

文章编号: 0258-702X(2002)04-0297-04

调幅光注入下半导体激光器光强调制特性的实验研究

卢洪斌, 王向朝, 王学锋, 马军山, 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)

提要 在受注入光调制的半导体激光器(LD)光强调制实验中,当 LD 的偏置电流置于某些值时,观察到其输出光强不随注入光强改变的实验现象。实验还观察到输出光强的幅度随偏置电流的增加而呈周期性变化。理论分析表明这是由于激活区内载流子消耗、带间载流子吸收综合作用的结果,而这些效应与腔内的模式选择、注入电流产生的热效应等过程有关。

关键词 半导体激光器,光强调制,增益调制,模式选择

中图分类号 TN 248.4 文献标识码 A

Intensity Modulation Characteristics of Optically-injected Laser Diode

LU Hong-bin, WANG Xiang-zhao, WANG Xue-feng,

MA Jun-shan, CHEN Gao-ting, FANG Zu-jie

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

Abstract A new phenomenon that the output of a laser diode does not change with the injected light intensity which is modulated when its injection current is certain values has been found. The amplitude of output change of the laser diode varies periodically with the increase of the injection current. It is made clear through the theoretic analysis that this phenomenon is caused by stimulated emission and interband carrier absorption that depend on the longitudinal mode competition, thermal effects, and so on.

Key words laser diode, intensity modulation, gain modulation, longitudinal mode competition

1 引言

半导体激光器(LD)用于高精度干涉测量、光谱精细结构分析及相干光通信等系统中都涉及到激光频率的调制问题^[1,2]。但通常频率的调制总伴随着光强的波动,特别是直接注入电流调频时,这种强度调制的效应更加显著^[3]。光强变化的扰动使信号的信噪比大为下降。为最大限度地减小这种强度变化的干扰,R. Onodera 等用超辐射管作为光功率控制的反馈系统以稳定 LD 的输出功率^[4]。文献[5]用光热调制的方法较大幅度地减小了激光干涉测量中强度变化的影响。前一种方法的反馈控制较复杂,

系统稳定性差。后一方法由于 LD 结温的波动,不能从根本上消除光强变化的影响,必须加入反馈控制装置,以进一步抑制光强的变化。至今还没有一种有效的实验手段可以完全消除 LD 频率调制中光强同步变化的影响。

LD 在外部光注入下能产生频率调制效应,通常其输出光强随调制光强而变。在多量子阱半导体激光器(MQW-LD)光强调制实验中,我们观察到一特殊现象,被注入光调制的 MQW-LD 输出光的幅度及相位随偏置电流而改变,当偏置电流置于一些确定值时,其输出光强不因外注入光强的变化而改变。产生这一实验结果的微观机制主要为增益调制效

收稿日期 2000-12-22;收到修改稿日期 2001-02-26

基金项目 国家自然科学基金(69978024)上海市科技发展基金(011461060 与 0114nm013)资助项目。

作者简介:卢洪斌(1966—)男,中国科学院上海光学精密机械研究所博士生,主要从事光电子技术及半导体激光器应用方面的研究。E-mail: wxz26267@online.sh.cn

应。实际应用中这种方法可有效地消除光强变化的不利影响,且结构简单,不需复杂的反馈控制装置。本文主要介绍实现这一调制效应的实验方法,并从增益调制、注入电流所产生的热效应、光热现象等物理过程出发解释其形成的机制。

2 实 验

实验装置如图 1 所示,LD₁,LD₂ 的中心波长、阈值电流分别为 785.31 nm,41 mA 和 783.22 nm,35 mA(LD₁,LD₂:HL7851G,GaAlAs MQW-LD)。LD₂ 的直流偏置电流为 I_{02} ,调制电流 $i(t)$ 为矩形波。LD₁ 的偏置电流 I_{01} 可手动精密调节,LD₂ 输出光经光隔离器和偏振分束器 PBS 注入到被调制的 LD₁ 内,LD₁ 出射光经偏振分束器 PBS 分光并由光电二极管 PD 接收,信号通过放大后输入计算机数据采集系统,数字示波器监视信号的变化情况。通过调节 LD₁ 和 LD₂ 出射光的偏振方向,使 LD₁ 的出射光经 PBS 反射进入 PD,使 LD₂ 的出射光通过 PBS 注入到 LD₁ 内,保证 LD₁ 的出射光和 LD₂ 的注入光的偏振方向相互垂直,以消除光注入锁定等复杂的相互作用过程。

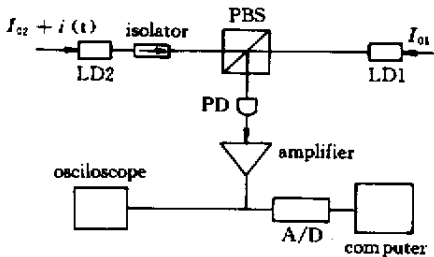


图 1 实验装置
Fig.1 Experimental setup

实验中保持 I_{02} (60 mA) 和 $i(t)$ 的幅度(9 mA)及频率(3 kHz)不变, I_{01} 调节的范围从 41 mA 到 100 mA。在光路调整中消除可能出现干涉的条件,以保证光强的变化是增益调制的结果。实验记录了 I_{01} 不同值时输出光强的幅度及光强随时间的变化曲线。测量中使用交流放大器放大探测信号,消除被调 MQW-LD 偏置电流改变时直流光强变化的影响。由于注入光幅度不变, MQW-LD 输出光强变化反映了激活介质内载流子浓度的变化情况。

图 2 为 LD₁ 偏置电流 I_{01} 分别为 50.6 mA,

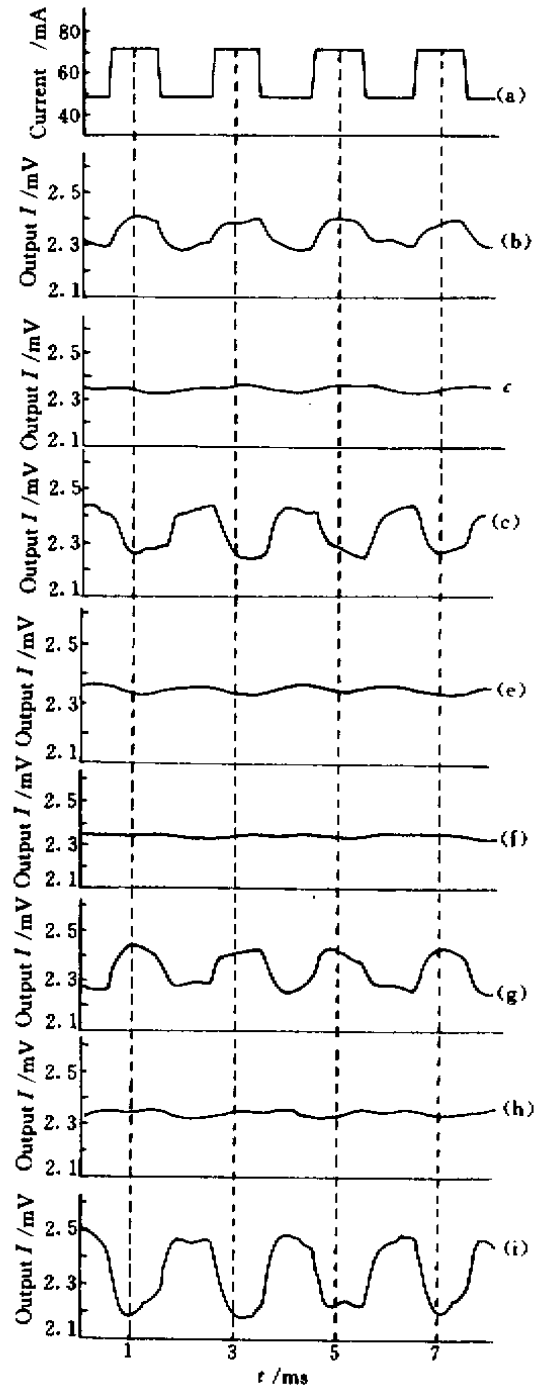


图 2

(a) LD₂ 上的调制电流 (b)~(i) LD₁ 上的偏置电流分别为 50.6 mA, 59.4 mA, 61.4 mA, 67.8 mA, 69.9 mA, 71.2 mA, 79.4 mA, 81.3 mA 时输出光强随时间的变化关系

Fig.2

(a) Injection current of LD₂. The out of LD₁ when it's injection current is (b) 50.6 mA, (c) 59.4 mA, (d) 61.4 mA, (e) 67.8 mA, (f) 69.9 mA, (g) 71.2 mA, (h) 79.4 mA, (i) 81.3 mA

59.4 mA, 61.4 mA, 67.8 mA, 69.9 mA, 71.2 mA, 79.4

mA 81.3 mA 时输出光强随时间的变化关系。

图 3 为实验检测到的 LD₁ 输出光强变化幅度随偏置电流 I₀₁ 的变化关系。幅度随 I₀₁ 的增加而呈周期性变化,其中幅度极大值同时随之而增大。当 I₀₁ 为 50.0 mA,59.4 mA,69.9 mA,79.4 mA,89.8 mA,98.3 mA 时,LD₁ 输出光强不随注入光而变化。

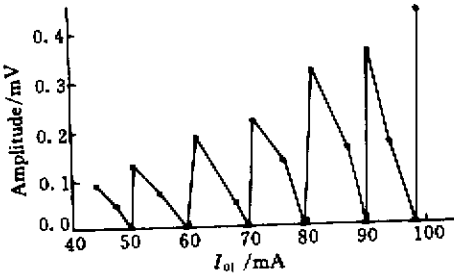


图 3 LD₁ 输出光强幅度随偏置电流的变化关系

Fig.3 Relationship between amplitude of output change of LD₁ and the injection current

实验观察到这些平衡点随时间而漂移,5 min 内的漂移范围约为 ±0.7 mA,导致平衡点漂移是激活区温度变化的结果。激光器的结温随偏置电流 I₀₁,注入光强以及环境温度而改变,其温度变化的快慢与热传导过程有关。

3 结果分析

由含光注入项的多模载流子及光子密度速率方程可知,外部激光的注入会改变载流子的浓度和光子密度及光振荡模式。本实验中由于耦合到 LD₁ 腔内的注入光比例较小且与 LD₁ 激光的偏振方向垂直,不会改变激光的振荡模式。实验中也观测到 LD₁ 输出的光波并未因激光的注入而发生模跳变,所以,本文分析仅考虑注入光对载流子浓度及光子密度的调制问题。

上述实验中,光强波动主要源于因受激发射和吸收使载流子浓度发生变化产生的增益调制效应。当注入光的波长处于介质增益区域内时,由于受激辐射消耗激活区的载流子,使 LD 的输出光强改变,光强变化与调制注入光的强度变化反相。这类似于半导体光放大器内的交叉增益调制现象^[6],但由于 LD 的纵模选择特性,如图 4 所示,光注入时产生更为复杂的作用机制,即载流子消耗的多少与注入光的波长有关。此外,光注入 LD 的另一作用过程是带间载流子激发,产生电子-空穴对,这将使自由载

流子浓度升高。当注入光引起的带间激发所增加的载流子数目超过受激辐射所消耗的载流子数目时,将使 LD 的输出光强因载流子数的增加而增大。表现为光强的变化与调制注入光的强度变化同相。使之表现出不同于半导体光放大器的增益调制特性。可以推断,带间载流子激发产生的载流子与受激辐射所消耗掉的载流子数相等时,输出光的强度将不随注入光而改变,但因光谱烧孔和载流子加热等作用将使输出光频随注入光强而变化^[7]。

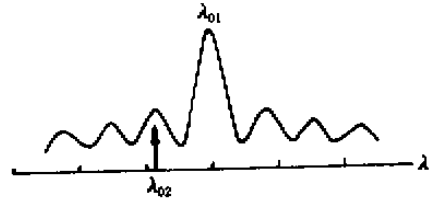


图 4 因 F-P 腔的选模作用,对应不同波长注入光载流子消耗大小的示意图

Fig.4 Schematic of relationship between carrier deplete and wavelength due to the longitudinal mode competition of F-P cavity

对于边模抑制比较大的 LD,产生的直接效果是大幅度减小注入光波长在主模以外的载流子消耗。载流子消耗的减少相应地突出了带间载流子激发的效应,从而实验上较易观察到注入光引起的受激辐射和带间吸收动态变化过程产生的光强调制效应。

如图 4 所示,λ₀₁,λ₀₂ 分别为 LD₁,LD₂ 的中心波长,当 LD₁ 的偏置电流增加时,因电流流经 LD₁ 结电阻所产生的热效应使得结温升高,导致 LD₁ 中心波长向长波方向移动,相当于图 4 以 λ₀₁ 为中心的曲线整体向右移动,λ₀₂ 对应的载流子消耗多少将随之发生变化,使注入光产生的载流子消耗和带间载流子激发的相对大小发生变化,从而改变输出光强变化的幅度和相位。

图 2(b)(g)中光强变化与注入光的强度变化位相同步,说明此时带间载流子激发处于主导地位。图 2(d)(e)(i)中光强变化与注入光的强度变化反相,此时注入光产生的载流子消耗处于支配地位。图 2(c)(f)(h)的光强几乎不随注入光的强度而变,载流子消耗和带间载流子激发达到动态平衡。

图 3 还可观察到平衡点之间的光强变化幅度的极大值随偏置电流 I₀₁ 的增加而增大,这是 LD₁ 光增益随偏置电流而增加的结果。由于结温漂移的影响较大,通常注入光调制 LD 不容易观察到这些平衡

点。而通过微调 LD₁ 偏置电流的方法,以补偿温度漂移对增益变化的影响,从而较易检测到这一实验现象。在以上调制过程中,由注入光引起的光热调制效应也对增益的变化有贡献^[8],即结温的变化使输出光强大小发生改变。

以上实验结果说明被调激光器的光强变化幅度不仅与注入光的变化幅度有关,而且与 MQW-LD 的偏置电流有关,当偏置电流为某些确定值时,带间载流子激发和载流子消耗达到平衡,被调激光器的光强不随注入光的强度而变,偏置电流增加过程中, MQW-LD 的主模向长波方向移动,注入光对应不同的带间载流子激发和载流子消耗的强弱,导致光强的变化幅度周期改变,周期为对应纵模间隔的大小,这可从图 3 表示出的相邻平衡点间隔大小的实验数据得到验证。图 3 相邻零点间的偏置电流变化范围与带间激发和载流子消耗有关。带间激发主导时偏置电流变化范围约为 9.4 mA,载流子消耗主导时偏置电流变化的范围约为 10.4 mA。说明两种不同作用过程的固定差异。这可能与激光器的材料、掺杂元素及浓度等有关,需进一步的实验验证。

4 结 论

实验结果表明,注入光调制的 MQW-LD 的输出光的幅度及相位随偏置电流而改变,当偏置电流置于某些值时,其输出光强不随注入光强而改变。这是由于带间载流子激发、载流子消耗等达到动态平衡的结果,它与载流子消耗、带间载流子激发、结温变化等过程有关。

以上实验提供了一种新的频率调制中消除光强变化的方法。这一实验现象对提高激光干涉测量精度、提高光谱精细结构分辨率等具有很大的应用价值。

参 考 文 献

- 1 K. B. MacAdam, A. Steinbach, C. Wieman. A narrow-band tunable diode laser system with grating feedback, and a saturated absorption spectrometer for Cs and Rb [J]. *Am. J. Phys.*, 1992, **60**(12): 1098 ~ 1111
- 2 S. Saito, O. Nilsson, Y. Yamamoto. Coherent FSK transmitter using a negative feedback stabilized semiconductor laser [J]. *Electron. Lett.*, 1984, **20**(17): 703 ~ 704
- 3 S. Kobayashi, Y. Yamamoto, M. Ito *et al.*. Direct frequency modulation in AlGaAs semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(4): 582 ~ 595
- 4 R. Onodera, Y. Ishii, N. Ohde *et al.*. Effect of laser-diode power change on optical heterodyne interferometry [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(4): 675 ~ 681
- 5 Xuefeng Wang, Xiangzhao Wang, Feng Qian *et al.*. Photothermal modulation of a laser diode wavelength: application to sinusoidal phase-modulating interferometer for displacement measurements [J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**(8): 559 ~ 564
- 6 J. M. Wiesenfeld, J. S. Perino, A. H. Gnauck *et al.*. Bit error rate performance for wavelength conversion at 20 Gbit/s [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(19): 720 ~ 721
- 7 B. Bodermann, H. R. Telle, R. P. Kovacich. Amplitude-modulation-free optoelectronic frequency control of laser diodes [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(12): 899 ~ 901
- 8 Lu Hongbin, Wang Xiangzhao, Wang Xuefeng *et al.*. A study on photothermal intensity-modulation characteristics of laser-diode [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **A27**(11): 969 ~ 972 (in Chinese)