

# 基于 Fabry-Perot 半导体激光器实现全光波长 转换及其最优纵模选择\*

安 义 王云才† 张明江 牛生晓 王安帮

(太原理工大学物理系,太原 030024)

(2007 年 9 月 22 日收到,2008 年 2 月 21 日收到修改稿)

采用 Fabry-Perot 半导体激光器作为波长转换器件,利用半导体激光器内部的交叉增益调制效应,通过同时将脉冲信号光与连续探测光耦合到半导体激光器,实现了对波长为 1552.62 nm、重复速率为 2.7 GHz 的光脉冲信号转换到波长为 1548.23 nm 的连续激光,同时实现了脉冲时间抖动的抑制.实验发现,对于确定的半导体激光器及其工作参数,总存在一个固定的纵模,当探测光的波长与该纵模波长一致时可获得最高的波长转换效率和最大的消光比.理论分析了探测光与 Fabry-Perot 半导体激光器多纵模间的模式选择对波长转换效率的影响,理论分析与实验结果相符.在此模式下,当注入探测光功率一定时,存在着使转换输出进一步得到改善的最佳注入信号光功率和探测光失谐范围.该纵模的选择与半导体激光器的特性和偏置电流有关.

关键词:纵模选择,波长转换,注入锁定,交叉增益调制

PACC:4265P,4255P,4280S

## 1. 引 言

全光波长转换器是未来全光通信和宽带网络的关键器件,它对提高波分复用系统的灵活性、增加波长再利用、避免交叉连接中波长信号之间的竞争和阻塞等具有重要作用<sup>[1]</sup>.目前,实现全光波长转换的主要技术有四波混频、电吸收调制、交叉增益调制和交叉相位调制.四波混频技术的最大特点是模式转换透明,但对抽运光和信号光的光功率及其波长失谐要求高,导致转换效率低、范围小,使其应用受到限制<sup>[2]</sup>.基于电吸收波长转换技术,它的装置简单、可忽略偏振敏感性,但不能克服转换效率低、插入损耗高且吸收调制条件苛刻等缺点<sup>[3]</sup>.基于交叉相位调制技术,所使用的装置灵活性高、转换输出信号啁啾低、转换范围大,但其对相位非常敏感<sup>[4]</sup>.半导体光放大器(SOA)作为交叉增益调制介质具有结构简单、偏振敏感小、转换速率高等特点,已成为一个研究的热点<sup>[5]</sup>.然而,采用 SOA 作为调制介质,其转换输出信号消光比会严重退化,而基于 Fabry-Perot (FP)半导体激光器交叉增益波长转换,可以克服这

一缺点,并有可能实现对传输速率为 20 Gbit/s 的高速脉冲的波长转换<sup>[6]</sup>.Chan 等<sup>[7]</sup>利用 FP 半导体激光器实现了将信号光重复速率的四倍频,转换后探测光的重复速率为 8.8 GHz. Jim 等<sup>[8]</sup>发现量子阱半导体激光器的光交叉增益调制带宽远大于其电调制带宽.目前,利用半导体激光器作为波长转换器件,已分别实现了多波长转换、归零码到非归零码的数据格式转换<sup>[9,10]</sup>、报头处理和分组交换<sup>[11]</sup>.文献[12]研究了探测光和信号光波长失谐对波长转换效率的影响.但是,在上述文献中均未涉及探测光与 FP 半导体激光器之间纵模的选择对波长转换的影响以及探测光与信号光的功率对全光波长转换消光比的影响.本文报道利用 FP 半导体激光器实现对高速光脉冲信号的全光波长转换,重点研究探测光波长与激光器纵模波长之间的模式选择对波长转换的影响.

## 2. 实验装置

基于 FP 半导体激光器交叉增益调制实现波长转换的实验装置如图 1 所示.一路幅度调制的信号

\* 国家自然科学基金(批准号:60577019,60777041)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: wangyc@tyut.edu.cn

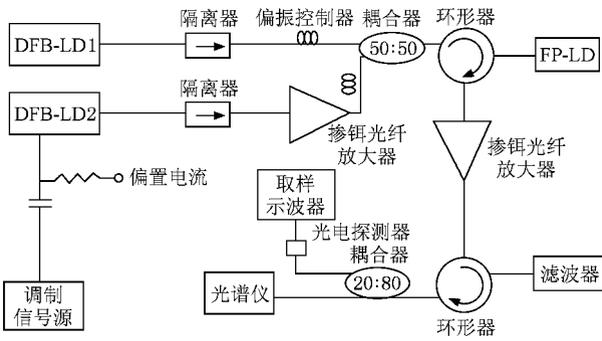


图 1 基于 FP 半导体激光器的交叉增益调制波长转换实验装置示意图

光和一路连续探测光, 经过耦合器、环形器共同注入到 FP 半导体激光器发生交叉增益调制, FP 半导体激光器的输出经过可调谐滤波器提取探测光, 分别用 Agilent86140B 型光谱仪和 Agilent86100B 型取样示波器联合一个 u2t XPDV2020 型超快光电探测器 (47.5 GHz 带宽) 观测转换波长和波形. 信号光和探测光由分布反馈式半导体激光器 (DFB-LD) 产生. DFB-LD1 产生中心波长为 1552.62 nm 的连续光, 经一个调制器 (AgilentE8257D 型调制信号源) 产生重复

速率可调的光脉冲. 探测光来自多量子阱 DFB-LD2, 波长为 1548.23 nm, FP 半导体激光器是一个多量子阱半导体激光器, 常温下阈值为 13.8 mA. 实验中采用线宽小于 0.35 nm、滤波范围为 1530—1565 nm 的可调谐滤波器进行滤波. 隔离器控制光单向传输, 偏振控制器用来控制注入光的偏振态和耦合效率.

### 3. 实验结果及讨论

#### 3.1. 波长转换

实验经过调节信号光的平均注入功率、探测光的注入功率以及探测光与 FP 半导体激光器之间的纵模选择、波长失谐和 FP 半导体激光器的偏置电流等因素, 观测波长转换的效果. 图 2、图 3 是 FP 半导体激光器偏置电流  $I_{\text{bias}} = 1.40I_{\text{th}}$  时, 信号光波长锁定 FP 半导体激光器中心纵模后的波长转换实验结果. 当注入信号光的平均光功率为  $491 \mu\text{W}$  时, 探测光的平均光功率为  $219 \mu\text{W}$ .

注入信号光波长为 1552.73 nm, 重复速率为 2.7 GHz, 探测光的波长为 1548.20 nm, 转换后探测光的

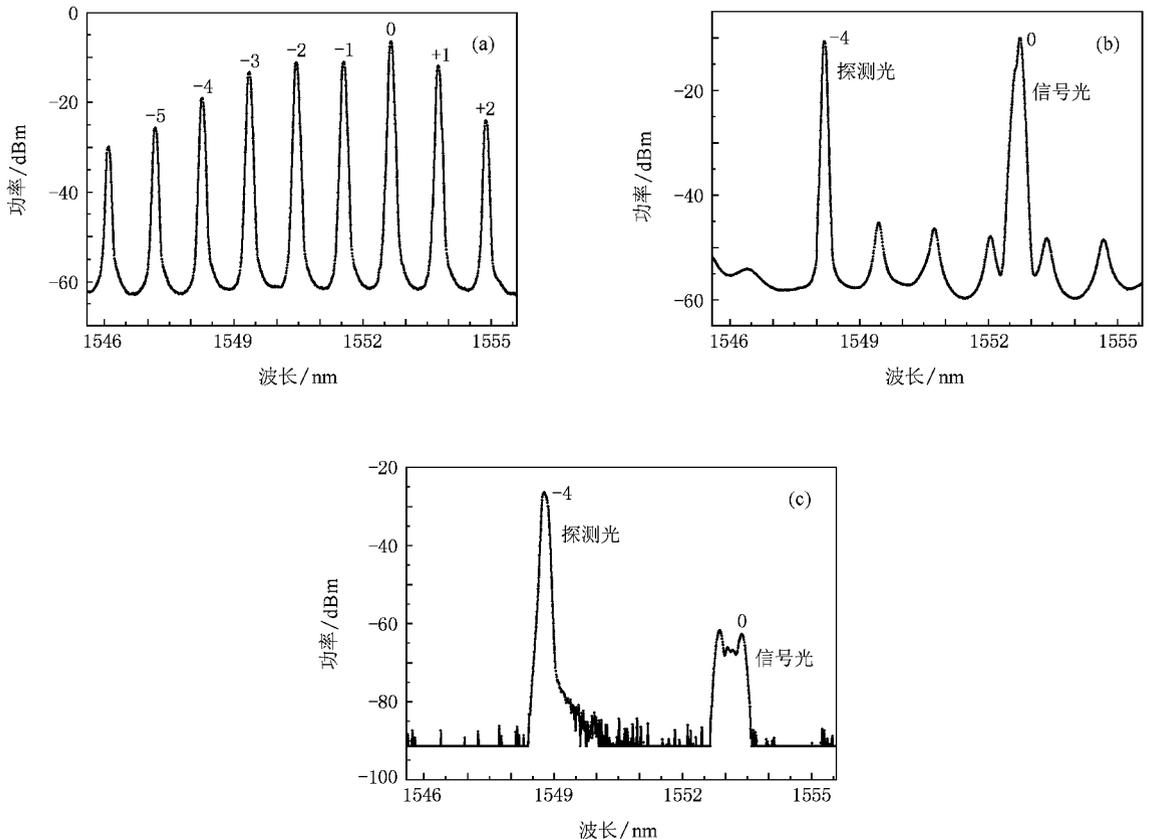


图 2 光谱图 (a) FP 半导体激光器的光谱 (b) 信号光和探测光的光谱 (c) 波长转换时提取探测光的光谱

波形和初始信号光波形如图 3 所示.从图 3 可以发现,信号光具有较高的波长转换效率及大的消光比.实验还发现,经过全光波长转换后,信号脉冲的时间抖动(timing jitter)由 13.56 ps 降低至 8.79 ps,说明通过这一波长转换技术还可以在很大程度上抑制脉冲的时间抖动.

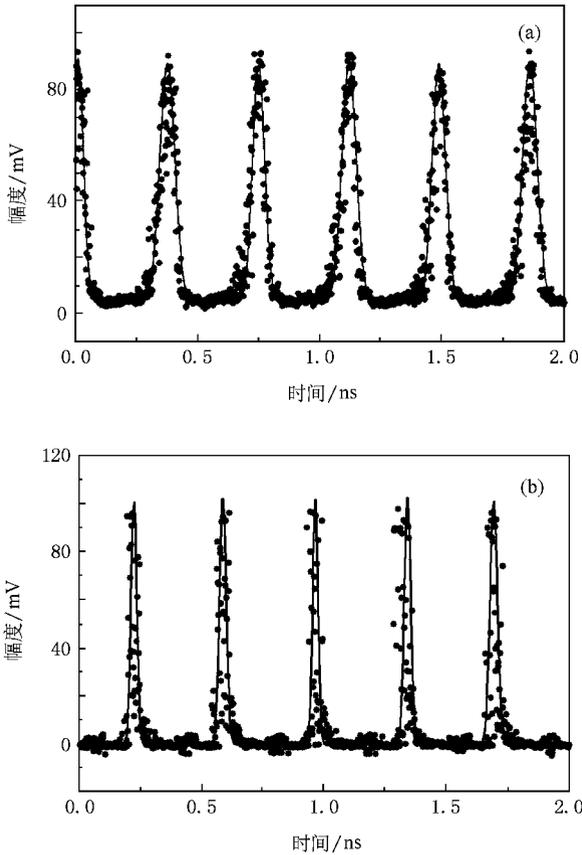


图 3 波长转换前后的信号波形 (a) 波长转换后输出的探测光波形 (b) 初始信号光波形

### 3.2. 纵模选择

在实验中,我们将信号光的波长通过温度控制器与 FP 半导体激光器的中心波长锁定.这里将 FP 半导体激光器的中心纵模称之为 0 模,波长比中心纵模大的纵模依次标记为 1 模、2 模、3 模、... ,波长比中心纵模小的纵模依次标记为 -1 模、-2 模、-3 模、... .实验发现,在相同的实验条件下,波长转换效率取决于探测光波长与 FP 激光器不同纵模的选择关系,即当探测光的波长对应于 FP 半导体激光器的不同纵模时,有着不同的波长转换效率.图 4 给出了波长转换后的信号幅度与探测光波长的关系.此时信号光的波长锁定在 FP 半导体激光器的中心纵

模上,保持其他实验参数不变,仅探测光的波长分别对应于 FP 激光器的几个不同纵模时,得到波长转换后输出信号峰峰值的变化情况.图 4 中的曲线 a、曲线 b 和曲线 c 分别对应于探测光波长锁定于 -4 模、-3 模和 -5 模时的波长转换,发现当探测光波长锁定于 -4 模时输出的峰峰值明显高于 -3 模和 -5 模,即波长的转换效率高.同时还发现转换后信号的时间抖动显著减小.这说明 FP 半导体激光器的纵模中存在着一个最佳的纵模,当探测光波长与该纵模对应时可获得最高的波长转换效率、最低的时间抖动.

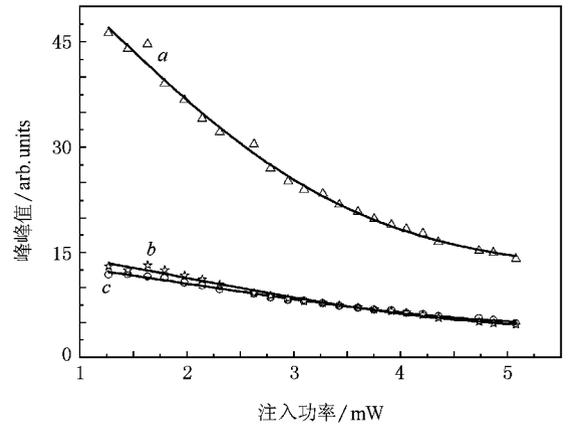


图 4 探测光波长分别对应于 FP 半导体激光器的不同纵模时,波长转换后输出信号的峰峰值与注入信号光平均功率的关系.曲线 a 为探测光对应于 -4 模,曲线 b 为探测光对应于 -3 模,曲线 c 为探测光对应于 -5 模

采用 FP 半导体激光器实现全光波长转换存在着最佳纵模选择,我们认为这是由于 FP 半导体激光器各纵模在外部光注入下的增益饱和不均匀性所导致的.由于在激光器增益谱中各模式获得的增益不同,且在外部信号光注入下载流子受到调制,各模式对增益变化的响应不同,并导致基于交叉增益调制效应的波长转换中存在最佳纵模选择.多纵模 FP 半导体激光器的增益谱可表示为<sup>[13]</sup>

$$G_u(\lambda_u, N) = \alpha N \left\{ 1 - \left[ \frac{\chi(\lambda - \lambda_u)}{\Delta\lambda_g} \right]^2 \right\} - \alpha N_0, \quad (1)$$

式中

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda_0 + \frac{k(N_{th} - N)}{N_{th}}, \\ \lambda_u &= \lambda_0 + u\delta\lambda, \\ N_{th} &= N_0 + \frac{1}{\alpha\tau_p}. \end{aligned}$$

这里  $G_u(\lambda_u, N)$  是对应第  $u$  个模式的增益,  $N$  是载流子密度,  $\tau_p$  是光子寿命,  $\lambda$  是增益峰值中心波长, 当  $N = N_{th}$  时,  $\lambda = \lambda_0$ ,  $\lambda_u$  是第  $u$  个模式对应的波长,  $N_{th}$  是阈值载流子密度,  $\delta\lambda$  是模间距,  $\alpha$  是增益常数,  $\Delta\lambda_g$  是增益谱宽,  $N_0$  是透明载流子密度,  $k$  是谱线偏移常数. 激光器增益相对于载流子浓度的变化可表示为

$$\frac{\partial G}{\partial N} = \frac{1}{a} \alpha \left\{ a - 4 \left[ \frac{k(N_{th} - N)}{N_{th}} - u\delta\lambda \right]^2 + Nb \left[ \frac{k(N_{th} - N)}{N_{th}} - u\delta\lambda \right] \right\}. \quad (2)$$

最大的增益变化发生在  $\frac{\partial}{\partial u} \left( \frac{\partial G}{\partial N} \right) = 0$  处, 由此可以得到受信号光调制可获得最大增益变化的纵模数为

$$u = -\frac{k}{\delta\lambda} \left( \frac{2N}{N_{th}} - 1 \right).$$

对  $u$  取整,

$$u = \left[ -\frac{k}{\delta\lambda} \left( \frac{2N}{N_{th}} - 1 \right) \right].$$

这里的  $k, N_{th}, \delta\lambda$  是由激光器本身决定的正常数,  $N$  与 FP 半导体激光器的偏置电流有关. 所以, 在 FP 半导体激光器偏置电流一定范围的条件下,  $u$  只有一个负值最接近, 使得增益变化最大, 同时也说明下转换要好于上转换, 并且当  $N/N_{th}$  增大时最佳纵模选择将向左移. 实验中两个激光器的纵模间隔均为 1.1 nm, 但是阈值不同, 并且当小阈值 ( $I_{th} = 11$  mA) 的 FP 半导体激光器设置较大的偏置电流 ( $I_{bias} = 2.25I_{th}$ ) 时, 它的最佳纵模选择为 -6 模式. 而阈值大 ( $I_{th} = 13.8$  mA) 的 FP 半导体激光器设置较小的偏置电流 ( $I_{bias} = 1.4I_{th}$ ) 时, 它的最佳纵模选择出现在 -4 模式, 这与以上讨论相符.

我们用不同功率的连续信号光注入上述阈值较小的 FP 半导体激光器, 观测调制载流子之后的各个纵模的增益变化情况, 发现 -4 模时的增益变化最大. 图 5 为连续信号光功率分别在 -21.82 dBm (图 5 曲线 a) 和 -27.51 dBm (图 5 曲线 b) 注入 FP 半导体激光器的功率谱变化情况, 图 5 中曲线 c 是功率差, 由曲线 a 与曲线 b 相减得到. 图 5 表明, 加调制的信号光锁定中心模式时, FP 半导体激光器 -4 模有最大的增益变化, 引起该模在功率谱上的变化最大, 因而在基于交叉增益调制效应的波长转换中使 -4 模的转换输出有最大的峰峰值.

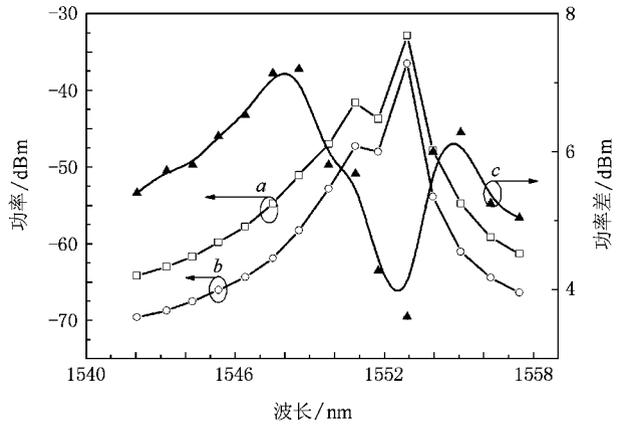


图 5 不同的连续信号光注入下 FP 半导体激光器各模功率的变化

### 3.3. 信号光注入功率和探测光失谐对波长转换的影响

图 6 为  $I_{FP} = 1.56I_{th}$ 、探测光注入功率一定时, 信号光平均注入功率对转换输出的影响. 此时存在一个最佳的信号光平均注入功率, 使得转换输出信号的峰峰值达到最大. 这是由于 FP 半导体激光器偏置电流一定时, 增益载流子数一定, 在探测光注入功率一定的情况下信号光对载流子进行调制, 当信号光的注入功率太大时, 大部分增益载流子将被信号光获得, 探测光因获得的载流子很少而对此难以响应. 同理, 当信号光的注入功率很小时, 大部分载流子将被探测光获得, 信号光对增益载流子的调制作用减弱, 导致探测光对载流子变化的响应减弱. 因而在 FP 半导体激光器偏置电流一定、探测光注入功率一定的情况下, 存在着最佳信号光注入功率值, 使得输出的峰峰值最大. 如图 6 所示. 这与文献

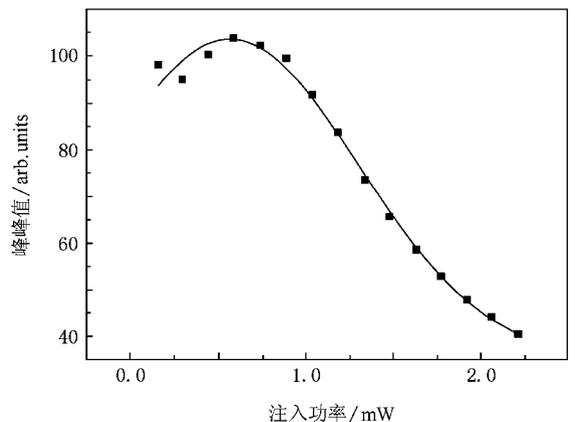


图 6 波长转换中平均信号光功率与转换输出峰峰值的关系

[14] 中基于 SOA 实现波长转换的研究结果相类似。

图 7 所示为当信号光的注入光功率分别为 590.8 467.4  $\mu\text{W}$  探测光(波长为 1548.23 nm)锁定 -4 模时,波长失谐对转换输出信号光峰峰值的影响。

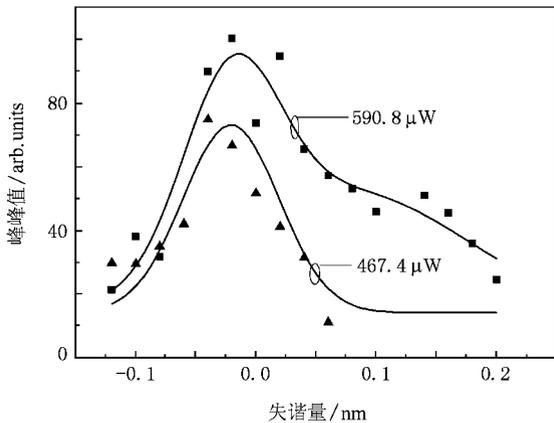


图 7 不同信号光光功率下的探测光失谐量与转换输出信号光峰峰值的关系

从图 7 可以看出,对于不同的信号光注入光功率,当探测光与所锁定模的波长在 -0.03—0.05

nm 的失谐范围内所得转换输出信号的消光比最大。

## 4. 结 论

实验研究了基于 FP 半导体激光器交叉增益调制效应的波长转换中纵模选择对转换的影响,实现了波长从 1552.62 到 1548.23 nm、重复速率为 2.7 GHz 光脉冲信号的波长转换。研究表明,对确定的 FP 半导体激光器在偏置电流一定范围的情况下,存在最佳的探测光纵模选择,使得输出转换信号光的效率和消光比最大,并且它的时间抖动得到抑制。我们的理论与实验结果相符。同时,在此模式下信号光和探测光存在最佳的光功率匹配和最佳的波长失谐量,使得转换输出信号光的消光比和效率进一步得到提高。这一研究结果对于利用 FP 半导体激光器进行波长转换在光通信中的应用具有一定的指导意义。

感谢赵跃鹏、贺虎成、李静霞、丁燕青就本文工作开展的有益讨论。

- [1] Yoo S J B 1996 *J. Lightwave Technol.* **14** 955
- [2] Liu J M, Simpson T B 1994 *IEEE J. Quantum Electron.* **30** 957
- [3] Nishimura K, Inohara R, Usami M, Akiba S 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 278
- [4] Kwok C H, Lee S H, Chow K K, Shu C, Lin C L, Bjarklev A 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 2655
- [5] Xu F, Zhang X L, Huang D X 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2165 (in Chinese) [徐帆、张新亮、黄德修 2004 物理学报 **53** 2165]
- [6] Hörer J, Patzak E 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 596
- [7] Chan L Y, Tsang H K 1998 *IEEE Annual Meeting of LEOS '98* (Vol. 2) (Orlando IEEE) pp15—16
- [8] Jin X, Keating T, Chuang S L 2000 *IEEE J. Quantum Electron.* **36** 1485
- [9] Chow C W, Wong C S, Tsang H K 2003 *IEEE 16th Annual Meeting of LEOS2003* (Vol. 2) (Tucson: IEEE) pp682—683
- [10] Chow C W, Wong C S, Tsang H K 2003 *Electron. Lett.* **39** 997
- [11] Chan L Y, Wai P K A, Lui L F K, Xu L X, Tam H Y, Demokan M S 2005 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **44** 342
- [12] Jiang H, Wu K Y, Han L Y, Teng X, Zhang H Y 2005 *Chin. J. Lasers* **32** 1183 (in Chinese) [姜欢、吴克瑛、韩柳燕、滕翔、张汉一 2005 中国激光 **32** 1183]
- [13] Otsuka K, Tarucha S 1981 *IEEE J. Quantum Electron.* **17** 1515
- [14] Zhang X L, Sun J Q, Liu D M, Huang D X, Yi H Q 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 741 (in Chinese) [张新亮、孙军强、刘德明、黄德修、易河清 2000 物理学报 **49** 741]

# All optical wavelength conversion and optimum longitudinal mode selection using an injection-locked Fabry-Perot laser diode<sup>\*</sup>

An Yi Wang Yun-Cai<sup>†</sup> Zhang Ming-Jiang Niu Sheng-Xiao Wang An-Bang

( Department of Physics , Taiyuan University of Technology , Taiyuan 030024 , China )

( Received 22 September 2007 ; revised manuscript received 21 February 2008 )

## Abstract

Based on the cross-gain modulation effect in Fabry-Perot laser diode ( FP-LD ), the 2.7 GHz optical pulsed signal at 1552.30 nm is converted to a continuous-wave light at 1548.22 nm in experiment. The variation of wavelength conversion efficiency with injection optical power and wavelength are examined in detail. Our research results indicate that there always exists a fixed longitudinal mode for a given FP-LD under certain working conditions to maximize the extinction ratio of conversion signal and conversion efficiency when the longitudinal mode is locked by the probe light. Our theoretical analysis accords with the experiment results. Moreover , there always exist an optimum signal power and a detuning range between the probe light and the longitudinal mode to improve the conversion signal further under the same longitudinal mode locked by the probe light. The optimum longitudinal mode can be determined by the FP-LD characteristics and its working conditions.

**Keywords** : longitudinal mode selection , wavelength conversion , injection locking , cross-gain modulation

**PACC** : 4265P , 4255P , 4280S

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60577019 , 60777041 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : wangyc@tyut.edu.cn