

新型单模半导体激光器实验教学中的关键基础问题讨论*

吴建伟^{1,2}

(1. 重庆师范大学 光电功能材料重庆市重点实验室, 重庆 401331;

2. Department of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-714, Rep. of Korea)

摘要: 半导体激光技术是光学工程硕士研究生的核心专业课程,在掌握激光原理的理论基础知识之上,进行实验研究是十分关键的一个环节,而在半导体激光器的研究与开发中,单模法布里-珀罗半导体激光器是最近几年才发展起来的一种新型结构的激光器。笔者对此新型单模半导体激光器件的基本结构和工作原理做介绍,多模激光器在内置反馈外腔的作用下,由于强烈的模式竞争,很容易实现激光器输出具有较高边模抑制比的单模激光谱,输出的单模激光随激光器操作温度发生漂移。对学生在实验研究过程所遇到的注入锁定行为的关键物理问题做详细的探索性分析和讲解。注入功率和波长失谐是促使激光器发生注入锁定行为的2个重要参数,随波长失谐的增加,使激光器发生注入锁定行为的阈值功率也将被提高,注入功率越高,使激光器发生锁定行为的波长失谐范围也越大。

关键词: 半导体激光技术;单模半导体激光;结构与原理;注入锁定

中图分类号: G420;O43

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2013)05-0110-04

众所周知,在半个多世纪以来,半导体激光器在现代光纤通信技术中扮演着十分关键的角色,推动了信息通信的革命性发展。而在半导体激光器的大家族中,由两个反射镜之间填充半导体增益介质所形成的法布里-珀罗激光二极管由于具有结构简单、功耗低、价廉和丰富的非线性光学特性备受青睐,已广泛应用到光通信技术中的波长转换^[1]、混沌^[2]、脉冲产生^[3]和毫米波产生^[4]等光学函数功能中。而对于这种传统结构的法布里-珀罗激光腔将支持多个激光纵模同时振荡,在输出端形成多模激光输出谱,在输出的激光谱中,所得到的边模抑制比一般仅有几个dB,这严重限制了这种传统激光器的实际应用。因此,设计和开发具有高边模抑制比的法布里-珀罗激光器技术也悄然兴起,从而大大提高法布里-珀罗激光器在光通信技术中所扮演的重要角色。近年来,在传统多模法布里-珀罗激光器的输出端采用光纤端面形成一个反馈外腔的新型单模法布里-珀罗激光器被设计和深入研究^[5],光学反馈外腔的目的是进行模式选择,使被选中的激光模式再注入激光器的激活区进行振荡放大,最后形成单模激光输出,所输出的激光模波长可以通过控制激光器的注入电流和工作温度来灵活改变,此种单模激光器具有调谐范围大、边模抑制高和自锁定等显著特点,因此在光通信的波长转换^[6]、逻辑门^[7]和触发器^[8]技术中也有十分突出的表现。详细了解此种激光器的基本结构和工作原理,并在实验研究中掌握它的基本物理特性是进一步促进它的实际应用的关键基础问题,但在实验中,由于学生基础薄弱,实验操作能力不强,在全面理解单模激光器的非线性物理现象和探索光学应用方面有一定的难度。因此,本文将对此新型单模法布里-珀罗半导体激光器在基础实验中所遇见的注入锁定行为的关键问题和相应的物理机制作详细的讲解和分析,并有利于提高学生的实际实验操作过程。

1 基本结构和工作原理

在实验中,学生应该首先熟悉实验所用激光器的基本结构和工作原理。图1清晰显示了新型法布里-珀罗单模半导体激光器的结构简图,在图中,传统的多模法布里-珀罗激光器形成整个单模激光系统的核心激活区,多模激光器在超过其阈值以上的电流驱动下,将形成多模振荡输出,输出的多模激光经过球面透镜耦合进由光纤端面所形成的反馈外腔,在光纤端面的反射下,部分激光纵模将被反馈回多模激光器的增益激活区,通过调节激光器的工作温度,可以维持一个单纵模在整个激光系统内被振荡放大,最后形成单模激光输出。另外值得注意的

* 收稿日期:2012-12-16 修回日期:2013-03-20 网络出版时间:2013-09-17 17:38

资助项目:国家自然科学基金(No. 61205111);重庆师范大学科研基金重点项目(No. 2011XLZ06)

作者简介:吴建伟,男,副教授,博士,研究方向为非线性光子技术, E-mail: jwwu@cqnu.edu.cn

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20130917.1738.201305.110_019.html

是,在整个单模激光系统中,仅有形成驻波并且中心波长位于激光器增益介质的增益带宽内的激光纵模才能形成共振并放大输出,其它的激光纵模将由于增益减少而被抑制,从而得到具有高边模抑制比的单模激光输出谱,如图 2 所示。在图 2 中,所得到的边模抑制比已超过 25 dB。另外,必须注意的是,当调节激光激活区的工作温度时,主模的峰值波长将随温度变化,如图 3 所示。在图 3 中可以看到,当温度从 10 °C 增加到 16 °C 时,主模波长将发生振荡性漂移,但总的趋势是随温度的提升,被锁定的主模峰值波长将向长波方向移动。注入电流的变化,对主模波长的变化不太明显,但是随注入电流的增加,主模的峰值功率自然也会得到加强。由于注入模与激光模之间的干涉效应,最后锁定的激光模的强度也将随波长失谐的增加呈现震荡结构,而且注入功率越大,震荡结构的调制深度也越深,如图 4 所示,图中也清楚地揭示了注入功率越大,能实现注入锁定的波长失谐范围也越宽,详细物理机制将在下部分中讨论。

2 光注入锁定过程讨论

光学注入锁定是法布里-珀罗激光器的基本光学特征,图 5 给出了实现外部光注入锁定的实验结构示意图。而是否能成功实现注入锁定行为与外部注入激光的偏振态、光功率和载波波长密切相关。在实验中,通过调节偏振片的偏振方向使注入激光器的激光具有横电模的振动方向,通过调节可调谐激光器,使外部注入激光的载波波长靠近图 2 中任意一边模激光。结合图 5 的实验装置简图,具体的实验操作过程如下:由可调谐激光器(Tunable laser, TL)输出的连续激光可通过偏振控制器(Polarization controller, PC)的调节来获取输出光的 TE 偏振态,因为在 SMFP-LD 中,仅 TE 偏振光才能促使注入锁定现象发生,注入激光器的 TE 偏振光的功率可通过可变衰减器(Variable optical attenuator, VOA)来控制,从 VOA 输出的激光通过均分的光纤耦合器被分别注入功率检测计和光纤环形器中,功率检测计(Power meter, Pm)的作用是间接测算注入 SMFP-LD 的激光功率,进入光纤环形器的光束将通过其耦合进 SMFP-LD 中,最后从 SMFP-LD 输出的激光谱又将通过环形器被光谱分析仪(Optical spectrum analyzer, OSA)所捕获,在 OSA 上可以清楚地观察发生注入锁定行为的每个细节。当注入光的偏振态和足够的入射功率被确定后,波长失谐就将是决定锁定现象是否能成功实现的关键因素。在考虑激光纵模为理想单色激光振荡的情况下,外部可调谐激光所输出的激光波长应该位于所选定的边模激光的右侧,这是因为,当具有足够高强度的外部光注入激光器增益区后,由于受激辐射,注入激光将消耗增益区中的自由载流子,得到放大,从而使激活区的自由载流子减少,介质的折射率变大,共振纵模将红移,从而使输出激光锁定在外部注入激光波长位置,其它纵模的功率被深深抑制。基于此,为了成功实现注入锁定,应采用外部注入波长位于所选取的激光边模的右侧,并保证外部注入光有足够高的光强。在实际实验操作中,首先讨论只有一束外部注入光的情况,图 6 给出了在注入电流为 15 mA 和

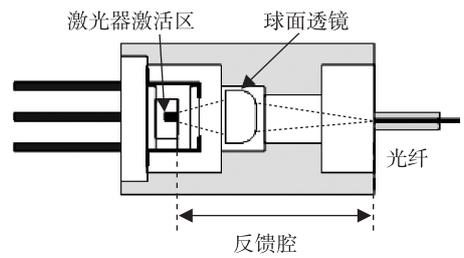


图 1 新型单模法布里-珀罗激光器结构简图

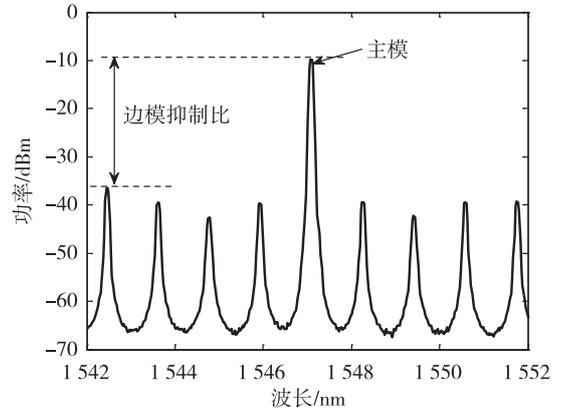


图 2 单模激光器输出激光谱

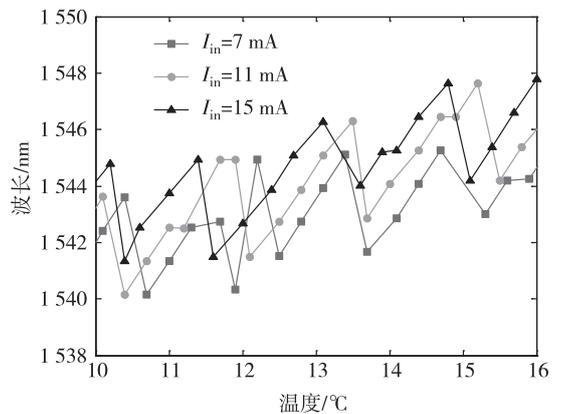


图 3 控制模峰值波长随温度的变化

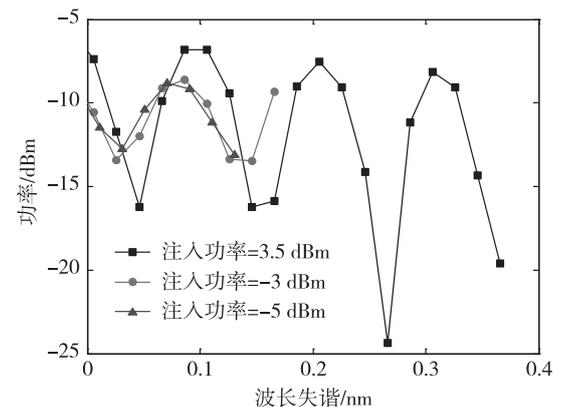


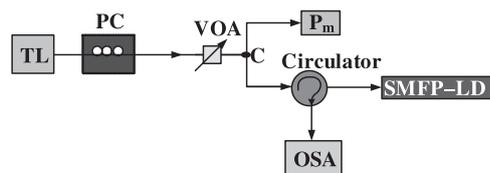
图 4 输出的外部注入锁定模功率在不同的注入功率下随波长失谐的变化

工作温度为 $15.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,在不同的波长失谐下,随外部注入功率的提升,激光器自锁定主模的峰值功率演变情况,这里的波长失谐被定义为外部注入光的峰值载波波长与主模峰值波长的波长差。从图中可以看出,在确定波长失谐的情况下,当外部注入功率超过一定阈值时,激光器主模功率将突然衰减,这也暗示着在激光器激活区由于外部注入光强烈的受激辐射效应,消耗了大量自由载流子,使激光器振荡模红移,从而使激光器锁定在外部注入波长,其它激光模包括主模获得的增益迅速减少,导致相应的功率也被深深抑制,实现具有高边模抑制比的锁定激光谱输出,一般在注入锁定中,最后锁定激光谱的边模抑制比将高达 40 dB 以上。另外,从图中可以看出,随波长失谐的增加,发生注入锁定所需要的阈值功率也被提升,当波长失谐为 0.04 nm 、 0.08 nm 和 0.12 nm 时,发生完全注入锁定的所必须的外部注入功率大约为 -8 dBm 、 -5 dBm 和 -2 dBm 。这主要是由于,波长失谐增加后,激光振荡模需要发生更大的红移才能使被选定的激光边模漂移到注入波长,要使激光模发生更大的红移,就需要强的注入功率消耗大量的自由载流子来增加激活区的介质折射率,因此,波长失谐越大,发生注入锁定行为时所需要的注入功率也被增加。从这现象也可以看出,在特定的外部注入光功率下,激光器在一定的波长失谐范围都能实现注入锁定,图 7 就显示了激光器发生注入锁定行为时,在不同的注入功率下发生完全注入锁定行为时,所得到的波长失谐范围,很显然,注入锁定的波长失谐范围随注入功率的增加而被加宽。为了更清楚地显示激光模在注入锁定过程所发生的变化,图 8 给出了当波长失谐为 0.04 nm 时激光模随注入功率的演变过程,很显然,当注入功率较小时,激光主模的功率基本没有变化,此时激光主模的受激辐射在激光增益区仍然占据主导地位,但是当注入功率超过大约 -9 dBm 后,注入激光的受激辐射逐渐增强直至占据主导地位,从而实现增益放大,激光输出谱锁定在注入波长处。

在这里,对单光束注入的激光锁定情况作了较为详细的讨论分析,但是在实际应用中,经常会需要多光束同时注入,实验表明,当多光束同时注入时,只要通过调节合适的波长失谐和注入功率,同样可以使激光器发生注入锁定,并且同时锁定在多个注入波长处,也就是说,在波长失谐一定的情况下,激光器发生注入锁定的光学行为主要依赖外部注入的功率水平。具体的实验现象和注意过程,让学生在理解掌握单光束注入锁定的情况下,再进行具体的实验操作,并对多光束注入现象做详细的实验观察和数据处理分析。另外,考虑激光模为理想的单色光,因此,注入波长位于所选取的边模激光的右侧,但从图中可以看出,实际的激光模有一定的宽度,那么这个宽度是否会对注入锁定带来其他光学效应?注入波长位于激光模左侧是否同样会出现注入锁定现象?这些现象留给学生在具体实验过程观察讨论。在熟练掌握注入锁定行为的基本原理后,怎样应用这些实验结果和相应的物理机制来实现具体的光学应用?这是学生在解决基础实验问题基础上所需要进行的最后的探索性研究问题。

3 结论

本文主要讨论了重庆师范大学光学和光学工程研究生在新型单



注:图中 TL 为可调谐激光器、PC 为偏振控制器、VOA 为可变衰减器、C 为光纤耦合器、Pm 为功率检测计、Circulator 为环形器、SMFP-LD 为单模法布里-珀罗激光器和 OSA 光谱分析仪。

图 5 基于 SMFP-LD 的外部光注入锁定实验结构简图

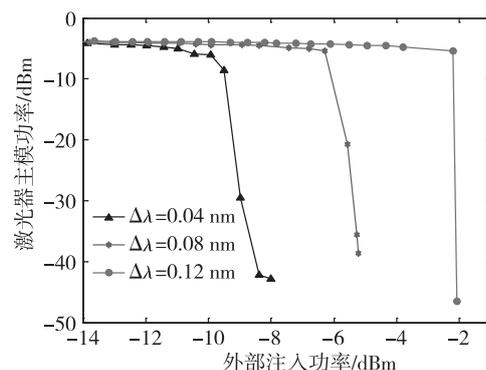


图 6 在不同的波长失谐下,激光器主模功率随外部注入功率的变化

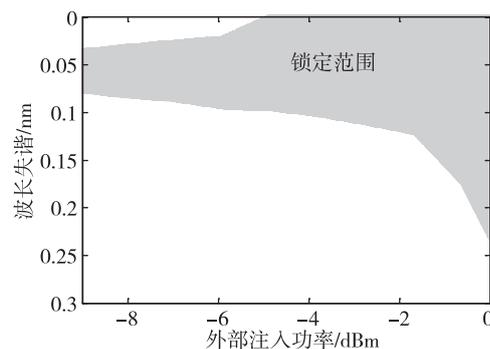


图 7 注入锁定的波长失谐范围随外部注入功率的变化

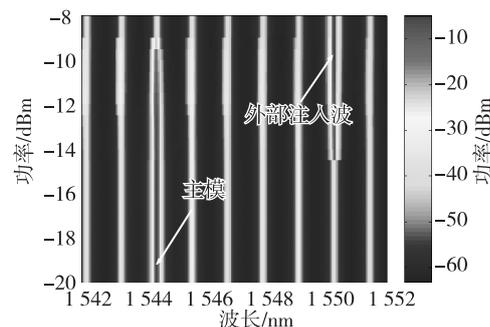


图 8 激光模随外部注入功率的演变过程

模半导体激光器的实验中所需要首先掌握和解决的关键基础问题。详细介绍了激光器的设计构造和工作原理,并对激光器的输出光谱和相应的主模波长随温度的变化以及在不同的注入功率下,锁定模功率随波长失谐的变化作了详细的实验观察和分析。在此基础上,对外部注入锁定行为这种激光器里面的关键基础问题作了详细的实验观察,并对其物理机制作了详细的讨论和分析,为学生进一步地实验操作观察提供必要的指导。在讨论单光束注入锁定行为的基础上,进一步提出了相关的延生物理问题供学生在具体的实验过程中进行探索性观察,从而为学生在探索基于新型单模半导体激光器的基础研究中提供了研究方向。

参考文献:

- [1] Kang J M, Kwon H C, Lee S H, et al. A single to multi-wavelength converter using Fabry-Perot laser diode with linear optical amplifier and its applications to the wavelength division multiplexing-passive optical network system [J]. *Opt Commun*, 2005, 254 (4/5/6): 223-235.
- [2] Zhang M J, Liu T G, Li P, et al. Generation of broadband chaotic laser using dual-wavelength optically injected Fabry-Perot laser diode with optical feedback[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 23(24): 1872-1874.
- [3] Fang X H, Chen J H, Wang D N, et al. Continuous and widely wavelength-tunable optical short pulse generation by use of a self-seeded Fabry-Perot laser diode[J]. *Chin Phys Lett*, 2005, 22(8): 1920-1922.
- [4] Chen H C, Fan S H, Chen B, et al. Efficient optical millimeter-wave generation using a frequency-tripling Fabry-Perot laser with sideband injection and synchronization[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 23(18): 1325-1327.
- [5] Jeong Y D, Won Y H, Choi S O, et al. Tunable single-mode Fabry-Perot laser diode using a built-in external cavity and its modulation characteristics[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(17): 2586-2588.
- [6] Rakib-Uddin M, Won Y H. All-optical wavelength conversion by the modulation of self-locking state of a single-mode FP-LD[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2010, 22(5): 290-292.
- [7] Nakarmi B, Rakib-Uddin M, Hoai T Q, et al. Demonstration of all-optical NAND gate using single mode Fabry-Perot laser diode[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 23(4): 236-238.
- [8] Le Hoang N, Cho J S, Won Y H, et al. All-optical flip-flop with high on-off contrast ratio using two injection-locked single-mode Fabry-Perot laser diodes[J]. *Opt Express*, 2007, 15(8): 5166-5171.

Discussion of Key Fundamental Topic in Experimental Teaching Based on a Novel Single-mode Semiconductor Laser

WU Jian-wei^{1, 2}

- (1. Chongqing Key Laboratory of Optoelectronic Functional Material, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China;
2. Department of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-714, Rep. of Korea)

Abstract: Semiconductor laser technology is a special core curriculum of optics and optical engineering in our university. Based on the theoretical fundamental knowledge, experimental research is a very key link. However, in the research and exploitation of semiconductor laser, single-mode Fabry-Perot semiconductor laser with a novel structure has been developed in recent years. Firstly, basic structure and working principle of this novel single-mode semiconductor laser is introduced. Because of strong mode competition, single mode laser spectrum with high side-mode suppression ratio (SMSR) is easily achieved based on the multi-mode laser using a built-in feedback external cavity, which is shifted with change of operation temperature. And then, injection locking behavior as a key physical mechanism that is referred for students in experiment is analyzed and discussed in detail in this paper. Both injection power and wavelength detuning are two important parameters to cause the injection locking. As the wavelength detuning is increased, the required threshold power for injection locking is also enhanced. The wavelength detuning range for injection locking is extended in the case of high injection power.

Key words: Semiconductor laser technology; single-mode semiconductor laser; structure and principle; injection locking

(责任编辑 欧红叶)