

增益饱和和波长转换器消光比退化研究*

李 猛 孙军强 刘德明 黄德修

(华中科技大学光电子工程系, 武汉, 430074)

摘要: 分析了半导体光放大器增益谱特点, 对交叉增益调制波长转换输出消光比进行了数值计算, 并在此基础上深入分析了消光比退化的原因, 为改善波长转换器性能提供了理论依据。

关键词: 半导体光放大器 输出消光比 波长转换 交叉增益调制

Study on degradation of extinction ratio of wavelength converter based on XGM

Li Meng, Sun Junqiang, Liu Deming, Huang Dexiu

(Department of Optoelectronic Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract The characteristics of gain spectrum of a semiconductor optical amplifier (SOA) are analyzed and the output extinction ratio of wavelength conversion based on cross-gain modulation (XGM) is studied numerically in this paper. Moreover, we investigate the causes of the degradation of extinction ratio, which provides the theoretical basis for improving the characteristic of wavelength converters.

Key words: semiconductor optical amplifier output extinction ratio wavelength conversion cross-gain modulation

引 言

全光波长转换器将是未来全光通信和宽带网络的关键器件, 对提高波分复用系统的灵活

* 国家“863”基金和湖北省自然科学基金资助。

综上所述, 在同一谐振腔内的双棒激光增益介质, 采用等间距设置方式可获得更大的基模模体积, 因而有更大的输出功率。双棒谐振腔有两个稳定区, 较远稳区的区间相对较长, 此稳定区内能被基模高斯光束所利用的激光增益介质的模体积也相对较大。相对于多级放大系统, 双棒谐振腔结构紧凑, 更容易获得大功率。

参 考 文 献

- 1 Koechner W. *Laser & Optoelectronic*, 1994; 26(2): 39~ 42
- 2 Driedger K P, Iffländer R M, Weber H. *IEEE J Q E*, 1988; 24(4): 665~ 673
- 3 Koltz H P, Iffländer R, Weber H. *Appl Opt*, 1981; 20(23): 4124~ 4234
- 4 Eggleston J M. *IEEE J Q E*, 1988; 24(9): 1821~ 1824
- 5 Weber H, Iffländer R, Seiler P. *SPIE Proc*, 1986; 650: 92~ 100
- 6 杨盛谊, 李 港, 陈 莹. *应用激光*, 1997; 17: 161

作者简介: 杨盛谊, 男, 1971 年 10 月出生。硕士。现在是北方交通大学攻读信号与信息处理专业的博士研究生。

性,增加波长再利用,避免光交叉连接中同波长信号之间的竞争和阻塞等有着重要作用,在光开关、光交换、波长路由选择中有广泛应用^[1,2]。

实现全光波长转换的简单技术是利用半导体光放大器(SOA)增益饱和特性的交叉增益调制(XGM)波长转换。其原理为^[2]:一束强的携带有信号的泵浦光与一束弱连续探测光(CW)同时入射进半导体光放大器,由于 SOA 的增益饱和,输入泵浦光调制半导体光放大器的增益,进而调制探测光,实现信号由信号光向探测光的转换。

消光比特性是波长转换器的一个重要品质参数,它决定了波长转换器的输出特性和串联能力。交叉增益调制波长转换虽然装置简单、转换效率高,但其消光比特性比较差,具体表现为输出消光比退化,特别是在相同波长间或向长波长转换时,退化严重^[1],不利于输出信号传输、读取和波长转换器的串联。我们给出了计算输出消光比的理论模型并分析了输出消光比退化的主要原因。

1 理论分析

泵浦光($i=1$)与探测光($i=2$)在半导体光放大器中的功率变化与载流子密度满足以下方程^[3]:

$$\frac{\partial P_i}{\partial z} = [\Gamma g_i(N) - \alpha] P_i(z) \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{I}{eV} - R(N) - \sum_{i=1,2} \frac{\Gamma g_i(N)}{Shc/\lambda} P_i(z) \quad (2)$$

式中, Γ 为限制因子, $g_i(N)$ 为波长 λ 的光在载流子密度为 N 时的增益系数, α 为吸收损耗, P_i 为波长 λ 的光功率, I 为注入电流, e 为电子电量, V 为有源区体积, S 为半导体光放大器有源区有效截面积, h 为普朗克常数, c 为光速, $R(N) = AN + BN^2 + CN^3$ 为自发发射复合速率, 三项分别对应于非辐射复合、双分子复合、俄歇复合, A 、 B 、 C 为常数。

半导体光放大器增益谱的一个重要特点就是不对称性,并随载流子的消耗而向长波长方向迁移,这一特性对输出消光比有很大影响。半导体光放大器的不对称增益谱线可由下式给出^[4]:

$$g_i(N) = a(N - N_0) - \gamma_1(\lambda - \lambda_w)^2 + \gamma_2(\lambda - \lambda_w)^3 \quad (3)$$

式中, a 为增益常数, γ_1 、 γ_2 为由实验确定的常数, λ_w 为载流子密度为 N 时的峰值增益波长。 λ_w 可由右式给出^[5]:

$$\lambda_w = \lambda_0 - b(N - N_0) \quad (4)$$

式中, λ_0 为透明峰值波长, b 为由实验确定的常数。将(4)式代入(3)式可得:

$$g_i(N) = a(N - N_0) - \gamma_1[\lambda - \lambda_0 + b(N - N_0)]^2 + \gamma_2[\lambda - \lambda_0 + b(N - N_0)]^3 \quad (5)$$

由(1)式可得:

$$P_i(z) = P_i(0) \exp\left\{\int_0^z [\Gamma g_i(N) - \alpha] dz\right\} \quad (6)$$

假设载流子密度 N 在半导体光放大器中为均匀分布,则(6)式可化为:

$$P_i(z) = P_i(0) \exp\{[\Gamma g_i(N) - \alpha]z\} \quad (7)$$

将(7)式代入(2)式可得: $\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{I}{eV} - R(N) - \sum_{i=1,2} \frac{\Gamma g_i(N) P_i(0) \exp\{[\Gamma g_i(N) - \alpha]z\}}{Shc/\lambda}$ (8)

当输入泵浦光为“1”时,由于半导体光放大器中的光功率增加,载流子消耗增大,载流子密度下降到 N_{\min} ;当输入泵浦光为“0”时,由于半导体光放大器的光功率降低,载流子密度上升到 N_{\max} 。由(7)式可得:

$$ER_{out} = 10 \log \frac{P_2(L)^{\text{"1" }}}{P_2(L)^{\text{"0" }}} = 10 \log \{ \exp[\Gamma [g_i(N_{max}) - g_i(N_{min})] L] \} \quad (9)$$

通过对(5)式,(8)式,(9)式数值计算,即可求出波长转换器输出消光比。为与文献[5]中的实验数据匹配,我们选定如下参数:放大器有源区长 $L = 500 \mu\text{m}$,宽 $W = 2.0 \mu\text{m}$,厚 $d = 0.15 \mu\text{m}$,材料吸收系数 $\alpha = 40 \text{cm}^{-1}$,透明载流子密度 $N_0 = 8.3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$,限制因子 $\Gamma = 0.3$,增益常数 $a = 2.5 \times 10^{-16} \text{cm}^2$,透明峰值波长 $\lambda_0 = 1605 \text{nm}$,常数 $\gamma_1, \gamma_2, b, A, B, C$ 分别为: $0.074 \text{cm}^{-1} \text{nm}^{-2}$, $3.155 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1} \text{nm}^{-3}$, $3 \times 10^{-17} \text{nm}/\text{cm}^{-3}$, $2.0 \times 10^8 \text{s}^{-1}$, $1.0 \times 10^{-10} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$, $5.0 \times 10^{-28} \text{cm}^6 \text{s}^{-1}$ 。

2 结果分析与与讨论

为分析方便,假设入射泵浦光消光比足够大,这种假设不影响分析结果。引起输出消光比退化的原因,主要与半导体光放大器自身特性、输入光波长和功率、注入电流、转换速率等有关,其中放大器的特性是影响输出消光比的根本原因。我们的计算结果是在转换速率低于 10Gb/s 时得出的,当转换速率大于 10Gb/s 时,输出消光比将降低。

半导体光放大器增益谱具有非对称特性,在短波长一侧上升迅速而在长波长一侧下降平缓,并且当放大器处于饱和状态后,由于载流子消耗,增益谱线相对于未饱和时向长波长方向迁移,如图1所示。若泵浦光波长选为峰值增益波长(选用此波长,是为了使SOA尽可能饱和),那么当向短波长转换(下转换)时,由于饱和前后探测光增益相差较大,输出消光比较高;而向长波长转换(上转换)时,饱和前后探测光增益差很小,输出消光比退化严重,可从图1中看出。

由图1可知,尽可能减小 $G_{probe}^{\text{"0"}}$,使放大器

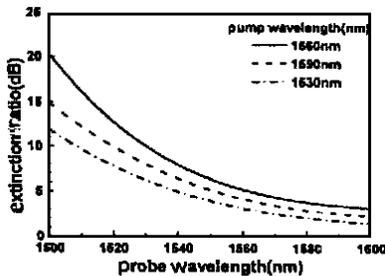


Fig. 2 The curves of output extinction ratio versus the probe wavelength with different values of pump wavelength

处于深饱和状态,可以增加输出消光比。若放大器饱和和输出功率高,则在相同入射功率时难以饱和,因此,应设计、选用易于饱和的放大器进行波长转换。当放大器确定以后,为提高消光比,应尽可能加深它的饱和度。

图2为输出消光比与探测光波长的关系图,由图可知,上转换时消光比总比下转换时退化严重,而且探测光波长越长,则消光比退化越严重,这正是由放大器增益谱特性决定的。另外可以看出,当泵浦光波长为 1560nm 时,输出消光比较高,而在 1590nm 和 1530nm 时,消光比相对较低,这可从图3中得到进一步验证。

图3为输出消光比与泵浦光波长的关系图,由图可知,在泵浦光波长为 1565nm 附近消光比有一最大值,而在其它波长,消光比退化相对严重,这是因为不同波长的泵浦光引起放大器饱和程度不同。波长在 1565nm 附近的泵浦光,由于位于放大器饱和和增益谱峰值增益处,增益最大,使放大器饱和程度最深,消光比相对就高,而在其它波长,由于不能使放大器深度饱和,因而消光比退化严重。对图3进一步分析可看出,适当增加泵浦功率,放大器饱和加深,输出

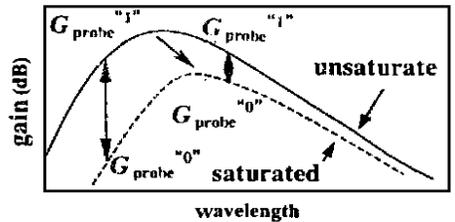


Fig. 1 The diagram of the SOA gain shift under saturated conditions and the effect on output extinction ratio

消光比可以得到改善, 并且由于增益谱移特性, 其消光比最优时的泵浦波长也向长波长方向迁移。

图 4 为输出消光比与探测光功率之间关系, 由图可知, 适当降低探测

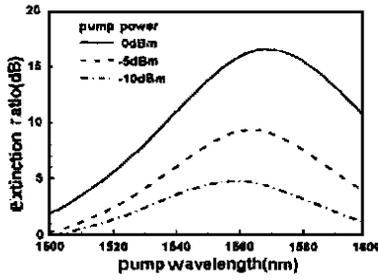


Fig. 3 The curves of output extinction ratio versus the pump wavelength with different values of pump power

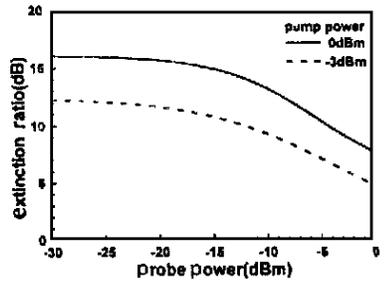


Fig. 4 The curves of output extinction ratio versus the probe power with different values of pump power

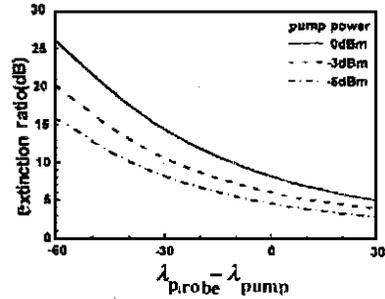


Fig. 5 The curves of output extinction ratio versus the conversion span with different values of pump power

光功率, 可以改善输出消光比。而增加探测光功率, 引起放大器非调制饱和, 使由泵浦光产生的调制饱和受到影响, 输出消光比退化。

理想的波长转换器应有比较大的波长转换间隔, 并且转换后输出特性稳定。但在交叉增益波长转换中, 上转换时, 随转换间隔增加, 输出消光比明显降低, 退化严重; 而下转换时, 随转换间隔增加, 输出消光比明显升高, 如图 5 所示。

另外, 注入电流对输出消光比也有影响。注入电流的变化, 直接影响的是载流子密度变化, 进而影响增益峰值变化。注入电流低, 放大器中的增益小, 不会产生大的增益饱和, 输出消光比退化严重; 相反, 增加注入电流, 可一定程度上改善输出消光比。

3 结 论

由半导体光放大器中泵浦光、探测光的传输方程和载流子密度方程出发, 根据放大器增益谱特性, 对输出消光比进行了数值计算。在此基础上, 详细分析了交叉增益调制波长转换消光比退化的原因, 发现基于半导体光放大器交叉增益饱和的波长转换机制及放大器增益谱的特性, 决定了输出消光比的退化, 而泵浦光及探测光波长、功率以及注入电流对消光比也有很大影响, 适当选择这些参数, 可一定程度上改善输出消光比。

参 考 文 献

- 1 Duhuus T, Mikkelsen B, Joergensen C *et al.* J Lightwave Technology, 1996; 14(6): 942~ 953
- 2 Yoo S J B. J Lightwave Technology, 1996; 14(6): 955~ 966
- 3 Obermann R, Kindt S, Breuer D *et al.* J Lightwave Technology, 1998; 16(1): 78~ 85
- 4 Wilner A E, Shieh W. J Lightwave Technology, 1995; 13(5): 771~ 781
- 5 Saitoh T, Mukai T. IEEE J Q E, 1987; 23(6): 1010~ 1019

* * *

作者简介: 李 猛, 男, 1976 年出生。硕士。主要从事光纤通信器件方面的研究。