

文章编号: 1001-3806(2005)01-0014-04

基于单端 SOA 波长转换器的消光比特性分析

董建绩, 张新亮*, 王 颖, 刘德明, 黄德修
(华中科技大学 光电子工程系, 武汉 430074)

摘要: 对一种基于单端半导体光放大器(SOA)的交叉增益调制型(XGM)全光波长转换器结构建立了动态理论模型, 以这个模型为基础分析了抽运光功率、探测光功率、剩余反射率、转换波长转换间隔、注入电流对转换后探测光的输出消光比的影响。结果表明, 利用单端 SOA 实现波长转换比普通 SOA 实现波长转换将获得更好的输出消光比特性。

关键词: 半导体光放大器; 全光波长转换器; 消光比; 交叉增益调制

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

Extinction ratio characteristics of wavelength converters based on single-port-coupled SOA

DONG Jian-ji, ZHANG Xin-liang, WANG Ying, LIU De-ming, HUANG De-xiu
(Department of Optoelectronic Engineering HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract The dynamic model for a new all-optical wavelength converter (AOWC) using single port coupled semiconductor optical amplifier (SOA) based on cross gain modulation (XGM) is presented. Based on the dynamic model factors which affect output extinction ratio, such as signal power, probe power, rear facet reflectivity, converted wavelength span, biased current, are analyzed respectively. The numerical result shows such a converter do have better extinction ratio character than a traditional AOWC.

Key words semiconductor optical amplifier(SOA); all-optical wavelength converter(AOWC); extinction ratio(ER); cross gain modulation (XGM)

引 言

作为全光波长转换器之一的交叉增益调制型波长转换器具有结构简单、转换效率高和可转换速率高等优点, 一直是研究的热点^[1], 但在普通方案中使用的是双端耦合输入输出的半导体光放大器, 除了制作工艺很困难外, 还存在输出消光比退化严重的缺点, 尤其是实现向上转换时消光比退化更严重^[2]。ZHANG 等^[3]提出一种基于单端耦合 SOA 的全光波长转换器结构, 实验结果表明: 这种结构的波长转换器和普通交叉增益调制型波长转换器相比能获得更好的输出消光比特性。众多学者对交叉增益调制型波长转换进行了实验上或者理论上的研究, 但关于基于单端耦合 SOA 的波长转换器的理论模型的文献记载却很少。笔者从速率方程出发, 采用分段模型, 建立基于单端耦合

SOA 的波长转换器的动态模型, 重点分析输出消光比特性, 并将这种结构和普通交叉增益型波长转换器进行对比, 分析输出消光比的改善情况。

1 理论模型

ZHANG 等人^[3]提出一种基于单端耦合 SOA 的全光波长转换器的实验装置, 如图 1 所示。图中, 半导体光

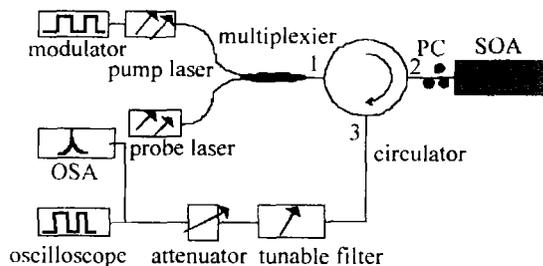


Fig 1 Experiment system of AOWC based on single-port-coupled SOA
放大器的输入输出共用同一个端口, 在后端面上镀适当反射率的增透膜, 输入光经过半导体光放大器后端面反射回来, 又从输入端输出, 经过光环形器的端口 3 输出, 经可调滤波器滤掉抽运光频率分量, 只输出探测光频率分量, 经过衰减器送至光示波器或者光谱仪进行分析。

基于上述原理, 建立如下基于单端耦合 SOA 的

基金项目: 国家八六三计划资助项目 (2002AA312160); 九七三计划资助项目 (G2000036605); 武汉市技术创新专项资助项目 (2002100513013)

作者简介: 董建绩 (1979-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤通信器件及应用方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: xlzhang@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2003-12-29; 收到修改稿日期: 2004-02-27

光波长转换器的理论模型。

首先用速率方程描述 SOA 中载流子浓度的动态变化, 载流子速率方程可用下式表达^[4]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{I}{eV} - R(N) - \sum_{i=p,c} \frac{\Gamma g_i(N)}{A h c / \lambda_i} P_i \quad (1)$$

(1) 式忽略了放大自发辐射效应引起的饱和。当放大器的饱和和主要取决于注入光时, 这种假设是合理的, 本文中讨论的动态模型将都不考虑 ASE 噪声的影响。

信号光和探测光在 SOA 中的传播由下述方程描述^[5]:

$$\pm \frac{\partial P_i}{\partial z} = [\Gamma g_i(N) - \alpha_n] P_i \quad (2)$$

式中, $i = p, c$ 对应于注入的两束光: 抽运光和探测光。方程中的符号表示为: “+”和“-”分别对应光波沿 +z 和 -z 方向传播; N 是载流子浓度; I 是光强度; V 为 SOA 有源区体积; e 是电量; A 为有效截面积; $R(N)$ 是总的自发辐射和非辐射复合速率; h 是普朗克常量; c 是光速; λ 为波长; Γ 是光场限制因子; α_n 是除了受激发射吸收外其它吸收过程所造成的损耗系数; t 是时间; z 指光传播的方向; $g_i(N)$ 是增益系数。

增益系数与载流子浓度和波长的关系可由下式模拟^[6]:

$$g_i(N) = a(N - N_t) - r_2(\lambda_i - \lambda_p)^2 + r_3(\lambda_i - \lambda_p)^3 \quad (3)$$

$$\lambda_p = \lambda_{ref} - k_0(N - N_{ref})$$

式中, a 为微分增益; N_t 为透明载流子浓度; N 为相应于一定的电注入水平无光入射稳态载流子浓度; λ_p 为对应的增益峰值波长; N_{ref} 为无光入射稳态载流子浓度的参考值, λ_{ref} 为对应的参考增益峰值波长; k_0 为波长漂移系数; r_2 和 r_3 为增益常数, r_2 与 SOA 的增益带宽有关, r_3 与增益谱的非对称性有关。

对于理想的单端 SOA 模型, 前端面透射率 100%, 后端面反射率为 r , 这一点和普通 SOA 是不同的 (普通 SOA 的后端面反射率 $r = 0$), 通常取 $0.001 \leq r \leq 0.1$ 。本文中采用分段模型^[4], 把半导体光放大器的有源区沿光的传播方向分成 M 段, 在每一小段中认为载流子浓度是一个常数, 记第 j 段的载流子浓度为 $N_j(t)$, 单端 SOA 的分段模型如图 2 所示。图中, M 为分段数,

区长度的第 j 小段。可以看出, 单端 SOA 模型较普通 SOA 模型 (同向注入方式) 多了背向两束输入光和背向两束输出光, 而且背向输入光功率依赖于正向输出光功率, 即存在 $P_{iM+1}^- = P_{iM+1}^+ \cdot r$ (r 为后端面反射率)。

用动态模型求解载流子浓度随时间的变化情况用公式 (1), 为了求出初始时刻载流子浓度在有源区内的分布, 采用文献 [4] 中的静态方法, 假设 $\partial N / \partial t = 0$ 对于任何一段 j 有:

$$\frac{I_j}{eV_j} - R(N_j) - \sum_{i=p,c} \frac{\Gamma g_i(N_j)}{A h c / \lambda_i} P_{ij} = 0 \quad (5)$$

首先假设 SOA 后端面反射后的背向输入光功率 P_{iM+1}^- 已知。由于每一段的载流子浓度都是待求的, 所以 j 取值从 $1 \sim M$ 后, (5) 式组成一个 M 元的非线性方程组, 未知数是每一段的载流子浓度 $N(1), N(2) \dots N(M)$ 。求解这个非线性方程组^[4], 得到每一段的载流子浓度 N , 将求得的载流子浓度代入 (2) 式, 就能求出每一小段的输入光功率和输出光功率, 最终求出最后一段的输出功率 P_{iM+1}^+ , 由 (4) 式求出背向输入光功率 P_{iM+1}^- , 比较计算值 P_{iM+1}^- 和预设值 P_{iM+1}^-' , 如果满足 $P_{iM+1}^- \approx P_{iM+1}^-'$, 则说明预先假定的背向输入光功率合理, 输出这时求得的载流子浓度; 如果数值差别在控制精度以外, 说明预先假定的背向输入光功率不合理, 这时更新预设值, 即 $P_{iM+1}^- = P_{iM+1}^-'$, 根据 (5) 式重新求解载流子浓度和背向输入光功率, 比较前后两次背向输入光功率, 直至运算的结果符合要求为止。

通过以上方法求解出初始时刻载流子浓度在有源区内的分布后, 接着用龙格-库塔法解微分方程 (1), 求出载流子浓度随时间变化情况, 接着可求出输出光功率随时间变化, 进而可以求出输出消光比。

2 数值模拟

应用上述的分段模型, 将 SOA 的有源区长度分成 10 段和 100 段后, 计算得到的输出消光比基本相同; 每个码源周期内采样 40 个点和采样 80 个点计算得到的输出消光比相差很小, 因此在保证计算精度, 同时为了节约计算时间的情况下, 将 SOA 有源区长度分成 10 段, 每个码源周期采样 40 个点, 用四阶龙格-库塔法对 (1) 式进行求解。采用三阶高斯脉冲来模拟信号光, 信号光功率最大值为 3.18 dBm, 消光比为 14.15 dB, 信号速率为 10 Gbit/s, 波长为 1550 nm, 探测光功率为 -10 dBm, 波长为 1530 nm, 得到输入信号光功率和输出探测光功率随时间变化曲线见图 3 可以看出, 转换后的光和输入光是反相的, 这是由交叉增益调制的机制决定的。

以下应用动态分段模型, 数值模拟了 10 G 系统中

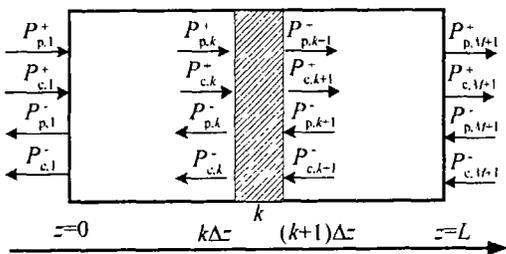


Fig 2 Subsection model of single-port coupled SOA

符号 P_{ij}^\pm 中 “+” 和 “-” 分别对应光波沿 +z 和 -z 方向传播, $i = p, c$ 分别表示抽运光和探测光, j 表示有源

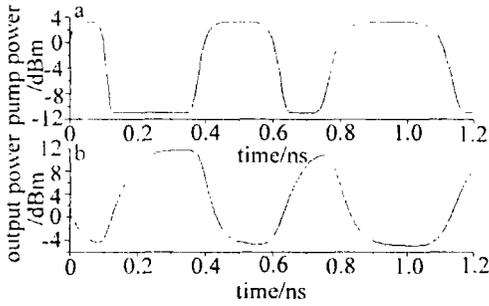


Fig 3 a—the pump pulse pattern b—the output pulse pattern

单端 SOA 中输出消光比和抽运光功率、探测光功率、剩余反射率、注入电流、波长转换间隔的关系。NRZ 码的全宽为 100ps 输入消光比为 13.2dB。在下列图中, P_0 表示抽运功率的最大值, P_c 表示探测光功率, I 表示偏置电流, R 表示 SOA 后端面的反射率。

2.1 输出消光比和探测光功率之间的关系

从图 4 可以看出, 平均抽运光功率一定的情况下, 输出消光比随探测光功率的增加而减小, 究其原因, 当抽运光功率一定时, 探测光功率增加, 则会更多地消耗 SOA 有源区内的载流子, 使得抽运光中的“0”信号和“1”信号获得的增益都下降, 从而导致探测光获得的增益差也下降, 最终输出消光比也下降。

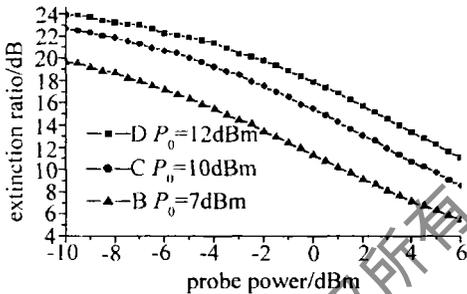


Fig 4 Output extinction ratio versus probe power in different pump power

2.2 输出消光比和抽运光功率的关系

从图 5 可以看出, 探测光功率一定时, 输出消光比随抽运光功率的增加而增加, 这是因为抽运光功率增

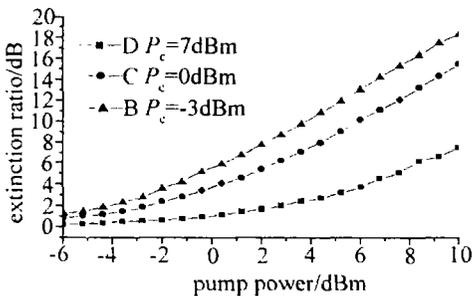


Fig 5 Output extinction ratio versus pump power in different probe power

加, 虽然会消耗 SOA 有源区内的载流子, 但对于抽运光中的“0”信号仍未到达饱和状态, 反相调制后的探测光中“1”信号仍获得很大的增益; 而对于抽运光中的“1”信号本身就消耗载流子较多, 增加抽运光功率后, “1”信号将消耗更多的载流子, 从而导致增益更小, 对应

调制后的探测光中“0”信号获得更小的增益, 最终探测光输出时的增益差就更大, 所以输出消光比就更大。

2.3 输出消光比和反射率的关系

图 6 中 5 条曲线分别对应剩余反射率为 0.1%, 1%, 2%, 4%, 6% 的情况下, 输出消光比随抽运光功率的变化情况。可以看出, 输出消光比随后端面反射率的增加而减小, 因为剩余反射率越大, 反射回来的反向光功率越大, 在有源区内消耗的载流子就越多, 使得抽运光的“0”信号和“1”信号获得的增益都下降, 从而导致探测光获得的增益差也下降, 最终输出消光比也下降。为了获得高的输出消光比, 宜采用剩余反射率低的 SOA, 但会降低转换效率, 因此要综合考虑。

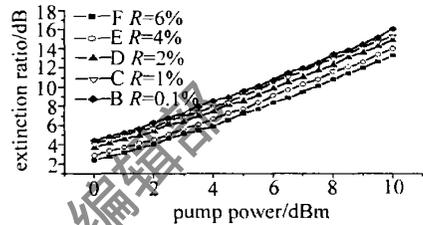


Fig 6 Output extinction ratio versus pump power in different rear facet reflectivity

另外, 和普通的交叉增益型波长转换器比较, 单端 SOA 的后端面的透射损耗虽然会减小探测光获得的实际增益, 但由于它在抽运光为“0”和“1”时起相同的作用, 因而并不会减小探测光获得的增益差。同时, 正是由于透射损耗的存在, 使得抽运光为“0”信号时, 放大的探测光在回程时不会引起放大器的增益饱和, 这种结构的放大器能够使转换后的探测光获得更大的增益差, 因此, 采用单端 SOA 实现波长转换, 比采用普通 SOA 实现波长转换能获得更好的输出消光比特性。

2.4 消光比和波长转换间隔的关系

图 7 中给出了输出消光比和波长转换间隔的关系, 波长转换间隔定义为转换后的探测光波长与转换

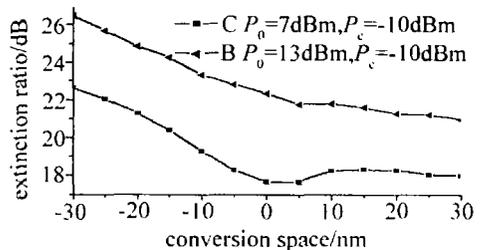


Fig 7 Output extinction ratio versus wavelength space

前抽运光波长的差值。从图上两条曲线看, 当波长转换间隔为负值(向下转换)时, 输出消光比随波长转换间隔的绝对值减小而减小; 当波长转换间隔为正值(向上转换)时, 消光比有短暂的上升, 但总的趋势是下降的。此外, 从图可以看出, 在波长转换间隔为 -30nm~30nm 的范围内, 输出消光比起伏达 5dB 左右, 由于输入消光比为 13.2dB, 所以没有出现消光比

退化的现象,只要抽运光平均功率和探测光功率取值适当,即使是向上转换消光比也不会退化,这是普通交叉增益型波长转换器所不能比拟的。

2.5 消光比和注入电流的关系

图 8 中反应了不同的注入电流情况下,输出消光比随抽运光功率的变化情况,注入电流越大,输出消光比也越大,因为注入电流越大,提供的载流子浓度也越大,为输入光功率提供高的增益,使得输出的消光比增大。

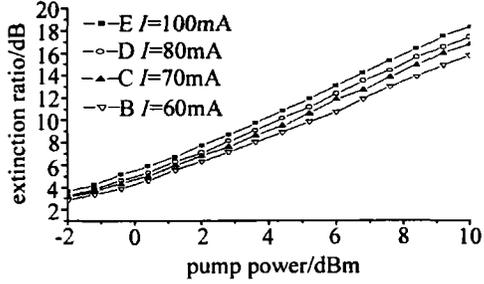


Fig 8 Output extinction ratio versus pump power in different bias current

3 结论

利用单端 SOA 实现波长转换比普通 SOA 实现波长转换可以获得更好的输出消光比特性,只要适当的调整并改变这些相关因素,就可以提高输出的消光比。本文中利用动态模型分析了影响输出消光比的各种因素。如输入抽运光的平均功率增加会提高输出消光比,注入电流增加也会提高输出消光比,探测光功率减小可以提高输出消光比,选择适当剩余反射率小的

(上接第 10 页)

变致冷镜。尽管在激光辐照前 2s 内,这种优势并不明显,但在 2s 后,半导体致冷镜的最大温度就明显低于实心硅镜和相变致冷镜,尤其是在激光辐照停止 5s 后,半导体致冷镜的最大温度急剧下降,同实心硅镜和相变致冷镜相比,显示出不可比拟的优越性。

图 3 中比较了制冷量不同时的最大温度随时间变化关系。在加热段,制冷量越大,温升越缓慢,当制冷量大到一定程度时,尽管镜体还在受激光辐照,温度已随时间下降,如制冷量为 100W 时,第 5s 的温度低于第 1s 和第 2s 的温度值。在冷却段,制冷量越大,温度降低越迅速,甚至有可能达到零度以下。

以上计算结果表明,采用半导体致冷镜能够快速有效地降低镜面温度,制冷量越大,温度减小越快。镜面温升的减小使镜体内热应力变小,因此,采用半导体致冷镜能够提高镜体抵抗激光束破坏的阈值。而且由于半导体制冷片的制冷量采用直流电源电流调节,因而操作简单方便,易于控制。但值得注意的是:当激光停止辐照后,冷却速度很快,以至于半导体制冷片工作时间稍长,就容易使镜面结露,因此工作电流和开关时

间需要精确控制。且半导体制冷片并不能提高镜面的变形均匀性,对于减小热变形没有作用,所以,镜面热变形峰值与实心硅镜相比没有优势。

参 考 文 献

- [1] DURHUSS T, M KKELESEN B, DERGENSEN C. All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers [J]. *J Light wave Technol* 1996, 14(6): 942~954.
- [2] 张新亮,孙军强,黄德修.交叉增益型全光波长转换器消光比退化机理 [J]. *华中理工大学学报(自然科学版)*, 1999, 27(10): 15~17.
- [3] ZHANG X L, HUANG D X, SUN J Q. Extinction ratio improvement in XGM wavelength conversion based on novel scheme [J]. *IEEE International Conference on Communication Technology Proceedings* 2000, 2: 1571~1574.
- [4] CONNELLY M J. Wideband semiconductor optical amplifier steady-state numerical model [J]. *Quantum Electron* 2001, 37(3): 440~443.
- [5] M KKELESEN B. Optical amplifiers and their system application [D]. Copenhagen Technical University of Denmark, 1994: 19~23.
- [6] WILLNER A E. Optimal spectral and power parameters for all-optical wavelength shifting single stage fanout and cascading [J]. *J Light wave Technol* 1995, 13(5): 771~779.

间需要精确控制。且半导体制冷片并不能提高镜面的变形均匀性,对于减小热变形没有作用,所以,镜面热变形峰值与实心硅镜相比没有优势。

3 小 结

这种半导体致冷镜利用相变吸热和半导体制冷片的珀耳帖效应可以使基底的热量在极短的时间内被迅速地带走。通过对实心硅镜、相变镜和半导体致冷镜的冷却模拟可知,制冷量为 25W 时只需 5s 就可使镜体的温度和弹性变形恢复至初始状态,并具有较低的功耗,故能满足高效冷却镜体的需要。

参 考 文 献

- [1] 张耀宁,程祖海,库耕 *et al*. 硅镜热畸变研究 [J]. *中国激光*, 1997, 24(8): 688~692.
- [2] 彭玉峰,程祖海,张耀宁 *et al*. 强激光辐照下硅基片超薄多层金属镜的热畸变 [J]. *中国激光*, 2002, 29(1): 21~24.
- [3] 张耀宁,彭玉峰,周次明 *et al*. 相变制冷复合镜研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(4): 77~79.
- [4] 徐德胜.半导体制冷与应用技术 [M]. 上海:上海交通大学出版社, 1992: 3~5.