

# 新型结构可调谐全光波长转换器的理论与实验研究\*

徐 帆 张新亮 黄德修

( 华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074 )

( 2003 年 7 月 9 日收到, 2003 年 9 月 24 日收到修改稿 )

可调谐波长转换器是智能化光网络中的关键光电子器件. 提出了一种基于半导体光放大器的环形激光器实现连续可调全光波长转换的方案, 建立了该方案的理论模型. 理论计算和实际测定了不同条件下波长转换的输出特性, 实验结果与理论计算基本符合. 实验中实现了 40nm 范围内连续可调、转换速率为 2.5Gb/s 的交叉增益调制型波长转换.

关键词: 可调谐波长转换, 半导体光放大器, 环形腔

PACC: 4260D, 4265G, 4280S

## 1. 引 言

随着因特网业务的飞速发展, 社会对信息的需求量呈爆炸性增长, 急需发展超高速超大容量的光纤通信系统<sup>[1]</sup>. 密集波分复用( DWDM )技术被认为是提高通信容量的最有效途径. 可调谐全光波长转换器在 DWDM 传输网络和光分组交换网络中将发挥重要作用, 它除了具有波长转换的功能之外, 还能减少光网络结点中放置波长转换器的数目, 减少光分组交换网络中缓冲器的数目, 便于实现动态波长短路由, 将大大降低系统成本, 是构成智能化全光通信网络的关键器件<sup>[2]</sup>. 目前全光波长转换方案归纳起来有以下三类<sup>[3]</sup>: 1) 基于半导体光放大器( SOA )的可调谐波长转换器; 2) 基于激光器的可调谐波长转换器; 3) 基于光纤的可调谐波长转换器.

对基于 SOA 中的 XGM 效应的波长转换研究得较多, 但研究的多是固定输出波长的交叉增益调制型波长转换器, 需要 SOA、抽运光、探测光和窄带滤波器才能实现波长转换, 如果要实现可调谐的波长转换就还需要采用可调谐探测激光器<sup>[4-6]</sup>. 本文提出一种新颖的基于 SOA 的环形腔结构, 探测光由环形腔激光器激励产生, 这样可以实现自启动且无需探测激光器的可调谐波长转换. 该方案具有结构简单、转换范围宽、转换效率高且无需探测激光器的优

点, 有重要的研究价值. 本文对该方案进行了论述, 建立了合理的理论模型, 并对理论计算和实验结果进行了分析讨论, 实验结果与理论分析符合较好.

## 2. 方案概述

自启动可调谐全光波长转换器实验方案如图 1 所示. SOA、隔离器和可调谐滤波器构成一个可调谐的环形腔激光器, 激励波长在 SOA 的增益带宽内, 并通过可调谐滤波器来选择. 带有调制信息的抽运光通过耦合器 1 耦合进环形腔, 当抽运光为“ 1 ”信号时, SOA 的增益受到抑制; 而当抽运光为“ 0 ”信号时, 基于 SOA 的环形激光器能够形成谐振, 产生激光输出, 这样环形腔激光器的输出就受到抽运光的调制, 抽运光上的信息可以转换到内部激励波长上, 即实现了波长转换. 调节可调谐滤波器, 就可以改变激励波长, 从而实现可调谐波长转换. 转换输出信号经过耦合器 2 输出. 本次实验中调制抽运光由 Anritsu 公司的 MP1570A 型 2.5Gbit/s 光传输特性分析仪提供, 抽运光上携带的调制信息的格式可以任意选择. 环形腔中的隔离器使光波单向传播, 偏振控制器( PC )是用来控制输入光信号的偏振态. Agilent 公司的 Agilent 86410 光谱分析仪用来分析输出光信号的光谱. Tektronic 公司的 CSA8000 通信信号分析仪用来观察输出信号的波形图.

\* 国家重点基础研究发展规划项目( 批准号: G2000036605 )和国家高技术研究发展计划( 批准号: 2002AA312160 )资助的课题.

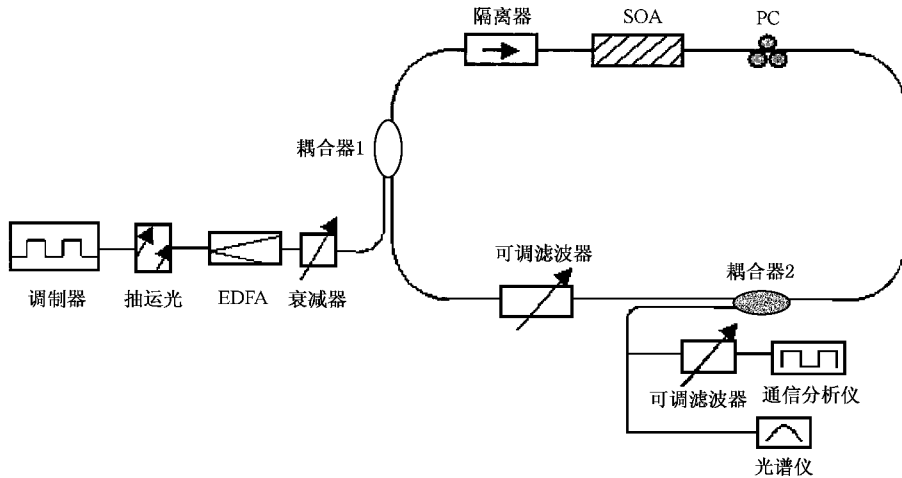


图 1 可调谐全光波长转换器实验结构示意图

### 3. 理论模型

调制的抽运光  $\lambda_p$  和连续的环形腔激光探测光  $\lambda_c$  同时耦合进 SOA, 引起 SOA 的增益饱和, 所以探测光经过 SOA 后受到了调制, 带有了抽运光上的调制信息, 实现了波长转换. 忽略俄歇复合和杂质缺陷引起的非辐射复合和放大自发辐射引起的载流子消耗, 考虑稳态时的情况, SOA 的基本传输方程和载流子速率方程可表示为<sup>[7,8]</sup>

$$\frac{I}{eV} = \frac{N}{\tau_s} - \sum_{j=p,c} \frac{\Gamma g_{N,j}(N - N_{0,j})}{Ahc/\lambda_j} P_j, \quad (1)$$

$$\frac{dP_j}{dz} = [\Gamma g_{N,j}(N - N_{0,j}) - \alpha_{int}] P_j, \quad (2)$$

式中  $I$  为 SOA 的偏置电流,  $e$  为电子基本电荷量,  $V$  为有源区体积,  $N(t, z)$  表示某一时刻 SOA 中  $z$  处的载流子浓度,  $j = p$  对应抽运光,  $j = c$  对应探测光,  $g_{N,j}$  为对应特定波长的微分增益系数,  $hc/\lambda_j$  为对应特定波长的光子能量,  $P_j$  为光功率,  $A$  为有源区横截面的面积,  $\Gamma$  为模场限制因子,  $\alpha_{int}$  为光放大器的内部损耗系数.

(2) 式为一阶线性常微分方程, 对应探测光可以得到

$$P_{out} = P_{in} \exp\{[\Gamma g_{N,c}(N - N_{0,c}) - \alpha_{int}]L\} \quad (3)$$

$L$  为 SOA 的腔长,  $P_{in}$  为输入的探测光功率,  $P_{out}$  为输出的探测光功率.

在上述近似条件下, 也可以将 (1) 式中的  $P_c$  和  $P_p$  看成为进入 SOA 时的光功率, 则 (1) 式可以化为

$$\begin{aligned} \frac{I}{eV} = & \frac{N}{\tau_s} - \frac{\Gamma g_{N,p}(N - N_{0,p})}{Ahc/\lambda_p} P_p \\ & + \frac{\Gamma g_{N,c}(N - N_{0,c})}{Ahc/\lambda_c} P_{in}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $P_p$  为输入进环形腔的调制抽运光在进入 SOA 前的功率, 由于环形腔中有一可调滤波器, 经过滤波器后调制抽运光被滤掉, 因此可以认为  $P_p$  为一定值.

考虑激光的探测光在环形腔中环形一圈, 有边界条件<sup>[9]</sup>

$$P_{in} = P_{out} \times \kappa_1 \times \epsilon(\lambda) \times \kappa_2 \times F(\lambda), \quad (5)$$

式中  $\kappa_1$  为耦合器 1 的分光比,  $\kappa_2$  为耦合器 2 的分光比,  $\epsilon(\lambda)$  为环形腔中无源器件的损耗,  $F(\lambda)$  为滤波器的频率响应, 并可以表示为<sup>[10]</sup>

$$F(\lambda) = 1 - \alpha \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_{cen})^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (6)$$

有三个参数来决定这种光滤波器的衰减特性, 即决定滤波器最大衰减参数  $\alpha$ , 决定滤波器中心波长的参数  $\lambda_{cen}$  和决定滤波器带宽参数  $\sigma$ .

联立 (3)–(6) 式, 可以求解出不同阈值电流  $I_{th}$  下,  $P_{out}$  随着  $P_p$  的变化而变化的趋势. 求解出  $P_{out}$  后, 输出转换光功率  $P$  则为

$$P = P_{out} \times \kappa_2. \quad (7)$$

利用半导体的稳态载流子速率方程和传输方程, 结合环形腔激光器的阈值条件和可调滤波器的通带特性, 建立起描述自启动可调谐波长转换过程的理论模型. 利用该模型可以对波长转换过程和输出特性进行模拟.

## 4. 结果与讨论

利用上面的理论模型,对不同偏置电流下转换输出与抽运光功率关系进行了理论计算,计算中参数如表 1 所示,理论计算与实际测试结果进行了对比。

表 1 理论计算中所用参数

有源区长度 $L/m$	$5.0 \times 10^{-4}$
有源区宽度 $w/m$	$2.0 \times 10^{-6}$
有源区厚度 $d/m$	$0.1 \times 10^{-6}$
载流子有效寿命 $\tau_s/ps$	270
微分增益系数 $g_N/m^2$	$5.0 \times 10^{-20}$
有源区内部损耗 $\alpha_{int}/m^{-1}$	$4.0 \times 10^3$
调制抽运光波长/nm	1545
滤波器中心波长 $\lambda_{cen}/nm$	1552
滤波器衰减参数 $\alpha$	0.3394
滤波器带宽参数 $\sigma/nm$	4.72
透明载流子浓度 $N_0/m^{-3}$	$1.0 \times 10^{24}$
模场限制因子 $\Gamma$	0.35
无源器件损耗 $\epsilon(\lambda)/dB$	3

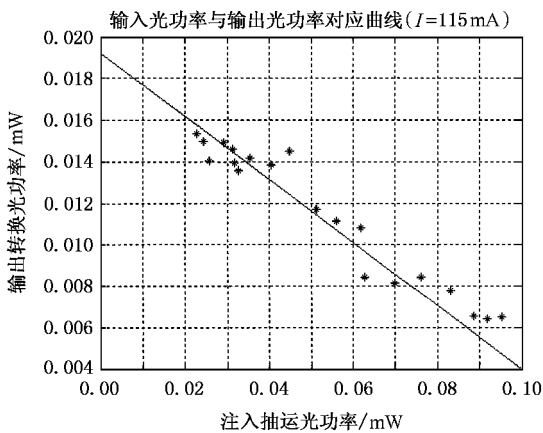


图 2 偏置电流为 115mA 时输入抽运光功率与输出光功率的关系 ——为理论计算值, + 为实验值

图 2 至图 4 为不同偏置电流下输入抽运光与输出转换光功率的关系。由图可见随着抽运光功率的增加,环形激光器输出光功率会降低。可见环形激光器输出光功率受到抽运光功率的调制,因此可以实现交叉增益调制型波长转换。另外,随着偏置电流的降低,实验数据与理论模型的符合程度也在降

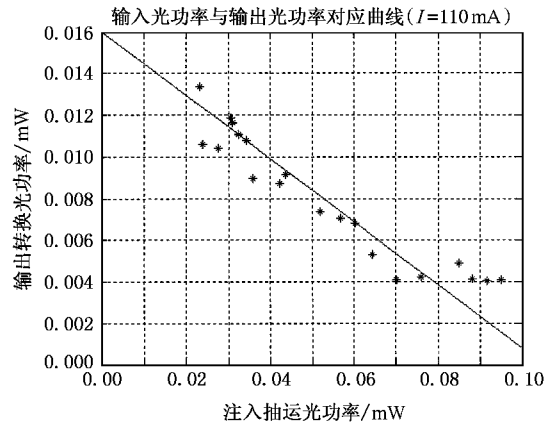


图 3 偏置电流为 110mA 时输入抽运光功率与输出光功率的关系 图注同图 2

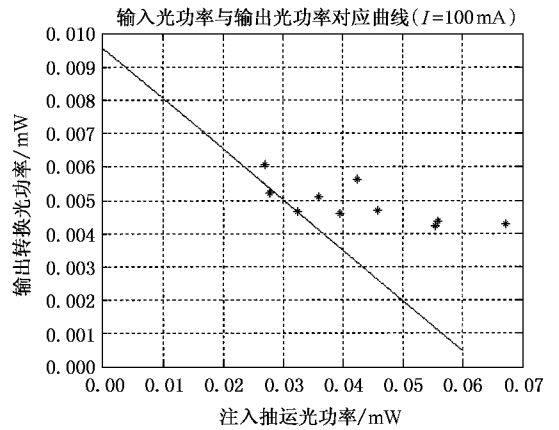


图 4 偏置电流为 100mA 时输入抽运光功率与输出光功率的关系 图注同图 2

低,这是因为在其他条件相同时,偏置电流越高,SOA 有源区中的载流子浓度越高,有效载流子寿命越短,环形腔激光器的增益恢复时间也越短,实际的工作状态越接近于稳态情况。但是在实际情况下,由于端面反射率的存在以及非辐射复合等多种因素的影响,偏置电流并不能无限增大。

图 5 至图 8 为可调谐波长转换的实验结果,对应 SOA 偏置电流为 110mA。图 5 为调整可调谐滤波器得到不同转换输出光谱叠加在一起的结果,可实现的调谐范围主要受可调谐滤波器的调节带宽限制。实验中采用的滤波器带宽为 40nm,可实现的可调谐波长转换调谐范围也为 40nm。

图 6 为对应激励光为 1555.41nm 时的输出光谱。输出波长为 1555.41nm 时,抽运功率为 -8.8dBm 左右,转换光输出功率为 -15dBm 左右,可

见这种结构的可调谐波长转换器的转换效率较高, 无需太大的输入抽运功率. 但在实验中也发现平均抽运功率的动态范围较小, 功率太小时, 输出功率很高, 但没有携带调制信息, 而功率太高时, 输出功率则变得非常小, 同样不能观察到转换现象. 尽管抽运光不能在环形腔激光器中环行一周, 但带有调制信息的部分转换输出光会影响环形腔激光器的输出, 因而转换输出的性能在很大程度上依赖于抽运光功率的大小和偏置电流的大小.

图 7 和图 8 分别对应抽运光和转换输出光信号的波形图, 抽运光格式为 1110101111101011, 转换输出光格式为 0001010000010100, 可见转换输出与原抽运信号格式相反. 结合光谱图和转换输出波形图可以证实实现了 2.5Gb/s 的可调谐全光波长转换.

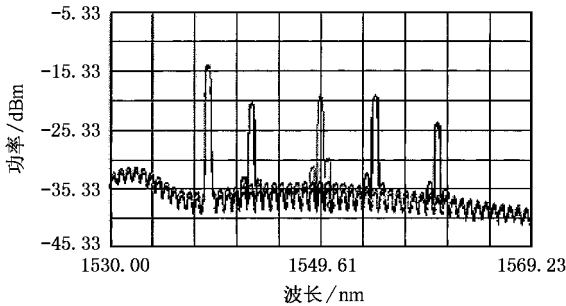


图 5 抽运光固定, 不同激光波长下的输出光谱图

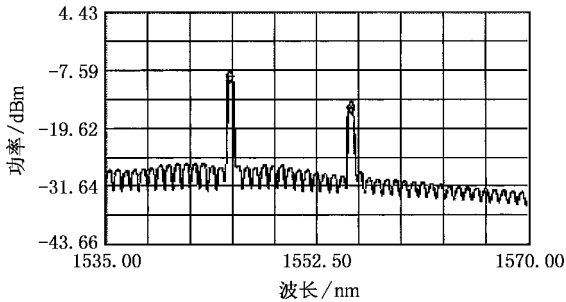


图 6 输出抽运光与激光光的光谱图

转换输出结果与环形腔的损耗有很大关系, 因而对耦合器 1 和耦合器 2 的分光比和插入损耗要进行一定程度的优化. 例如对于耦合器 2, 如果小部分光输出, 则环形腔内部增益较大, 内部激光功率较大, 但耦合器输出较小, 输出功率不会太大. 相反地, 如果大部分光输出, 环形腔较难以满足阈值条件. 同样耦合器 1 的分光比对转换输出的性能也有重要影响, 需要进行优化.

前面的分析表明, 此种方案具有结构简单、可调

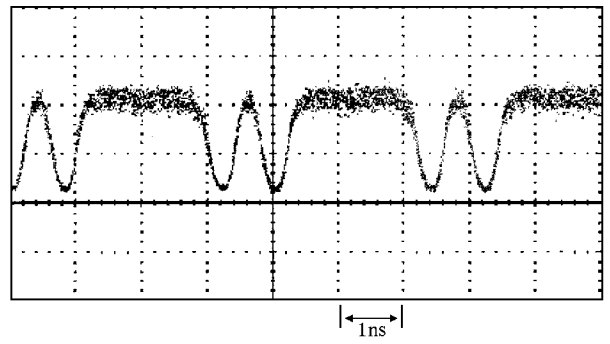


图 7 输出抽运光波形图

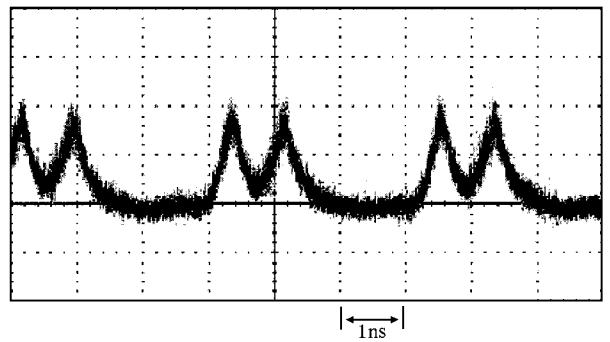


图 8 输出转换光波形图

谐转换范围宽和转换效率高等优点, 但输入功率的动态范围较小. 另外, 此种基于环形腔激光器的可调谐波长转换方案对比特格式有一定的依赖性, 目前的实验结果是针对一定规则比特流取得的, 对伪随机信号的波长转换还没有取得较好的实验结果. 但由于环形腔激光器中增益介质主要是 SOA, 激光器的增益恢复时间也主要取决于 SOA 的增益恢复时间, 这样通过缩短 SOA 输出端与耦合器 2 之间的光纤长度以及优化耦合器 2 的分光比, 是可以实现高速的任意码流的可调谐波长转换的. 通过设计 SOA 与耦合器集成在一起的特殊器件, 可望取得更高速更理想的波长转换结果.

## 5. 结 论

本文提出了一种新颖的基于 SOA 的环形腔结构, 探测光由环形腔激光器激光产生, 可以实现自启动无需探测激光器的可调谐波长转换, 取得了初步的实验成果. 上、下转换范围可达 20nm, 实现了波长在 40nm 范围内的连续动态可调. 建立了简单的理论模型, 研究了输入抽运光对输出转换光的影响,

以及 SOA 的偏置电流与输出光功率的关系,理论计算结果与实验结果较好地符合。

- 
- [ 1 ] Elmirghani J M H *et al* 2000 *IEEE Commun. Magazine* **38** 86
- [ 2 ] Zhang X L *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 741 ( in Chinese ) [ 张新亮等 2000 物理学报 **49** 741 ]
- [ 3 ] Li P L *et al* 2002 *Semiconduct. Optoelectron.* **23** 372 ( in Chinese ) [ 李培丽等 2002 半导体光电 **23** 372 ]
- [ 4 ] Mak W K M *et al* 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 525
- [ 5 ] Cai M *et al* 1997 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **9** 1093
- [ 6 ] Ciaramella E *et al* 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 1361
- [ 7 ] Dong X Y *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2750 ( in Chinese ) [ 董新永等 2002 物理学报 **51** 2750 ]
- [ 8 ] Jin X 2000 *IEEE J. Quantum Electron.* **36** 1485
- [ 9 ] Stéphane C *et al* 2001 *IEEE J. Lightwave Technol.* **19** 893
- [ 10 ] Jiang F X *et al* 2001 *J. Fudan Univ. ( Natural Sci. )* **40** 309 ( in Chinese ) [ 蒋凤仙等 2001 复旦大学学报(自然科学版) **40** 309 ]

## Theoretical and experimental investigations on a novel tunable all-optical wavelength converter<sup>\*</sup>

Xu Fan Zhang Xin-Liang Huang De-Xiu

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

( Received 9 July 2003 ; revised manuscript received 24 September 2003 )

### Abstract

Tunable wavelength converters are key components in intelligent all-optical network. In this paper , a novel scheme for tunable wavelength conversion based on semiconductor-fiber ring laser is proposed. Probe laser in the conventional scheme could be left out and self-started tunable wavelength conversion could be achieved. Theoretical model for this novel scheme is also established and the output characteristics are calculated. Experimental results show good agreement with theoretical results. In experimental study , 2.5Gb/s tunable XGM wavelength conversion with 40nm tuning range was demonstrated. Experimental and theoretical studies show that this novel scheme is worthy of further investigation.

**Keywords** : tunable wavelength conversion , semiconductor optical amplifier , ring laser

**PACC** : 4260D , 4265G , 4280S

---

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China( Grant No. G2000036605 ) , and the National High Technology Development Program of China( Grant No. 2002AA312160 ) .