3}^{T M} A_{S_2}^{T M} A_{S_3}^{T M*} + \eta_{S_2 T M C_2 T M} A_{S_2}^{T M 2} A_{C_2}^{T M*} \\ & + \eta_{S_2 T M C_4 T M} A_{S_3}^{T M} A_{S_2}^{T M} A_{C_4}^{T M*} + \eta_{S_3 T M C_4 T M} A_{S_2}^{T M} A_{S_3}^{T M} A_{C_4}^{T M*} \\ & + \eta_{C_2 T M C_4 T M} A_{C_3}^{T M} A_{C_2}^{T M} A_{C_4}^{T M*} + \eta_{C_3 T M S_3 T M} A_{S_2}^{T M} A_{C_3}^{T M} A_{S_3}^{T M*} \\ & + \eta_{C_3 T M C_4 T M} A_{C_2}^{T M} A_{C_3}^{T M} A_{C_4}^{T M*} + \eta_{S_2 T E C_2 T E} A_{S_2}^{T M} A_{S_2}^{T E} A_{C_2}^{T E*} \\ & \left. + \eta_{C_1 T E S_1 T E} A_{S_2}^{T M} A_{C_1}^{T E} A_{S_1}^{T E*} + \eta_{C_1 T E S_2 T E} A_{C_2}^{T M} A_{C_1}^{T E} A_{S_2}^{T E*} \right], \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dA_{S_2}^{T M}}{dz} = & \frac{1}{2} \left[\frac{\Gamma g_{S_2}^{T M}}{1 + P/P_{sat}} (1 - i\alpha) - \alpha_{int} \right] A_{S_2}^{T M} \\ & - \frac{1}{2} \frac{\Gamma g_{S_2}^{T M}}{1 + P/P_{sat}} \left[(\eta_{S_2 T M S_1 T M} |A_{S_1}^{T M}|^2 + \eta_{S_2 T M S_3 T M} |A_{S_3}^{T M}|^2 + \eta_{S_2 T M C_2 T M} |A_{C_2}^{T M}|^2 \right. \\ & + \eta_{S_2 T M C_3 T M} |A_{C_3}^{T M}|^2 + \eta_{S_2 T M C_4 T M} |A_{C_4}^{T M}|^2) A_{S_2}^{T M} + \eta_{S_1 T M S_2 T M} A_{C_2}^{T M} A_{S_1}^{T M} A_{S_2}^{T M*} \\ & + \eta_{S_1 T M S_3 T M} A_{C_4}^{T M} A_{S_1}^{T M} A_{S_3}^{T M*} + \eta_{S_1 T M C_3 T M} A_{S_3}^{T M} A_{S_1}^{T M} A_{C_3}^{T M*} + \eta_{S_3 T M C_3 T M} A_{S_1}^{T M} A_{S_3}^{T M} A_{C_3}^{T M*} \\ & \left. + \eta_{S_3 T M C_4 T M} A_{C_2}^{T M} A_{S_3}^{T M} A_{C_4}^{T M*} + \eta_{C_2 T M S_2 T M} A_{S_1}^{T M} A_{C_2}^{T M} A_{S_2}^{T M} + \eta_{C_2 T M S_3 T M} A_{C_3}^{T M} A_{C_2}^{T M} A_{S_3}^{T M*} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \eta_{C2TM C4TM} A_{S3}^{TM} A_{C2}^{TM} A_{C4}^{TM*} + \eta_{C3TMS3TM} A_{C2}^{TM} A_{C3}^{TM} A_{S3}^{TM*} + \eta_{C4TMS3TM} A_{S1}^{TM} A_{C4}^{TM} A_{S3}^{TM*} \\
 & + \eta_{S1TES2TE} A_{C2}^{TM} A_{S1}^{TE} A_{S2}^{TE*} + \eta_{S1TE C1TE} A_{S1}^{TM} A_{S1}^{TE} A_{C1}^{TE*} \\
 & + \eta_{C1TES1TE} A_{C2}^{TM} A_{C1}^{TE} A_{S1}^{TE*} + \eta_{C2TES2TE} A_{S1}^{TM} A_{C2}^{TE} A_{S2}^{TE*} \Big], \tag{6}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dA_{S3}^{TM}}{dz} = & \frac{1}{2} \left[\frac{\Gamma g_{S3}^{TM}}{1 + P/P_{sat}} (1 - i\alpha) - \alpha_{int} \right] A_{S3}^{TM} \\
 & - \frac{1}{2} \frac{\Gamma g_{S3}^{TM}}{1 + P/P_{sat}} \left[(\eta_{S3TMS1TM} |A_{S1}^{TM}|^2 + \eta_{S3TMS2TM} |A_{S2}^{TM}|^2 + \eta_{S3TMC2TM} |A_{C2}^{TM}|^2 \right. \\
 & + \eta_{S3TMC3TM} |A_{C3}^{TM}|^2 + \eta_{S3TMC4TM} |A_{C4}^{TM}|^2) A_{S3}^{TM} + \eta_{S1TMS2TM} A_{C4}^{TM} A_{S1}^{TM} A_{S2}^{TM*} \\
 & + \eta_{S2TMS1TM} A_{C3}^{TM} A_{S2}^{TM} A_{S1}^{TM*} + \eta_{S2TMC2TM} A_{C4}^{TM} A_{S2}^{TM} A_{C2}^{TM*} + \eta_{C2TMS2TM} A_{C3}^{TM} A_{C2}^{TM} A_{S2}^{TM*} \\
 & + \eta_{C3TMS1TM} A_{S2}^{TM} A_{C3}^{TM} A_{S1}^{TM*} + \eta_{C3TMS2TM} A_{C2}^{TM} A_{C3}^{TM} A_{S2}^{TM*} + \eta_{C3TMS3TM} A_{C4}^{TM} A_{C3}^{TM} A_{S3}^{TM*} \\
 & + \eta_{C4TMS2TM} A_{S1}^{TM} A_{C4}^{TM} A_{S2}^{TM*} + \eta_{C4TMS3TM} A_{C3}^{TM} A_{C4}^{TM} A_{S3}^{TM*} + \eta_{C4TMC2TM} A_{S2}^{TM} A_{C4}^{TM} A_{C2}^{TM*} \\
 & + \eta_{S1TES2TE} A_{C4}^{TM} A_{S1}^{TE} A_{S2}^{TE*} + \eta_{S1TE C1TE} A_{C3}^{TM} A_{S1}^{TE} A_{C1}^{TE*} + \eta_{S2TES1TE} A_{C3}^{TM} A_{S2}^{TE} A_{S1}^{TE*} \\
 & \left. + \eta_{S2TE C2TE} A_{C4}^{TM} A_{S2}^{TE} A_{C2}^{TE*} + \eta_{C1TES1TE} A_{C4}^{TM} A_{C1}^{TE} A_{S1}^{TE*} + \eta_{C2TES2TE} A_{C3}^{TM} A_{C2}^{TE} A_{S2}^{TE*} \right], \tag{7}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dA_{C2}^{TM}}{dz} = & \frac{1}{2} \left[\frac{\Gamma g_{C2}^{TM}}{1 + P/P_{sat}} (1 - i\alpha) - \alpha_{int} \right] A_{C2}^{TM} \\
 & - \frac{1}{2} \frac{\Gamma g_{C2}^{TM}}{1 + P/P_{sat}} \left[(\eta_{C2TMS1TM} |A_{S1}^{TM}|^2 + \eta_{C2TMS2TM} |A_{S2}^{TM}|^2 \right. \\
 & + \eta_{C2TMS3TM} |A_{S3}^{TM}|^2 + \eta_{C2TMC3TM} |A_{C3}^{TM}|^2 \\
 & + \eta_{C2TMC4TM} |A_{C4}^{TM}|^2) A_{C2}^{TM} + \eta_{S1TMC3TM} A_{C4}^{TM} A_{S1}^{TM} A_{C3}^{TM*} + \eta_{S2TMS1TM} A_{S2}^{TM2} A_{S1}^{TM*} \\
 & + \eta_{S2TMS3TM} A_{C4}^{TM} A_{S2}^{TM} A_{S3}^{TM*} + \eta_{S2TMC3TM} A_{S3}^{TM} A_{S2}^{TM} A_{C3}^{TM*} + \eta_{S3TMC3TM} A_{S2}^{TM} A_{S3}^{TM} A_{C3}^{TM*} \\
 & + \eta_{C4TMS3TM} A_{S2}^{TM} A_{C4}^{TM} A_{S3}^{TM*} + \eta_{C4TMC3TM} A_{S1}^{TM} A_{C4}^{TM} A_{C3}^{TM*} + \eta_{S1TE C1TE} A_{S2}^{TM} A_{S1}^{TE} A_{C1}^{TE*} \\
 & \left. + \eta_{S2TES1TE} A_{S2}^{TM} A_{S2}^{TE} A_{S1}^{TE*} + \eta_{S2TE C1TE} A_{S1}^{TM} A_{S2}^{TE} A_{C1}^{TE*} \right], \tag{8}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dA_{C3}^{TM}}{dz} = & \frac{1}{2} \left[\frac{\Gamma g_{C3}^{TM}}{1 + P/P_{sat}} (1 - i\alpha) - \alpha_{int} \right] A_{C3}^{TM} \\
 & - \frac{1}{2} \frac{\Gamma g_{C3}^{TM}}{1 + P/P_{sat}} \left[(\eta_{C3TMS1TM} |A_{S1}^{TM}|^2 + \eta_{C3TMS2TM} |A_{S2}^{TM}|^2 + \eta_{C3TMS3TM} |A_{S3}^{TM}|^2 \right. \\
 & + \eta_{C3TMC2TM} |A_{C2}^{TM}|^2 + \eta_{C3TMC4TM} |A_{C4}^{TM}|^2) A_{C3}^{TM} + \eta_{S1TMS2TM} A_{S3}^{TM} A_{S1}^{TM} A_{S2}^{TM*} \\
 & + \eta_{S1TMC2TM} A_{C4}^{TM} A_{S1}^{TM} A_{C2}^{TM*} + \eta_{S2TMC2TM} A_{S3}^{TM} A_{S2}^{TM} A_{C2}^{TM*} + \eta_{S3TMS2TM} A_{S1}^{TM} A_{S3}^{TM} A_{S2}^{TM*} \\
 & + \eta_{S3TMC2TM} A_{S2}^{TM} A_{S3}^{TM} A_{C2}^{TM*} + \eta_{S3TMC4TM} A_{S3}^{TM2} A_{C4}^{TM*} + \eta_{C4TMC2TM} A_{S1}^{TM} A_{C4}^{TM} A_{C2}^{TM*} \\
 & + \eta_{S1TES2TE} A_{S3}^{TM} A_{S1}^{TE} A_{S2}^{TE*} + \eta_{S1TE C2TE} A_{C4}^{TM} A_{S1}^{TE} A_{C2}^{TE*} + \eta_{S2TE C2TE} A_{S3}^{TM} A_{S2}^{TE} A_{C2}^{TE*} \\
 & \left. + \eta_{C1TES1TE} A_{S3}^{TM} A_{C1}^{TE} A_{S1}^{TE*} + \eta_{C1TES2TE} A_{C4}^{TM} A_{C1}^{TE} A_{S2}^{TE*} \right], \tag{9}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dA_{C4}^{TM}}{dz} = & \frac{1}{2} \left[\frac{\Gamma g_{C4}^{TM}}{1 + P/P_{sat}} (1 - i\alpha) - \alpha_{int} \right] A_{C4}^{TM} \\
 & - \frac{1}{2} \frac{\Gamma g_{C4}^{TM}}{1 + P/P_{sat}} \left[(\eta_{C4TMS1TM} |A_{S1}^{TM}|^2 + \eta_{C4TMS2TM} |A_{S2}^{TM}|^2 + \eta_{C4TMS3TM} |A_{S3}^{TM}|^2 \right. \\
 & + \eta_{C4TMC2TM} |A_{C2}^{TM}|^2 + \eta_{C4TMC3TM} |A_{C3}^{TM}|^2) A_{C4}^{TM} + \eta_{S2TMS1TM} A_{S3}^{TM} A_{S2}^{TM} A_{S1}^{TM*} \\
 & + \eta_{S3TMS1TM} A_{S2}^{TM} A_{S3}^{TM} A_{S1}^{TM*} + \eta_{S3TMS2TM} A_{C2}^{TM} A_{S3}^{TM} A_{S2}^{TM*} + \eta_{S3TMC3TM} A_{S3}^{TM2} A_{C3}^{TM*} \\
 & + \eta_{C2TMS1TM} A_{C3}^{TM} A_{C2}^{TM} A_{S1}^{TM*} + \eta_{C2TMS2TM} A_{S3}^{TM} A_{C2}^{TM} A_{S2}^{TM*} + \eta_{C3TMS1TM} A_{C2}^{TM} A_{C3}^{TM} A_{S1}^{TM*} \\
 & \left. + \eta_{C3TMS2TM} A_{C2}^{TM} A_{C3}^{TM} A_{S2}^{TM*} \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \eta_{S1^{TE}C1^{TE}} A_{S3}^{TM} A_{S1}^{TE} A_{C1}^{TE*} + \eta_{S2^{TE}S1^{TE}} A_{S3}^{TM} A_{S2}^{TE} A_{S1}^{TE*} + \eta_{S2^{TE}C1^{TE}} A_{C3}^{TM} A_{S2}^{TE} A_{C1}^{TE*} \\
 & + \eta_{C2^{TE}S1^{TE}} A_{C3}^{TM} A_{C2}^{TE} A_{S1}^{TE*} + \eta_{C2^{TE}S2^{TE}} A_{S3}^{TM} A_{C2}^{TE} A_{S2}^{TE*} \Big]. \quad (10)
 \end{aligned}$$

这里, A_j 为各光场的慢幅变化, $P = \sum_j |A_j|^2$ 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 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 为载流子密度脉动引起的线宽增强因子, $\eta_{jj'} (j \neq j')$ 为 FWM 耦合因子, 代表 FWM 光波之间的非线性相互作用.

考虑了 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

$$\begin{aligned}
 \pm \frac{dW_j^\pm(z, t)}{dz} = & [\Gamma g(N, \lambda_j) - \alpha_{\text{int}}] W_j^\pm(z, t) \\
 & + 2\Gamma R_{\text{st}}(N, \lambda_j) \frac{hc^2}{\lambda_j^3}, \quad (11)
 \end{aligned}$$

其中, $W_j(z, t)$ 为功率谱密度, 单位为 W/nm; $R_{\text{st}}(N, \lambda_j)$ 为在第 i 子段、波长为 λ_j 的受激发射系数; h 为普朗克常数; c 为光速.

描述 SOA 中载流子变化的速率方程为

$$\begin{aligned}
 \frac{dN}{dt} = & \frac{I}{ewdL} - (c_1 N + c_2 N^2 + c_3 N^3) \\
 & - \sum_j g_j \frac{G_j - 1}{\ln G_j} \frac{|A_j|^2 \lambda_j}{hcw d} \\
 & - \sum_{j'=1}^m g_{j'} \left[\frac{2g_{j'}}{\bar{g}_{j'}} \left(\frac{G_{j'} - 1}{\ln G_{j'}} - 1 \right) \right. \\
 & \left. + \frac{G_{j'} - 1}{\ln G_{j'}} \frac{\Delta\lambda (W_{j'}^+ + W_{j'}^-) \lambda_{j'}}{hcw d} \right] \\
 & (j = S1^{TE}, S2^{TE}, C1^{TE}, C2^{TE}, S1^{TM}, \\
 & S2^{TM}, S3^{TM}, C2^{TM}, C3^{TM}, C4^{TM}), \quad (12)
 \end{aligned}$$

其中, I 为注入电流, e 为电子电量, L , w 和 d 分别为 SOA 有源区的长、宽和高, C_1, C_2, C_3 分别为缺陷和俘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 和 G_j 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 结果及分析

利用建立的宽带理论模型, 以基于 SOA 的垂直双抽运 FWM 型全光波长转换器为例, 模拟研究了 SOA 中垂直双抽运 FWM 效应以及这种波长转换器的转换性能. 输入信号光 S2 的中心波长为 1551 nm, 输入信号光平均功率为 -20 dBm, 输入消光比为 15 dB; 两输入连续抽运光 S1 和 S3 的波长为 1550 和 1540 nm, 平均功率都为 -15 dBm; 输入信号光 S2 和抽运光 S1 之间的偏振夹角为 45°. 如无特殊说明, 上述参数不变, 其他计算所用的参数值与文献 [12] 相同.

由于 $C3^{TM}$ 是垂直双抽运 FWM 效应产生的光, 并且携带了输入信号光的强度和相位信息, 可以实现透明的波长转换. 因此, 下面研究输出转换光 $C3^{TM}$ 的功率、转换效率和消光比随输入信号光与两抽运光功率、两抽运光与信号光之间的波长失谐量和输入信号光偏振方向等工作参数的变化情况.

图 2 给出了输出转换光的功率、转换效率和消光比随输入信号光功率的变化情况. 在 SOA 中, 垂直双抽运 FWM 的效率由输入光功率和 SOA 的增益两者相互作用共同决定, 转换光的光功率与输入信号光功率基本成正比. 因此, 当输入信号光比较弱时, SOA 尚未达到饱和, 增益几乎不变, 此时随着输入信号光的增强, 输出转换光随之增强; 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, 如图 2(a) 所示. 因此, 随着输入信号光功率的增强, 转换效率先缓慢下降, 然后迅速下降, 如图 2(b) 所示.

图 2(c) 为转换光的消光比随输入信号光功率的变化情况. 当转换光为“0”时, 随着输入信号光的增强, SOA 都处于未饱和状态, 增益几乎不变. 所以转换光输出为“0”的功率随输入信号光功率的增大而增大. 当转换光为“1”时, 随着输入信号光的增强, SOA 由不饱和状态进入饱和状态, 增益下降, 导致转换光输出为“1”的功率随输入信号光功率的增大而下降. 因此, 随着输入信号光功率的增

强, 转换光的消光比先缓慢减小, 然后迅速减小.

图 3 给出了输出转换光的功率、转换效率和消光比随输入抽运光 $S1^{TE}$ 功率的变化情况. 从图 3(a) 可以看出, 随着抽运光 $S1^{TE}$ 功率的增强, 转换光先增大后减小. 这主要是由于转换光的光功率与输入抽运光 $S1^{TE}$ 的功率基本成正比. 当输入抽运光 $S1^{TE}$ 比较弱时, SOA 处于未饱和状态, 此时随着输入抽运光 $S1^{TE}$ 的增强, 输出转换光随之增强; 进一步增强输入抽运光 $S1^{TE}$, SOA 就处于深饱和状态, 增益下降, 输出转换光开始减弱. 这也导致了随着抽运光 $S1^{TE}$ 的增强, 转换效率先增大后减小, 如图 3(b) 所示.

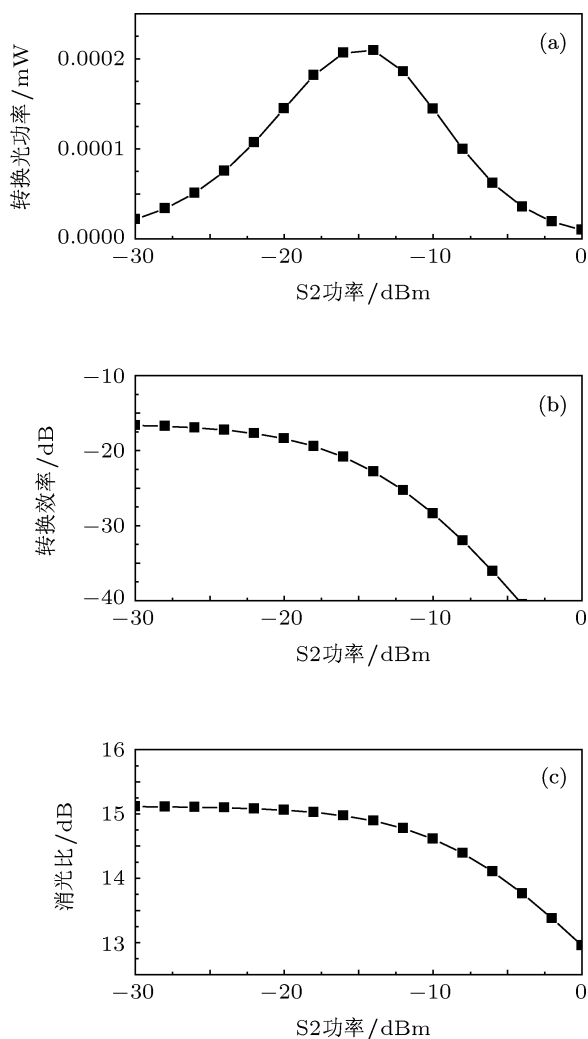


图 2 输出转换光功率、转换效率和消光比随输入信号光 $S2$ 功率的变化 (a) 输出转换光功率; (b) 转换效率; (c) 消光比

从 3(c) 可以看出, 随着抽运光 $S1^{TE}$ 功率的增大, 消光比变化非常小. 当输入抽运光 $S1^{TE}$ 比较弱

时, 转换光为“0”和“1”两种情况下, SOA 都不饱和, 增益基本相等; 随着输入抽运光 $S1^{TE}$ 的增强, 转换光为“0”和“1”两种情况下, SOA 都处于饱和状态, 增益也相差不大. 因此, 随着抽运光 $S1^{TE}$ 功率的增大消光比几乎不变.

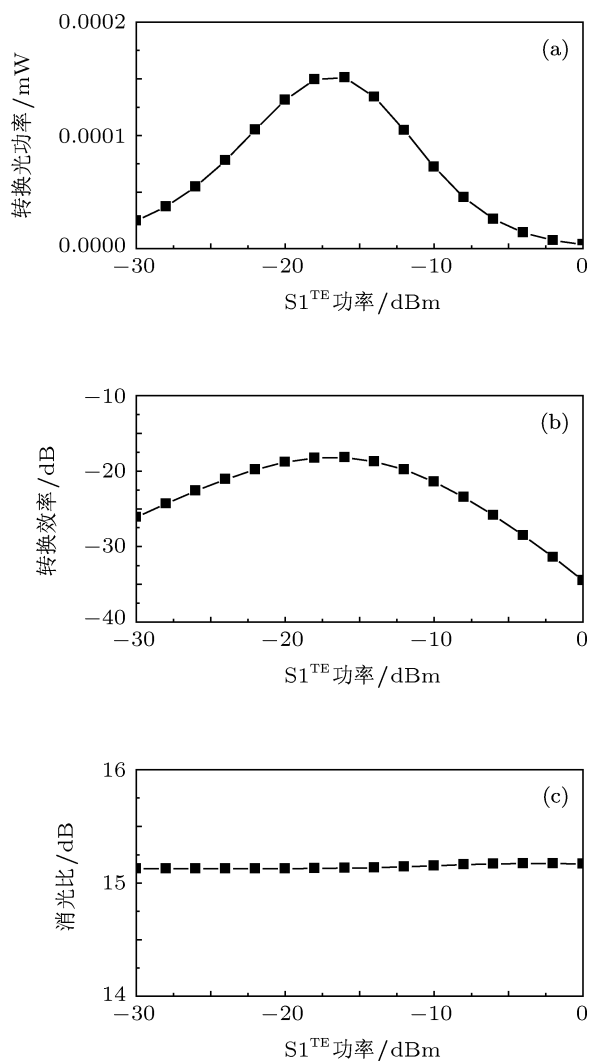


图 3 输出转换光功率、转换效率和消光比随输入抽运光 $S1^{TE}$ 功率的变化 (a) 输出转换光功率; (b) 转换效率; (c) 消光比

转换光功率、转换效率和消光比随输入抽运光 $S3^{TM}$ 功率的变化情况如图 4 所示. 与抽运光 $S1^{TE}$ 功率的影响类似, 随着输入抽运光 $S3^{TM}$ 功率的增大, 转换光功率和转换效率也都是先增大后减小 (如图 4(a) 和 (b) 所示), 消光比几乎不变 (如图 4(c) 所示). 因此, 对于输入抽运光 $S1^{TE}$ 和 $S3^{TM}$, 它们的功率选取存在一个最佳值.

固定输入信号光和抽运光 $S3^{TM}$ 的波长分别为 1551 和 1540 nm, 改变抽运光 $S1^{TE}$ 的波长, 从

而改变输入信号光和抽运光 $S1^{TE}$ 的波长失谐量. 图 5(a) 给出了转换光功率随输入信号光和抽运光 $S1^{TE}$ 的波长失谐量的变化情况. 从图 5(a) 可以看出, 当输入信号光和抽运光 $S1^{TE}$ 的波长失谐量增大时, 转换光的功率急剧下降. 转换光 $C3^{TM}$ 主要是由 $S1^{TE}$ 和 $S2^{TE}$ 形成的光栅散射 $S3^{TM}$ 产生的, 在输入信号光和抽运光 $S1^{TE}$ 的波长失谐量小的情况下, 带间过程载流子密度脉动效应占主导地位, 在失谐量大的情况下, 快速带内过程载流子加热和光谱烧孔占主导地位, 而带内过程比带间过程弱, 因此 FWM 效应随波长失谐量的增大而迅速减弱. 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下降, 如图 5(b) 所示. 从 5(c) 可以看出, 随着输入信号光和抽运光 $S1^{TE}$ 波长失谐量的增大消光比几乎没什么改变.

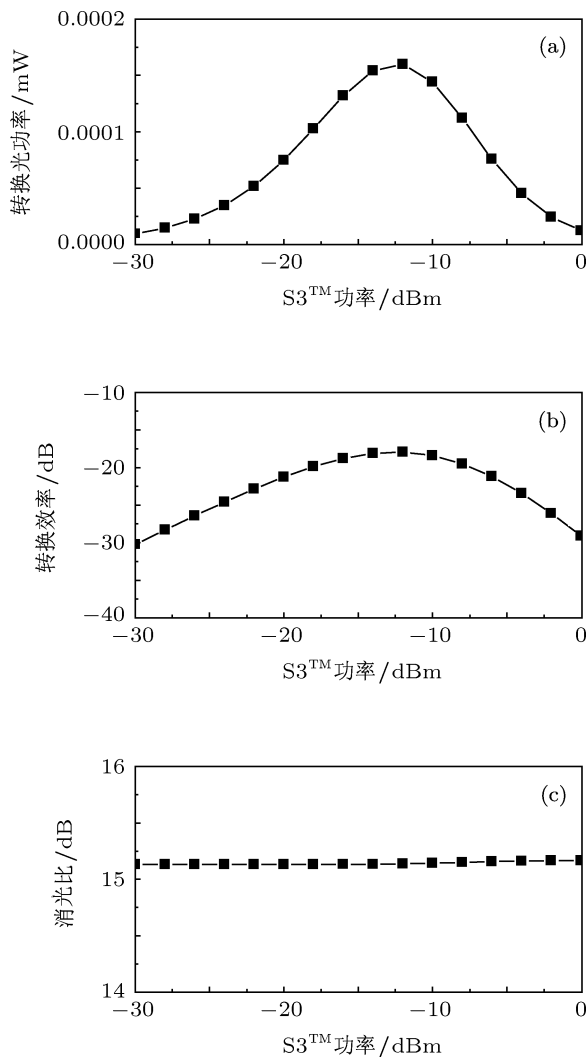


图 4 输出转换光功率、转换效率和消光比随输入抽运光 $S3^{TM}$ 功率的变化 (a) 输出转换光功率; (b) 转换效率; (c) 消光比

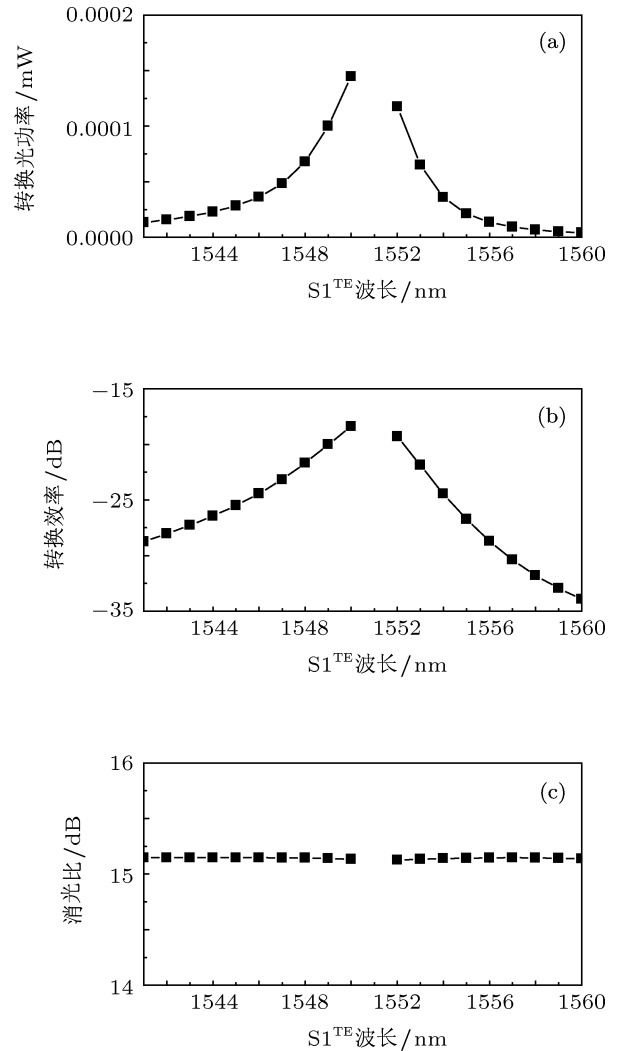


图 5 当信号光和抽运光 $S3^{TM}$ 的波长分别为 1551 和 1540 nm 时, 输出转换光功率、转换效率和消光比随输入抽运光 $S1^{TE}$ 波长的变化 (a) 输出转换光功率; (b) 转换效率; (c) 消光比

固定输入信号光和抽运光 $S1^{TE}$ 的波长分别为 1551 和 1550 nm, 使抽运光 $S3^{TM}$ 波长在 1530 到 1570 nm 范围内变化, 以改变输入信号光和抽运光 $S3^{TM}$ 的波长失谐量. 图 6(a) 给出了转换光功率随输入抽运光 $S3^{TM}$ 波长的变化情况. 从图 6(a) 可以看出, 当输入抽运光 $S3^{TM}$ 与输入信号光失谐量增大时, 转换光功率随之减小. 增大输入信号光和抽运光 $S3^{TM}$ 的波长失谐量, 虽然此时输入信号光和抽运光 $S1^{TE}$ 的波长失谐量不变, 对产生转换光有主要贡献的 FWM 过程没有影响, 但对产生转换光有较弱贡献的两个 FWM 过程会有所影响, 即 $S3^{TM}$, $S2^{TM}$ 形成的光栅散射 $S1^{TM}$, $S3^{TM}$, $C2^{TM}$ 形成的光栅散射 $S2^{TM}$ (见 (9) 式), 从而使转

换光功率减小. 但相对于输入抽运光 $S1^{TE}$ 与输入信号光失谐量的影响, 减小的幅度要小得多. 因此, 转换效率随输入抽运光 $S3^{TM}$ 与输入信号光失谐量的增大变化不大, 如图 6(b) 所示. 这与文献 [6, 7] 中的结果一致. 从图 6(c) 可以看出, 随着输入信号光和抽运光 $S3^{TM}$ 波长失谐量的增大, 消光比也几乎不变.

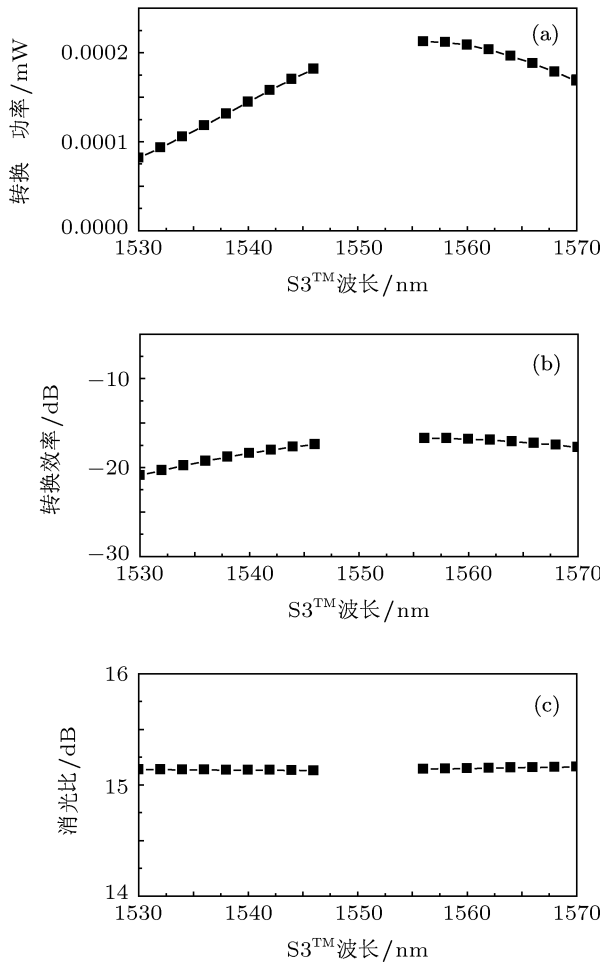


图 6 当信号光和抽运光 $S1^{TE}$ 的波长分别为 1551 和 1550 nm 时, 输出转换光功率、转换效率和消光比随输入抽运光 $S3^{TM}$ 波长的变化 (a) 输出转换光功率; (b) 转换效率; (c) 消光比

在垂直双抽运 FWM 效应中, 输入信号光的偏振方向是任意的, 它与抽运光 $S1^{TE}$ 存在一个偏振夹角. 研究转换光功率、转换效率和消光比随输入信号光和抽运光 $S1^{TE}$ 的偏振夹角的变化情况, 从而研究输入信号光偏振方向对垂直双抽运 FWM 效应的影响. 图 7(a) 给出了转换光功率随输入信号光和抽运光 $S1^{TE}$ 的偏振夹角的变化情况. 从图 7(a) 可以看出, 随着偏振夹角的增大, 转换光功

率先缓慢减小, 然后急剧减小. 随着输入信号光和抽运光 $S1^{TE}$ 的偏振夹角的增大, 转换效率与转换光功率的变化趋势类似, 先是几乎不变, 然后开始减小, 最后急剧减小, 如图 7(b) 所示. 因此, 垂直双抽运 FWM 效应在很大范围内对输入信号光的偏振不敏感. 这与文献 [6, 7] 中的结果一致. 从图 7(c) 可以看出, 消光比随着输入信号光和抽运光 $S3^{TM}$ 波长失谐量的增大几乎不变.

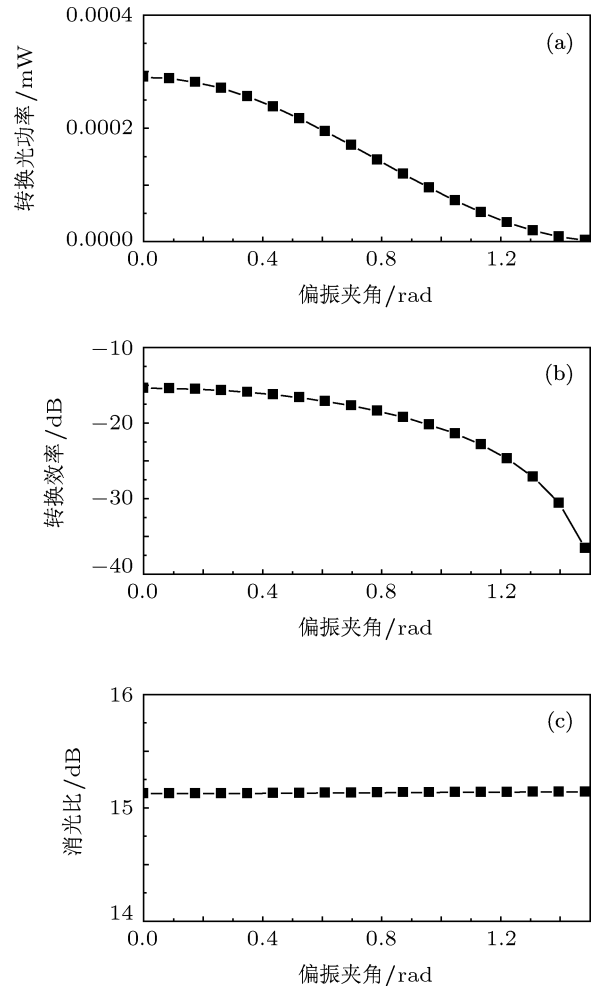


图 7 输出转换光功率、转换效率和消光比随输入信号光和抽运光 $S1^{TE}$ 的偏振夹角的变化 (a) 输出转换光功率; (b) 转换效率; (c) 消光比

4 结论

本文建立了输入信号光偏振方向任意情况下 SOA 中垂直双抽运 FWM 效应的完整宽带理论模型. 以基于 SOA 中垂直双抽运 FWM 的全波长转换为例, 通过数值模拟的方法对 SOA 中垂直

双抽运 FWM 效应和波长转换性能进行了理论研究, 分析了输入信号光功率、两抽运光功率、波长以及信号光偏振态对输出特性的影响. 研究结果表明: SOA 中垂直双抽运 FWM 效应产生的转换光随着输入信号光和两个抽运光的变化都是先增强后减弱; 波长转换效率随输入信号光的增强先缓慢下降, 然后迅速下降, 随着两输入抽运光的增强先增大后减小, 消光比随输入信号光的增强而减小, 但几乎不受两抽运光功率变化影响. 因此, 对于两输

入抽运光存在着最佳功率值. 虽然当输入信号光和抽运光 $S1^{TE}$ 的波长失谐量增大时, 输出转换光功率和转换效率随之急剧下降, 但当输入信号光与抽运光 $S3^{TM}$ 的波长失谐量增大时, 输出转换光功率随之小幅度减小, 转换效率变化不大, 消光比几乎不变. 所以, 利用 SOA 中的垂直双抽运 FWM 效应可以扩大波长转换范围. 垂直双抽运 FWM 效应在很大范围内对输入信号光的偏振不敏感.

- [1] Wong C S, Tsang H K 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 129
- [2] Hsu D Z, Lee S L, Gong P M, Lin Y M, Lee S S W, Yuang M C 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 1903
- [3] Chow K K, Shu C, Mak M W K 2004 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **10** 1197
- [4] Hong Y, Spencer P S, Shore K A 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 152
- [5] Lacey J P R, Summerfield M, Madden S J 1998 *J. Lightwave Technol.* **16** 2419
- [6] Hui Z Q, Zhang J G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 074220 (in Chinese) [惠战强, 张建国 2011 物理学报 **60** 074220]
- [7] Hsieh J T, Gong P M, Lee S L, Wu J 2004 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **10** 1187
- [8] Dong J J, Zhang X L, Wang Y, Huang D X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2222 (in Chinese) [董建绩, 张新亮, 王阳, 黄德修 2008 物理学报 **57** 2222]
- [9] Dong J J, Zhang X L, Fu S N, Shen P, Huang D X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2250 (in Chinese) [董建绩, 张新亮, 付松年, 沈平, 黄德修 2007 物理学报 **56** 2250]
- [10] Kyo I, Takaaki M, Tadashi S 1987 *Appl. Phys. Lett.* **51** 1051
- [11] Mukai T, Saitoh T 1990 *IEEE J. Quantum Electron.* **26** 865
- [12] Li P L, Huang D X, Zhang X L, Zhu G X 2006 *Opt. Express* **14** 11839

Theoretical investigation of orthogonal dual-pump four-wave mixing in semiconductor optical amplifier*

Li Pei-Li^{1)†} Shi Wei-Hua¹⁾ Huang De-Xiu²⁾ Zhang Xin-Liang²⁾

1) (College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

2) (Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(Received 2 August 2011; revised manuscript received 10 August 2011)

Abstract

A comprehensive broad-band model of orthogonal dual-pump four-wave mixing (FWM) in semiconductor optical amplifier (SOA) is presented in the case of the polarization state of the input signal being arbitrary. By performing numerical simulation and taking the all-optical wavelength conversion based on orthogonal dual-pump FWM in an SOA for example, the effects of the input light powers, frequency detuning and polarization state of the input signal on the orthogonal dual-pump FWM and the performances of wavelength conversion are theoretically investigated.

Keywords: orthogonal dual-pump four-wave mixing, semiconductor optical amplifier, all-optical wavelength conversion, conversion efficiency

PACS: 42.65.-k, 42.65.Hw, 42.79.Nv

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60707006) and the Natural Science Foundation of Institution of Higher Education of Jiangsu Province, China (Grant No. 09KJB510009).

† E-mail: lp1thl@sohu.com