

基于半导体光放大器的交叉增益型波长转换器 转换特性的研究*

张新亮 孙军强 刘德明 黄德修

(华中理工大学光电子工程系, 武汉 430074)

易河清

(武汉邮电科学研究院, 武汉 430074)

(1999 年 7 月 5 日收到)

从理论和实验上研究了基于半导体光放大器的交叉增益型波长转换器的转换特性. 实验研究了转换特性与信号调制格式、放大器增益的关系. 利用大信号分析模型讨论了消光比、平均功率转换效率和交流转换效率等性能与平均抽运功率、探测功率及放大器增益特性之间的关系. 结果表明, 交流转换效率能综合消光比和平均功率转换效率两种指标, 在转换器性能优化中有重要的作用. 交叉增益型波长转换器输入动态范围较小, 很难实现对信号调制格式透明, 放大器的增益是取得最佳转换性能的关键.

PACC: 4265P; 4255P; 4265K

1 引 言

全光波长转换将逐步取代现行的时隙交换, 成为全光网络的关键技术. 实现全光波长转换的工作方式有很多, 但以基于半导体光放大器的交叉增益型(XGM)、交叉相位型(XPM)和四波混频型(FWM)等三种方式研究的最为广泛. 相比较而言, 交叉增益型波长转换器具有结构简单、容易实现、转换效率高、转换波长范围宽等优点^[1], 最高转换速率已能达 100 Gbit/s^[2], 具有良好的应用前景.

全光波长转换器应用于通信系统中要求具有对调制格式透明的特点^[1], 但目前尚没有调制格式对转换特性影响的报道. 本文实验上研究了不同调制格式对交叉增益型波长转换器转换特性的影响, 并从理论上探讨了调制格式影响转换特性的实质. 从波长转换器的大信号分析模型出发, 考虑放大器增益谱的色散性和非对称性, 讨论了波长转换器的几种关键指标与平均抽运功率、探测功率及放大器增益特性等之间的关系. 另外, 文献中没有对转换效率的明确定义, 本文提出平均功率转换效率和交流转换效率两种不同的概念, 并阐明了交流转换效率在

转换器性能优化中的作用. 给出了 1550 nm 窗口的波长转换实验系统, 从转换器的大信号模型出发, 建立了转换特性(转换效率和消光比)的理论模型, 并对结果进行了分析讨论.

2 实验系统

基于半导体光放大器交叉增益型波长转换器的实验系统如图 1 所示. 实验中, 波长为 1549 nm、连续的探测激光和波长为 1556 nm、强度调制的抽运激光经 3 dB 耦合器同时耦合进光放大器中, 适当条件下引起放大器的增益饱和. 探测光所获得的增益会呈现与抽运光相反的调制作用, 因而连续的探测光经过放大器后就携带上了抽运光的调制信息, 即实现了信息在波长之间的转换. 采用的放大器是实验室自行研制的混合应变量子阱激光放大器, 透明时增益峰值波长为 1539 nm, 工作条件下 3dB 增益带宽为 60 nm. 放大器前采用一偏振控制器 pc 来控制输入光信号的偏振态. 放大器后用一个带宽为 1 nm 的可调滤波器来滤出转换光信号, 利用光谱仪测定转换后光信号的波长, 或经光电转换探头转换成电信号在示波器上观察信号波形. 图 2 所示为利

* 国家高科技研究发展计划(批准号: 863-307-16-03)和湖北省自然科学基金(批准号: 97J100)资助的课题.

用光谱仪测的抽运光(图 2(a))、探测光(图 2(b))和转换后滤波器输出信号(图 2(c))的光谱,可见输出

信号波长与探测光波长一致,可以证明实现了波长转换.

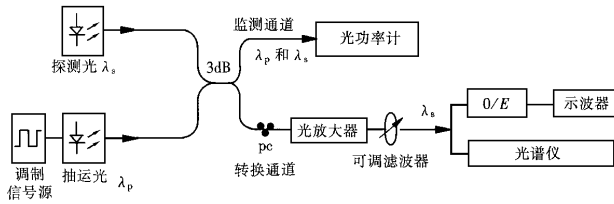


图 1 交叉增益型波长转换器实验系统结构示意图

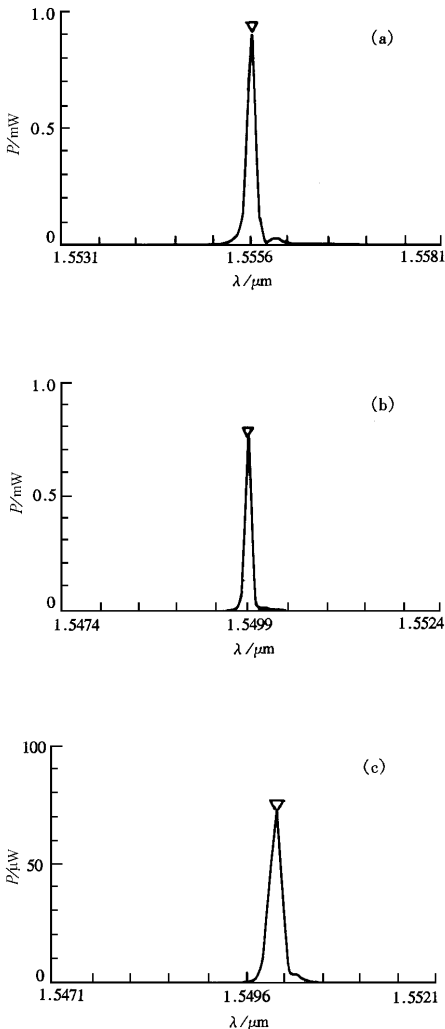


图 2 抽运光、探测光以及转换输出光谱图

3 理论模型

交叉增益型波长转换器中的抽运光大都深度调制,因而需要采用大信号分析模型来进行理论研究.若同时考虑放大器增益的色散性和有源区内部损耗,很难对转换器的转换特性进行分析.由于放大器的内部损耗可近似等效为放大器两端的耦合损耗^[3].若讨论耦合进放大器的等效功率时,就可以认为内部损耗为 0.

为便于分析,先定义以下两个变量:

$$x_1 = x_1(z) = p_1(z) \mathcal{V} p_1^{\text{sat}},$$

$$x_2 = x_2(z) = p_2(z) \mathcal{V} p_2^{\text{sat}},$$

其中, x_1 是归一化抽运光功率, x_2 是归一化探测光功率, p_1^{sat} 是抽运通道饱和输出光功率, p_2^{sat} 是探测通道饱和输出光功率, $p_1(z)$ 是抽运光功率, $p_2(z)$ 是探测光功率.

由稳态时的载流子速率方程和行波传输方程,可得到

$$\frac{I_s}{eV} - N(z) = x_1 [N(z) - N_{01}] + x_2 [N(z) - N_{02}], \quad (1)$$

$$\frac{dx_1}{dz} = [\Gamma g_{N1}(N(z) - N_{01})] x_1, \quad (2)$$

$$\frac{dx_2}{dz} = [\Gamma g_{N2}(N(z) - N_{02})] x_2, \quad (3)$$

其中 I_s 、 e 、 V 、 τ_s 、 $N(z)$ 、 g_{N1} 、 g_{N2} 、 Γ 、 N_{01} 和 N_{02} 分别代表放大器注入电流、单位电荷量、有源区体积、载流子寿命、载流子浓度、抽运光微分增益、探测光微分增益、模场限制因子、抽运通道透明载流子浓度和探测通道透明载流子浓度.

利用 $\frac{I_s}{eV} - N(z) = \left(\frac{I_s}{eV} - N_{01} \right) - [N(z) - N_{01}]$ 以

及将 2 和 3 式代入(1)式中 并对 z 在 0 到 L 上积分, 可得到

$$\Gamma_{gN1} \left(\frac{I\tau_s}{eV} - N_{01} \right) L - \ln \left[\frac{x_1(L)}{x_1(0)} \right] \\ = [x_1(L) - x_1(0)] + \beta [x_2(L) - x_2(0)] \quad (4)$$

同理, 对于探测通道也可得到类似的方程

$$\Gamma_{gN2} \left(\frac{I\tau_s}{eV} - N_{02} \right) L - \ln \left[\frac{x_2(L)}{x_2(0)} \right] \\ = \frac{1}{\beta} [x_1(L) - x_1(0)] + [x_2(L) - x_2(0)] \quad (5)$$

其中 $\beta = g_{N1}/g_{N2}$, 考虑增益谱的色散和非对称性可得到^[4]

$$\beta = \frac{1 + a_1(\lambda_1 - \lambda_p) + a_2(\lambda_1 - \lambda_p)^2}{1 + a_1(\lambda_2 - \lambda_p) + a_2(\lambda_2 - \lambda_p)^2},$$

其中 a_1, a_2 是增益谱模拟经验系数; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_p$ 分别是抽运光波长、探测光波长和透明时放大器增益峰值波长。

显然, 方程(4)和(5)中等式左边第一项都是定值, 因而可以利用这两个方程求出抽运通道和探测通道的输出光功率, 进而得到波长转换器的转换效率和消光比特性。

3.1 消光比模型

当信号的比特周期远大于信号在放大器中的渡越时间时(速率小于 10 Gbit/s), 可将调制信号中的传号("1"信号)和空号("0")分开来考虑, 因而可得初始条件 $x_1(0) = \{x_{10}^{\text{on}}, x_{10}^{\text{off}}\}$ 。另外, 探测通道输入光是连续光, 因而 $x_2(0) = x_{20}$ 。将初始条件代入(4)和(5)式中, 就可以分别求出 $x_1(L) = \{x_{1L}^{\text{on}}, x_{1L}^{\text{off}}\}$, $x_2(L) = \{x_{2L}^{\text{off}}, x_{2L}^{\text{on}}\}$ 。

根据消光比的定义, 可得到波长转换器的输出消光比

$$ER_{\text{out}} = x_{2L}^{\text{on}}/x_{2L}^{\text{off}} = G_2(x_{10}^{\text{off}}) \backslash G_2(x_{10}^{\text{on}}), \quad (6)$$

其中 $G_2(x_{10}^{\text{off}})$ 和 $G_2(x_{10}^{\text{on}})$ 分别是抽运光为空号和传号时对应的探测光经过放大器后获得的增益。

3.2 平均功率转换效率

我们定义波长转换器的平均功率转换效率为转换输出光信号的平均功率与抽运通道输入光信号的平均功率之比, 即

$$\eta_{\text{avg}} = \frac{P_{2L}}{P_{10}} = \frac{x_{2L} P_2^{\text{sat}}}{x_{10} P_1^{\text{sat}}}, \quad (7)$$

而饱和输出功率可表示为

$$P_i^{\text{sat}} = \frac{Ahc/\lambda_i}{\Gamma\tau_s g_{Ni}} \quad i = 1, 2, \quad (8)$$

其中 A, h, c 分别代表有源区横向剖面积、普朗克常量和真空中光速。

另一方面, 光信号被某一调制格式调制后, 其平均功率就与调制格式密切相关。以非归零(NRZ)信号为例, 设传号在整个数据流中所占比例为 P_e^1 , 则空号所占比例为 $1 - P_e^1$ 。这样, 光信号的平均功率就可以表示为

$$P_i = P_e^1 P_i^{\text{on}} + (1 - P_e^1) P_i^{\text{off}}. \quad (9)$$

结合前面的(6)–(9)式, 可以进一步将转换效率表示为

$$\eta_{\text{avg}} = x_{20} \beta \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{P_e^1 G_2(x_{10}^{\text{off}}) + (1 - P_e^1) G_2(x_{10}^{\text{on}})}{P_e^1 x_{10}^{\text{on}} + (1 - P_e^1) x_{10}^{\text{off}}}. \quad (10)$$

对应不同的调制格式(9)式也要适当调整, 本文中的公式以 NRZ 信号为例。在低于 10 Gbit/s 的传输速率下, 若保证输入信号消光比不变, 调制格式对转换特性的影响主要间接反映在对平均抽运功率的影响上。

3.3 交流转换效率

消光比和平均功率转换效率是波长转换器的重要性能指标, 直接关系到转换器的误码率特性。在优化平均抽运功率和探测功率等参量时, 消光比和平均功率转换效率是相互抑制的。虽然可以通过计算系统的误码率来折衷考虑这两种性能指标, 但误码率的计算涉及到噪声分析, 复杂并且不直观。本文提出交流转换效率的概念, 定义为输出信号与输入抽运信号中交流成分之比, 即

$$\eta_{\text{ac}} = \frac{P_{2L}^{\text{on}} - P_{2L}^{\text{off}}}{P_{10}^{\text{on}} - P_{10}^{\text{off}}} \\ = \eta_{\text{avg}} \frac{ER_{\text{out}} - 1}{ER_{\text{in}} - 1} \frac{P_e^1 ER_{\text{in}} + 1 - P_e^1}{(1 - P_e^1) ER_{\text{out}} + P_e^1}. \quad (11)$$

从(11)式可以看出, 通过对交流转换效率的分析, 可综合考虑消光比和平均功率转换效率这两种指标来优化波长转换器的性能。实际上, 如果我们分析的是伪随机信号, 则交流转换效率的定义中分子对应输出眼图的张开程度, 分母则对应输入抽运信号眼图的张开程度, 显然眼图张的越开越好, 即交流转换效率越大越好。另外, 在输入信号一定的情况下, 可以直接从示波器上判断交流转换效率的大小, 十分直观。

从前面对波长转换器消光比、平均功率转换效率和交流转换效率的分析,可见利用方程(4)和(5)解出输出光信号的功率是决定转换特性的关键.

4 结果与讨论

4.1 实验结果

实验中,抽运光的调制是采用误码特性测试仪与自行研制的高速驱动模块相结合来实现的,可以任意改变输入信号的调制格式以及放大器的注入电流等条件.图3所示是不同条件下的转换结果,每张照片中上半部分是电调制信号的参考波形,与抽运光信号相位相同,下半部分是转换输出经光电转换后的波形.图3(a)所示为比特流为“110110”的NRZ信号调制、注入电流为70 mA时的转换结果,图3(b)所示为比特流为“110110”的NRZ信号调制、注入电流为110 mA时的转换结果,图3(c)所示为比特流为“101010”的NRZ信号调制、注入电流为110 mA时的转换结果,图3(d)所示为比特流为“101010”的RZ信号调制、注入电流为110 mA时的转换结果.图3(a)—图3(c)所示的转换结果对应的抽运光消光比为10 dB,平均抽运功率都在 -4 dBmW以下(不同调制格式有差异).比较图3(a)与图3(b)所示结果,可见注入电流为110 mA时的转换特性远好于70 mA时的.由于大电流时能提供较大的小信号增益,可见放大器的增益是取得最佳转换特性的关键.再比较图3(c)与图3(d)所示结果,可见不同调制格式的转换效果也不同.由于“101010”的RZ信号调制时的平均抽运功率要小于“101010”的NRZ调制时的,可见转换特性受平均抽运功率的影响,并说明交叉增益型波长转换器的输入功率动态范围较小,很难实现对调制格式透明.

4.2 数值模拟结果

方程(4)和(5)可采用迭代法进行数值求解,分别求出抽运光为传号和空号时转换输出的光功率,就可以利用(6)(10)和(11)式分别算出波长转换器的输出消光比、平均功率转换效率和交流转换效率.改变转换器的外部参量,如调整放大器的注入电流以得到不同的小信号增益、调整平均抽运功率或探测功率、改变输入调制格式等,就可以计算出这些外部参量对转换性能的影响.计算中增益谱模拟系数

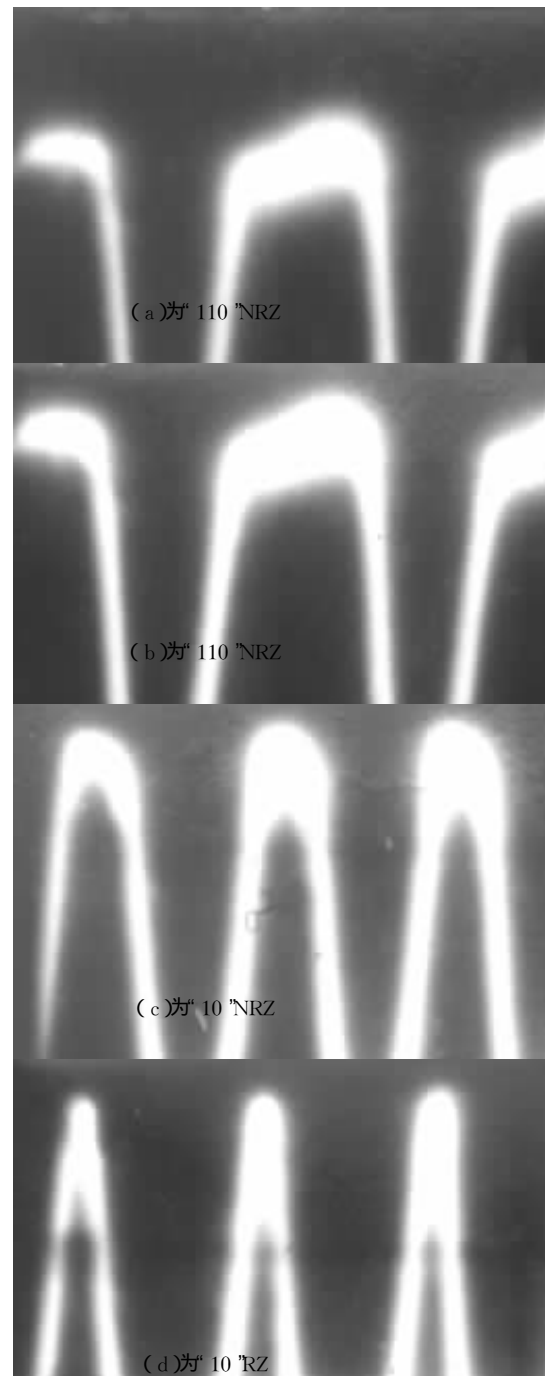


图3 不同条件下,1550 nm窗口波长转换实验结果

a_1 和 a_2 分别取 $-1.9 \times 10^{-2} \text{ nm}^{-1}$ 和 $1.27 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-1}$,放大器增益峰值波长为1539 nm,抽运光波长为1556 nm,探测光波长为1549 nm,载流子寿命为200 ps,输入消光比为10 dB.下面就对数值计算的结果作适当分析和讨论.

图4所示为在不同探测功率条件下,输出消光比、平均功率转换效率和交流转换效率与平均抽运功率的关系.如图4所示,曲线组2代表转换后输出消光比与平均抽运功率的关系,可见输出消光比随

平均抽运功率增大而减小, 并且探测功率越大消光比越小; 曲线组 3 代表平均功率转换效率与平均抽运功率的关系, 可见平均功率转换效率随平均抽运功率增大而减小, 并且探测功率越大转换效率越高. 曲线组 1 则代表交流转换效率与平均抽运功率的关系, 可见对于特定的探测功率, 存在一最佳的平均抽运功率. 这就说明文中定义的交流转换效率能综合消光比和平均功率转换效率这两种性能指标, 因而对转换器外部参量的优化有重要的作用. 如果我们规定交流转换效率从最佳值到下降 1dB 这一区间对应的平均功率的范围为输入功率动态范围, 则从图 4 上可看出交叉增益型波长转换器的输入功率动态范围约为 5 - 6 dBmW. 而在传输速率大于 10 Gbit/s 之后, 转换效率和消光比受转换速率的影响加剧, 输入动态范围会进一步减小, 而调制格式的变化会影响平均抽运功率, 因而交叉增益型波长转换器不能对调制格式完全透明.

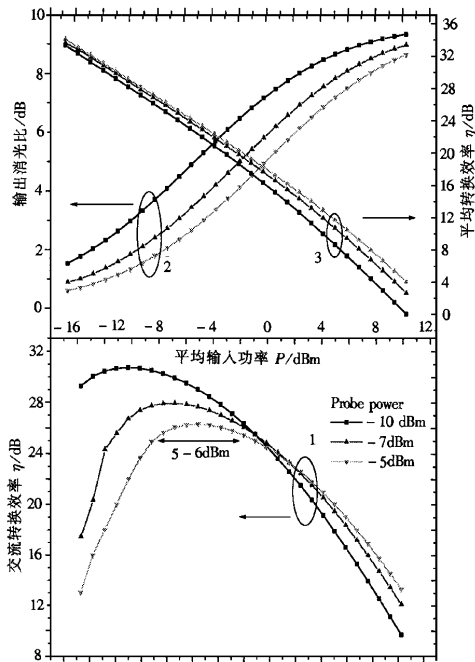


图 4 不同探测功率条件下, 转换特性与平均抽运功率的关系. 1 为交流转换效率与平均抽运功率的关系, 2 为输出消光比与平均抽运功率的关系, 3 为平均转换效率与平均抽运功率的关系.

变化会影响平均抽运功率, 因而交叉增益型波长转换器不能对调制格式完全透明.

图 5 所示为不同小信号增益条件下, 交流转换效率与平均抽运功率的关系, 此时探测功率为 -5 dBmW. 可见, 放大器增益特性越好, 交流转换效率越大, 就可能得到越好的转换特性. 实际上, 增益越大, 平均功率转换效率和消光比特性都会变好, 因而会使交流转换效率加大. 从某种程度上可以说, 放大器的增益特性才是决定波长转换器转换特性的最根本因素, 而外部参量如平均抽运功率、探测功率及调制格式等的改变只能对转换特性作进一步的优化.

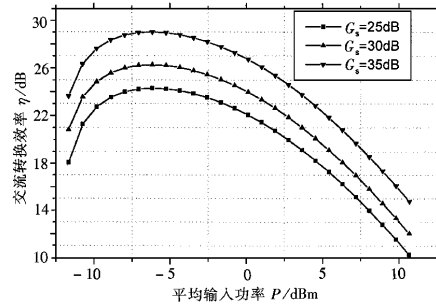


图 5 不同小信号增益条件下, 转换特性与平均抽运功率的关系.

5 结 语

本文对基于半导体光放大器的交叉增益型全光波长转换器的转换特性进行了实验和理论研究. 实验中利用实验室自行研制的混合应变量子阱行波半导体光放大器实现了 1550 nm 波段的波长转换, 研究了转换特性与放大器增益特性、调制格式(平均抽运功率)的关系. 理论上利用波长转换器大信号分析模型, 讨论了消光比、平均功率转换效率和交流转换效率等特性. 数值计算结果表明, 探测功率一定时, 平均抽运功率增大, 消光比会增大, 平均功率转换效率会减小, 但存在一最佳的抽运功率使交流转换效率最高, 因而交流转换效率实际上综合了消光比和平均功率转换效率这两种指标, 可用于转换器外部参量的优化. 实验和计算结果都表明, 调制格式对转换特性有很大影响, 交叉增益型波长转换器很难满足对调制格式透明的条件, 放大器增益特性是改善波长转换器转换特性的关键, 抽运功率和探测功率的改变只能用来进一步优化转换器的性能.

- [1] T. Durhuus *et al.* , *J. Lightwave Technology* , **14**(1996) , 942. [4] K. Obermann *et al.* , *IEEE J. Quant. Electron.* , **33**(1997) ,
[2] A. D. Ellis *et al.* , *Electron. Lett.* , **34**(1998) , 1958. 81.
[3] K. Obermann *et al.* , *J. Lightwave Technology* , **16**(1998) ,
78.

STUDY ON CONVERSION CHARACTERISTICS OF WAVELENGTH CONVERTERS BASED ON CROSS-GAIN MODULATION IN SEMICONDUCTOR OPTICAL AMPLIFIERS *

ZHANG XIN-LIANG SUN JUN-QIANG LIU DE-MING HUANG DE-XIU

(*Department of Optoelectronics Engineering , Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074 , China*)

YI HE-QING

(*Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications , Wuhan 430074 , China*)

(Received 5 July 1999)

ABSTRACT

All-optical wavelength converters will become key components in high-speed , large capacity all-optical networks. Theoretical and experimental studies on conversion performances of wavelength converters based on cross-gain modulation (XGM) in semiconductor optical amplifiers (SOAs) are presented in this paper. The ac conversion efficiency which can involve extinction ratio and the average power conversion efficiency simultaneously is put forward to optimize conversion performances. It is shown from numerical calculation based on large-signal model and experimental study that the gain characteristics of SOAs , compared with average input pump power and probe power , are the most important for conversion performances. Influence of the signal modulation format is also studied and results show that it is difficult to achieve modulation format transparency in XGM wavelength conversion.

PACC : 4265P ; 4255P ; 4265K

* Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant No. 863-307-16-03) and the Natural Science Foundation of Hubei Province , China (Grant No. 97J1100).