

文章编号 : 0253-2239(2001)08-0970-05

用于全光波长转换的外腔半导体激光器的 注入电流选择*

马军山 耿健新 瞿荣辉 陈高庭 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 实验研究了注入光对光纤光栅外腔半导体激光器阈值电流的影响, 给出了可同时获得高消光比和高转换速率的注入电流范围。采用载流子消耗机制对实验结果进行了定性分析。

关键词: 全光波长转换; 外腔激光器; 光纤光栅; 载流子消耗

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

1 引 言

光纤光栅外腔半导体激光器具有输出波长稳定、谱线窄、通过光纤光栅可以准确控制激光波长、成本低等一系列优点, 因此它有望替代分布反馈激光器, 成为密集波分复用(DWDM)光纤通信系统的光源。光纤光栅外腔半导体激光器在光纤通信系统中的另一重要应用是全光波长转换。全光波长转换主要是利用光纤、半导体激活介质及一些晶体中的非线性光学效应, 将信息从一个波长转换到其他波长上, 以避免光交叉连接中的的波长阻塞^[1~3]。

目前报道较多的主要是基于半导体光放大器(SOA)的全光波长转换技术^[4~6]。我们曾提出基于光纤光栅外腔半导体激光器的波长转换方案^[7], 并报道了波长间隔为 8 nm 的上波长转换的初步演示结果。同以半导体激光器为基础的波长转换技术相比, 由于激光器直接提供转换波长, 因此, 基于外腔半导体激光器的波长转换器无需另外的探测光源, 消光比高、结构简单、成本低, 又由于采用了光纤光栅, 因此具有转换波长稳定性高的突出优点。

由于在该波长转换器中, 是以激光器输出光作为转换信号载波, 所以转换信号的消光比将受注入

电流的影响, 为获得最大的消光比, 就必须选择合适的注入电流。本文以波长间隔为 20 nm 的波长转换为例进行了实验研究, 并对观察到的实验现象进行了解释。

2 实验方案

图 1 为实验方案原理图。波长转换器的核心器件是光纤光栅外腔半导体激光器(FBG-ECL), 由 1.5 μm 波段法布里-珀罗腔半导体激光器与光纤布拉格光栅构成。半导体激光器与光纤光栅耦合侧的腔面经过光学增透处理, 剩余反射率小于 0.001。光纤光栅为采用准分子激光与相位掩模板技术制作的光纤布拉格光栅。通过光纤环形器完成信号光与转换输出光的耦合输入及输出, 与文献[7]中使用 3 dB 光纤耦合器的方法相比, 可以提高转换信号输出功率, 并减小转换信号光及光源反馈光对信号光源的影响。信号光由环形器 1 端进入与 2 端相连接的光纤光栅外腔半导体激光器, 转换的光纤光栅外腔半导体激光器输出光由 3 端输出。环形器的插入损耗, 环形器 1 到环形器 2 为 1.5 dB, 环形器 2 到环形器 3 为 1.1 dB。

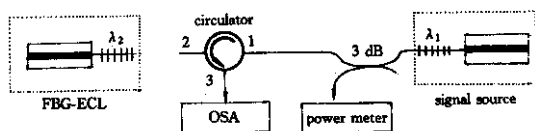


Fig. 1 Schematic diagram of the experiment setup

* 国家科技部攀登计划、上海市博士后科研资助课题。

图 2(a) 为作为转换器件的光纤光栅外腔半导体激光器在注入电流为 39 mA 时的输出光谱, 边模

抑制比高于 30 dB,器件的阈值电流为 36 mA,峰值波长为 1551 nm。实验中信号光源也为自制的光纤光栅外腔半导体激光器,图 2(b)为其输出光谱,峰值波长为 1531 nm,边模抑制比高于 40 dB。

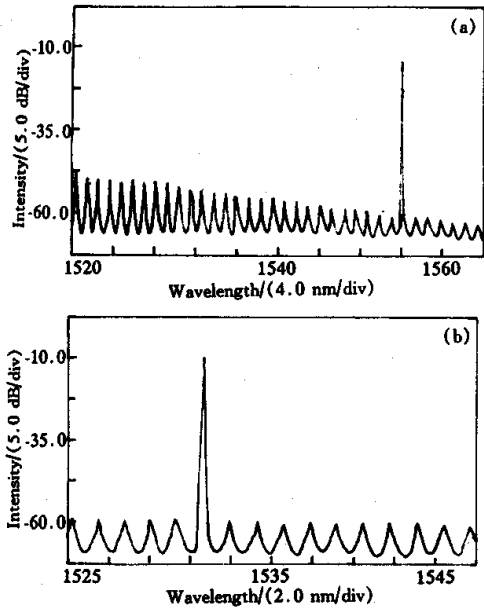


Fig. 2 Spectra of the FBG-ECL (a), and signal source (b)

波长转换机理是基于信号光对半导体激活介质的载流子的消耗机制。光纤光栅外腔半导体激光器的波长为 λ_2 ,注入信号光的波长为 λ_1 。当外部信号光注入到光纤光栅外腔半导体激光器时,由于信号光处于激活介质的增益谱范围内,外部注入光子将消耗激活介质内的载流子而被放大,但注入的电子数是一定的,相应地光纤光栅外腔半导体激光器输出功率就将降低,从而将波长为 λ_1 的信号光所携带的信息转移到波长为 λ_2 的光纤光栅外腔半导体激光器输出光上,实现波长转换功能,转换后的信号与初始信号是反相的。

3 实验结果及讨论

光纤光栅的峰值波长为 1551 nm,决定了外腔激光器的振荡波长亦为 1551 nm。信号光波长为 1531 nm,对光纤光栅是透明传输的,半导体管芯靠近光纤光栅的一端经增透处理,所以信号光可以耦合到管芯中。对于信号光,器件相当于一个半导体光放大器。管芯的另一端未镀减反膜,被放大的信号光将有一部分被反射回来,所以在光纤光栅外腔

半导体激光器输出端可以观察到信号光谱线。

图 3 给出了 0.25 mW 信号光注入时在不同注入电流条件下测得的输出端光谱,可以定性地观察到信号光放大及激光振荡随注入电流的建立过程。

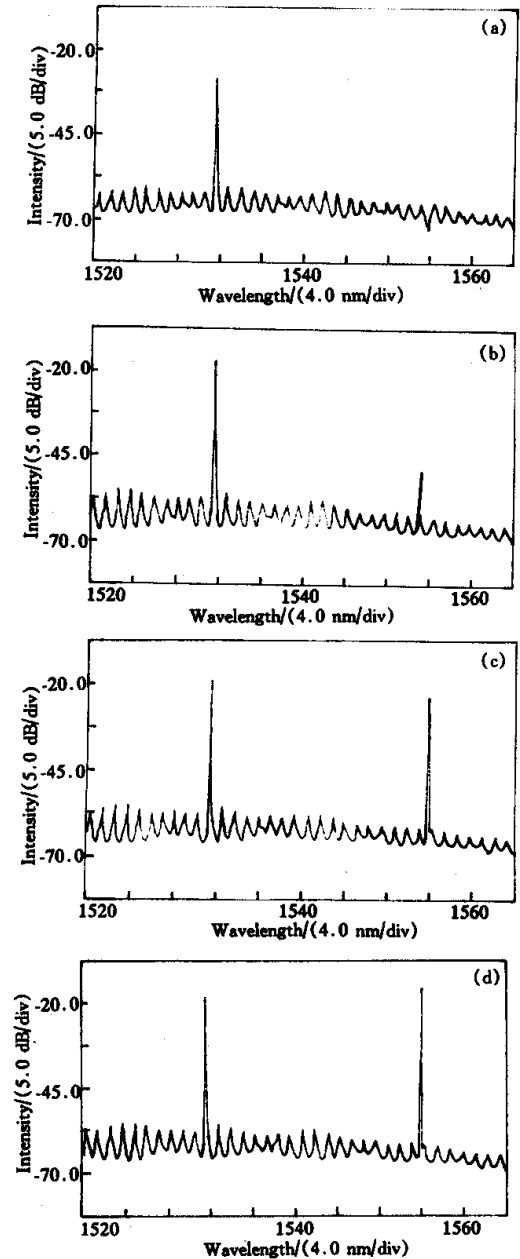


Fig. 3 Spectra of converter output with different injection current. (a) $I = 32$ mA; (b) $I = 39$ mA; (c) $I = 40$ mA; (d) $I = 45$ mA

当注入电流为 32 mA 时,外腔激光器振荡尚未建立起来,光纤光栅峰值反射率为 70%,只有 30%的自发辐射光透射出来,因此在 1551 nm 波长处,输出功率低于其他波长处,输出光谱出现一凹陷。

当注入电流为 39 mA 时,外腔振荡已经建立起来,同时信号光被放大近 10 dB。继续增大注入电流,外腔激光器输出功率逐渐增大,而信号光功率未见继续增大,说明对信号的增益保持恒定。但信号光相对于初始注入时仍然被放大了,在实际使用时,输出端应加入光滤波器以滤除被放大的信号光。

为研究转换信号的消光比与注入电流的关系,需要对有无注入信号时的外腔激光器的 $L-I$ 曲线进行测量,其中 L 为光功率, I 为电流。图 4 同时给出了无注入信号,以及 0.25 mW、0.5 mW 信号光注入时的外腔激光器的 $L-I$ 特性曲线。可以看出,无注入信号时的外腔激光器阈值电流 $J_{th} = 36$ mA,在 0.25 mW、0.5 mW 信号光注入时,阈值电流分别提高至 39 mA 与 42 mA,这说明对于相同波长注入光,激光器阈值电流随注入功率的提高而增大。在超过阈值以后,激光器光功率随注入电流线性增加。

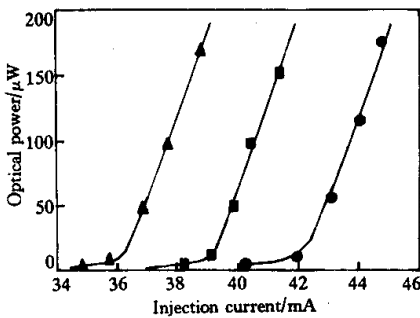


Fig. 4 The $L-I$ characteristics of the FBG-ECL with external injected optical power of 0 mW (\blacktriangle) and 0.25 mW (\blacksquare) and 0.5 mW (\bullet) respectively

设有信号光注入时的阈值电流为 J_{th} ,有信号光注入,且 $J < J'_{th}$ 时,激光输出功率 $P = 0$;当 $J > J_{th}$ 时,激光输出功率可表示为:

$$P_L = \alpha_1(J - J'_{th}). \quad (1)$$

无注入信号时,激光输出功率可表示为:

$$P_H = \alpha_2(J - J_{th}), \quad (2)$$

式中, α_1 与 α_2 为注入电流在阈值以上时,激光功率随注入电流的变化率。由图 4 可知,有无光信号注入时,该参数基本上是相同的, $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.05$ mW/mA。

从消光比的角度看,选择工作电流稍小于 J'_{th} ,则可以在无信号光注入(0 信号)时使激光器激振(1 信号),有信号光注入(1 信号)时使激光器熄灭(0 信号)输出功率最小,转换信号获得最大的消光比。但是,从转换速率角度看,激光器在激振、熄灭状态之间转换,由于外腔模间存在竞争以及低载流子密

度下的张弛振荡,建立稳定的激光输出所需时间要比在激振状态工作长得得多,这对高速率波长转换是不利的。因此,应使激光器工作电流大于 J'_{th} ,则消光比可表示为:

$$\eta = \ln \frac{P_H}{P_L} = \ln \frac{J - J_{th}}{J - J'_{th}}. \quad (3)$$

图 5 给出了转换信号消光比与注入电流的关系曲线。在注入电流稍高于 J'_{th} 处,可获得很高的消光比,随注入电流的增大,消光比快速降低。如对注入功率为 0.25 mW 的情况而言,当注入电流为 39.25 mA 时,消光比可高达 11 dB,当增大为 39.50 mA 时,消光比减小为 8.5 dB,仍高于国际电信联盟标准对传输信号消光比所要求的 8.2 dB,当注入电流增大到 42.00 mA 时,消光比仅为 3.0 dB。对注入光功率为 0.5 mW 时也同样,当注入电流为 42.50 mA 时,可获得高达 11.0 dB 的消光比,当增大为 45.0 mA 时,消光比只有 4.8 dB。不同注入光功率的差别在于,注入光功率较大时,为获得高消光比的注入电流可选择范围相应也大一些。

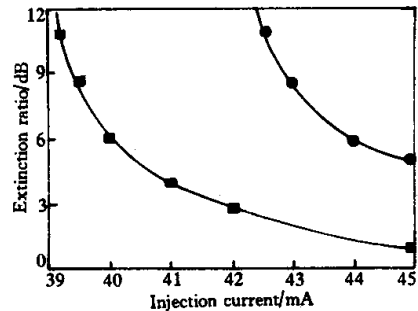


Fig. 5 Extinction ratio of converted signal with different injected current. Injected optical power is 0.25 mW (\blacksquare) and 0.5 mW (\bullet) respectively

上述结果说明,对于一定的信号光功率而言,信号光对激光器功率的影响是同注入电流有关的,当注入电流增大时,其作用逐渐减弱。可见,根据注入光功率的大小,合理选择注入电流对于器件的使用是非常重要的。

4 理论分析

在无信号光注入时,外腔激光器有源层中载流子密度 N 与光腔中光子密度 P 的速率方程为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_s} - g(N - N_t)P, \quad (4)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \Gamma g(M - N_t)P + \frac{\Gamma \beta N}{\tau_s} - \frac{P}{\tau_p}, \quad (5)$$

式中 J 为注入电流密度, d 为增益区的厚度, τ_s 为载流子寿命, N_t 为透明载流子密度, g 为增益系数, Γ 为限制因子, τ_p 为光腔中光子寿命, β 为进入激光模式的自发辐射分量。

不考虑自发辐射时的阈值载流子密度 N_{th} 和阈值电流 J_{th} 分别为：

$$N_{th} = N_t + \frac{1}{g\Gamma\tau_p}, \quad (6)$$

$$J_{th} = \frac{ed}{\tau_s} \left(N_t + \frac{1}{g\Gamma\tau_p} \right). \quad (7)$$

当 $J < J_{th}$ 时,

$$P = 0, \quad N = \frac{\tau_s}{ed} J,$$

没有光子输出, 载流子密度随注入电流线性增加, 当 $J > J_{th}$ 时,

$$N = N_{th} = N_t + \frac{1}{g\Gamma\tau_p},$$

载流子密度恒定, 注入的电子与空穴复合产生光子。光子密度 P 为：

$$P = \frac{\Gamma\tau_p}{ed} J - \frac{\Gamma\tau_p}{\tau_s} \left(N_t + \frac{1}{g\Gamma\tau_p} \right). \quad (8)$$

可见, 光子密度随注入电流线性增加。

当有波长处于激活介质的增益谱范围内的信号光注入有源层时(设信号光初始光子密度为 P_s), 信号光将消耗有源层中载流子, 因此(4)式右侧应加入一项。若不考虑激光器输出光与信号光在增益系数、透明载流子密度上的差别, 则稳态时有源层中载流子密度 N 的速率方程变为

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_s} - g(M - N_t)P - g(N - N_t)P_s = 0. \quad (9)$$

阈值载流子密度仍然如(6)式所示, 令上式中 $P = 0$ 则阈值电流变为：

$$J'_{th} = \frac{ed}{\tau_s} \left(N_t + \frac{1}{g\Gamma\tau_p} \right) + edg(N_{th} - N_t)P_s. \quad (10)$$

上式说明有外部光注入时, 阈值电流与无信号光注入时相比提高了, 增加量与信号光功率、器件在信号光波长处的增益系数成正比。

当 $J < J_{th}$ 时, $P = 0$, 无激光输出。

当 $J > J_{th}$ 时,

$$N = N_{th} = N_t + \frac{1}{g\Gamma\tau_p},$$

光子密度则为

$$P = \frac{\Gamma\tau_p}{ed} J - \frac{\Gamma\tau_p}{\tau_s} \left(N_t + \frac{1}{g\Gamma\tau_p} \right) - \Gamma\tau_p g(N_{th} - N_t)P_s. \quad (11)$$

上式表明, 在注入电流不变的情况下, 外部注入光消耗激活介质内的载流子而被放大, 这样用于在激光器振荡波长处产生光子的载流子就将减少, 从而激光器输出功率降低。与(8)式相比, 光子密度随注入电流的变化率是相同的, 曲线整体右移。而且, 在激振以后载流子密度是恒定的, 不再随注入电流而增加, 因此对注入信号的增益不再变化, 这与实验观察是一致的。

总结 在有信号光注入时, 外腔激光器的振荡阈值提高了, 但激光功率随注入电流的变化率与无光注入时是相同的。外腔激光器对注入的信号光有放大作用, 在激振以后, 增益不再随注入电流增大而提高。从消光比和转换速率的角度考虑, 外腔激光器注入电流应稍大于有光注入时的阈值电流, 这样既可以获得较高的消光比, 又能实现高转换速率。通过选择适当的注入电流, 可使转换器件工作在最佳状态。

参 考 文 献

- [1] Yoo S J B. Wavelength conversion technologies for WDM network applications. *J. Lightwave Technology*, 1996, **14** (6) 955~966
- [2] Durhuus T, Mikkelsen B, Joergensen C *et al.*. All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers. *J. Lightwave Technology*, 1996, **14** (6) 942~954
- [3] Ramamurthy B, Mukhprjee B. Wavelength conversion in WDM networking. *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, 1998, **16** (7) :1061~1073
- [4] Lee H J, Sohn M, Kim K *et al.*. Wavelength dependent performance of a wavelength converter based on cross-gain modulation and birefringence of a semiconductor optical amplifier. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11** (2) : 185~187
- [5] Ma B, Nakano Y, Tada K. Realization of all-optical wavelength converter based on directionally coupled semiconductor optical amplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11** (2) :188~190
- [6] Sotobayashi H, Kitayama K. Observation of phase conservation in a pulse sequence at 10 Gb/s in a semiconductor optical amplifier wavelength converter by four-wave mixing. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11** (1) :45~4745
- [7] 陈高庭, 瞿荣辉, 赵浩等. 光纤光栅外腔分布布拉格反射激光器中的波长转换. *光学学报*, 1998, **18** (3) : 257~261

The Selection of Injection Current of the External Cavity Laser Diode for All-Optical Wavelength Conversion

Ma Junshan Geng Jianxin Qu Ronghui Chen Gaoting Fang Zujie

(*Shanghai Institute of Optical and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*)

(Received 24 April 2000; revised 20 July 2000)

Abstract: The influence of external optical injection on the threshold current of external cavity laser diode with fiber Bragg grating is investigated experimentally. In order to obtaining high extinction ratio and high conversion rate simultaneously, the injection current range is determined. The experimental results are analyzed by carrier depletion mechanism.

Key words: all-optical wavelength conversion, external cavity laser diode; optic fiber grating; carrier depletion

【编者的话】

本刊主页已开通

本刊主页 :<http://gxxb.chinajournal.net.cn> 已开通,读者可上网浏览本刊历史、历届编委会组成、获奖情况、稿约、征订公告及其他基本信息;在“本刊动态”中可查阅下期要目;在“稿约信息”的“录用公告”中可查阅最近一批录用稿件的作者姓名和题目;读者还可通过读者信箱留言,交流学术见解;并能在网上征订期刊、联系广告。主页中的期刊题录浏览也即将开通。

要查阅过刊全文的请访问如下网址:

<http://www.actaoptica.com>

<http://www.chinajournal.net.cn>