

自由运转半导体激光器边模间的强度关联*

张玉驰 王晓勇 李刚 王军民 张天才†

(山西大学光电研究所,量子光学与光量子器件国家重点实验室,太原 030006)

(2006年3月9日收到,2006年12月8日收到修改稿)

半导体激光器的强度和相位起伏一直是影响其应用的关键所在.在实验上研究了自由运转模式下半导体激光器的强度噪声.采用自制的分辨率为 0.01 nm 的光谱仪成功地分辨出数十个边模,并利用射频低噪声光电探测器系统,分析了激光器的主模与边模之间以及各边模之间的强度噪声关联特性.从实验上证实了主模与边模之间的负关联效应,同时观察到边模之间存在的周期性负关联.该结果对进一步认识半导体激光器噪声的产生机制及强度压缩光的产生机制具有重要意义.

关键词:半导体激光器,强度噪声,负关联

PACC: 4255P, 4262, 0765

1. 引言

半导体激光器(激光二极管,简称 LD)因其小型化、高效率、长寿命等特点,已经在许多领域获得了广泛的应用.特别是在现代通信、测量和基础科学研究方面^[1-3]发挥了重要的作用.然而,LD 较大的输出线宽以及强度和相位起伏一直是限制其应用的关键所在.长期以来人们一直致力于 LD 噪声问题,特别是强度量子起伏的研究. Yamamoto^[3]较早分析了 LD 噪声产生的机制,并利用远低于电子学散粒噪声极限(shot noise limit)的恒流源抽运 LD,获得 8.6 dB 的强度压缩输出^[4,5].随后人们采用各种线窄技术(line-narrowing techniques)^[6-9]抑制 LD 的强度噪声,如注入锁定(injection locking)^[6,8]、光栅反馈(feedback from external grating)^[7,8]、法布里-珀罗腔反馈^[9]、平面镜反馈^[10]等,都获得了不同程度的强度压缩和相位噪声的抑制.进一步的研究表明,LD 输出光场强度噪声的抑制主要是通过压缩边模,进而抑制模式分配噪声(mode partition noise)最终达到降低 LD 的总强度噪声.1995 年,Marin 等^[11]就边模与主模的负关联对噪声的影响进行了深入研究,指出只有在光栅反馈的情况下,模间关联的作用才可以忽略,这时的

LD 才可以看成是工作在单模振幅压缩状态,否则只能认为噪声的压缩是多模负关联所致,是一种“多模”光场总体上表现出的亚泊松统计特性.1998 年,Becher 等^[12]扩展了文献[11]的模型,引入了非对称的非线性饱和增益(asymmetrical nonlinear saturable gain)项,成功地解释了边模强度噪声谱不对称以及主模与边模关联不对称的现象.

尽管人们已经开展了很多研究,但对于 LD 在不同条件下的噪声特性仍然缺乏完整清晰的理解.到目前为止,对于 LD 强度噪声的研究主要集中在主模与边模强度噪声的关联上,采用的理论模型只考虑了主模与正负一级边模之间的强度起伏关联,而边模间的关联特性及边模噪声分布特性对于 LD 的总强度噪声的影响却很少研究,这对于全面了解 LD 的强度噪声特性又是不可缺少的.为研究 LD 本身固有的强度噪声特性,我们在实验上以自由运转模式下的量子阱 LD 作为研究对象,采用自制的分辨率为 0.01 nm 的光谱仪将微弱的数十个 LD 的输出纵模分开,通过灵敏的射频量子噪声探测装置系统地测量了主模与边模以及边模之间的噪声关联特性.研究发现,LD 输出光场的纵模功率分布特性和关联特性较文献[8,12]报道的不同:边模功率不是随着模式数的增大而单调递减,而是呈现有规律的

* 国家自然科学基金(批准号:10434080,60578018)教育部科技创新工程重大项目培育基金(批准号:705010)教育部长江学者计划、教育部创新团队发展计划(批准号:JRT0516)国家重点基础研究发展规划(批准号:2006CB921102)和山西省科研基金资助的课题.

† E-mail:tczhang@sxu.edu.cn

波浪状起伏,对于那些运转于阈值附近的弱激发边模而言,同一“波浪”覆盖的边模的强度起伏呈现明显的负关联特性,而不同“波浪”所覆盖的边模之间的强度起伏则未观察到明显的负关联特性。

2. 实验装置

实验装置如图 1 所示.实验中使用的 LD 型号为 SDL-5412,其工作温度控制在 $(16 \pm 0.001)^\circ\text{C}$,由一台自制的噪声起伏远低于散粒噪声的恒流源驱动.该激光器在上述温度下的阈值电流为 25 mA,工作波长在 842 nm 左右.LD 的出射光经过镀有增透膜的准直透镜后成为长短轴比约为 4:1 的椭圆光束,经过整形棱镜对后成为一直径约为 1 mm 的近圆形光束.为了避免来自后面的光学元器件的弱小反馈对 LD 的稳定性及噪声特性影响,我们使用了两级光学隔离器(总隔离度大于 60 dB).值得一提的是,隔离器在这里还可以起到排除因正交偏振分量引起的虚假干涉效应^[13]的作用.图 1 中虚线包围的部分即为自制的光谱仪.为了提高光谱仪的分辨能力,通过隔离器输出的光被扩束到直径约为 25 mm.光栅的刻划密度为 1800/mm,其一级衍射效率为 85%,有效面积为 50 mm × 50 mm,置于近 Littrow 结构以保证最大的角分辨能力.在入射光束直径为 25 mm 的情况下,光栅的分辨能力为 0.01 nm,足以分离波长间距约为 0.12 nm 的 LD 的各个纵模.经过光栅后的光束由凹面反射镜 CM 会聚在焦平面上.狭缝 S 置于凹面镜 CM 的焦平面处,用于选择入射到低噪声探测器(Hamamatsu-C5331-03)的测量模式.狭缝 S 前面放置的孔径为 55 mm 的透镜 L 的作用则是将通过狭缝的各个纵模聚集到探测器的探头上.探测器输出的噪声信号由美国 Agilent 公司生产的 4396B 型频谱分析仪进行记录分析.

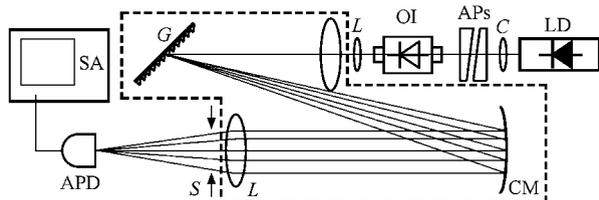


图 1 实验装置示意图 C 为准直透镜,APs 为整形棱镜对,OI 为光学隔离器,L 为透镜,S 为狭缝,G 为衍射光栅,CM 为凹面镜,APD 为雪崩光电探测器 SA 为频谱分析仪

3. 实验结果及分析

在工作电流为 100 mA 时,我们记录了 LD 典型的纵模功率分布,如图 2 所示.图 2(a)是利用电荷耦合器件(CCD)摄像头拍摄的凹面反射镜 CM 焦平面处到 LD 的主模与边模分布.将置于焦平面处的狭缝宽度打开至边模间距的 1/3,并沿水平方向扫描,即得到各纵模的功率分布情况,如图 2(b)所示.从图 2(b)可以看出,在自由运转条件下 LD 的边模功率通常小于主模式功率 25—40 dB.在紧靠主模处由于光的漫射比较强烈,使得靠近主模的边模功率的测量有些偏大.从各纵模功率分布曲线可以明显看出,边模的功率分布存在周期性的波浪状起伏.每个“波浪”覆盖约 8 个纵模.实验表明,该周期性特点来自激光器本身,与外部光学器件无关,并且在不同的工作温度和抽运强度下均存在.该特点与以前报道的结果^[8,12]不同,也正是这一特点给半导体激光的纵模强度关联特性带来了新的性质.我们在此基础上研究了主模与边模的强度噪声关联特性以及边模间的强度噪声关联特性.

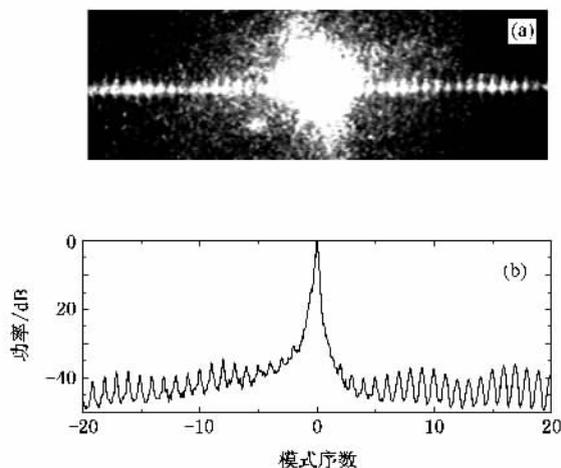


图 2 凹面镜焦平面上的纵模功率分布 (a)为 CCD 拍摄的图像 (b)为扫描狭缝得到的模式功率分布,主模功率为 0 dB,横坐标为相对于主模(坐标为 0)的模式序号,正方向为波长增大的方向

以主模为中心向两侧对称打开狭缝,测量主模与边模的强度噪声关联特性,测量频率为 30 MHz.图 3 给出的是不同抽运强度下噪声功率随模式序数的变化(为方便比较,测量的噪声功率被归一化到 1 μW 光功率对应的电子学噪声功率),两条曲线分别为阈值附近(25 mA)和高抽运强度(100 mA)时强度

噪声随模式数变化的情况.从图 3 可以明显看出,随着入射到探测器模式数量的增加,噪声功率总体上都是减小的,这表明主模与边模之间存在负关联.比较两条曲线可以看到,工作在阈值附近 LD 输出光场的噪声功率随边模数的增大而降低的幅度要大得多,这说明阈值附近的负关联明显高于高抽运强度时的负关联.在阈值附近,主模刚被激发起来,光场不足以使半导体的增益介质局部饱和,不会产生由于非线性吸收饱和导致的主模与边模的损耗不均匀,即整个工作介质(包括增益介质和包层)对于各个纵模是比较均匀的(这种均匀性来源于不同的纵模共用相同的、增益谱宽相对于纵模间距大得多的增益介质),于是模间呈现较强的负关联.而在高抽运强度时,主模的强光场使得模式自饱和与模间饱和出现,导致增益介质的均匀性遭到破坏,加之此时包层介质对于主模的吸收进入饱和区而对于边模的吸收未饱和导致的边模损耗相对增大^[14],从而使得主模与边模间的负关联效应弱化.如图 3 中的内插图所示,在高抽运强度时,负关联现象依然存在于主模和各边模之间,但只有邻近的两级边模呈现出与主模间较为明显的负关联性质.从图 3 还可以看到,阈值附近的噪声功率随边模数变化的曲线并不是单调下降,而是被一类周期起伏所调制,与图 2 中的起伏类似.

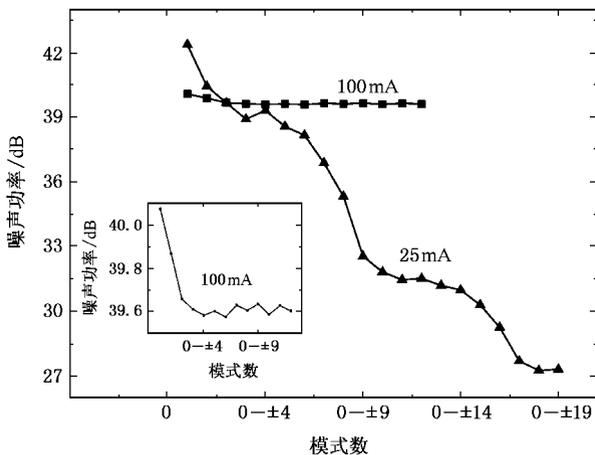


图 3 狭缝以主模为中心向两侧对称打开时,归一化的 LD 强度噪声功率随模式数的变化.散粒噪声基准对应 0 dB.内插图为 100 mA 时的强度噪声功率分布曲线的局部放大

为了进一步研究边模的噪声,我们在不同的抽运强度下测量了 LD 各纵模的噪声功率分布特性,皆呈现相同的规律.为简单起见,我们只给出了抽运电流为 130 mA 时的结果,如图 4 所示.从图 4 可以

看出,LD 各纵模上的噪声功率的起伏与功率的起伏步调一致.这预示着各纵模间存在周期性的局部负关联.即以各个“波峰”对应的功率最大值的边模为中心向两侧对称打开狭缝应该得到与以主模为中心对称展开狭缝一样的负关联特性.为了证实这一点,我们分别选取了正负边模中的若干个功率极大值处为中心,对称展开狭缝至该边模所对应的“波浪”边缘,记录噪声功率与模式数的关系.图 5(a)(b),(c)分别对应的是以 +8 级边模, -8 级边模和 -18 级边模为中心对称展开狭缝得到的噪声功率随测量模式数的变化特性,可以看到边模之间存在明显的负关联.图 5(b)中的噪声功率略微升高很可能是由于测量误差所致.而当以“波谷”对应的边模为中心展开狭缝时,实验上没能观测到噪声功率的降低,这说明不同的“波浪”覆盖的边模之间的负关联效应很弱甚至没有.

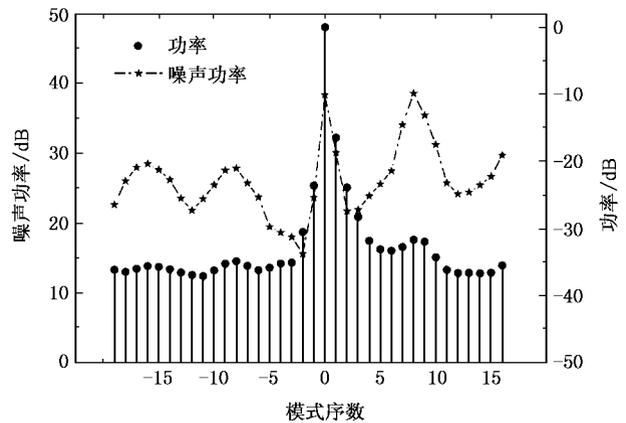


图 4 LD 各纵模的功率与噪声功率随模式数的变化.主模功率取为 0 dB,散粒噪声基准取为 0 dB,LD 的抽运电流为 130 mA

对于该周期关联特性,可以这样理解:LD 各纵模的强度起伏反映了激光器的工作介质的增益特性,而此增益特性又决定着模式间的强度噪声关联特性.未被抑制的或者抑制较小的增益导致更强的负关联特性.不同抽运强度下的模间关联特性从图 3 可以看出,由于阈值附近 LD 的边模增益相对于高抽运情况被抑制的程度要小得多,所以主模与边模之间的负关联在阈值附近要强于高抽运时的情况.即使相同抽运强度下的模间关联特性也具有如下两个特点:对于相同数量的边模而言,主模与长波长的边模的噪声功率要比其与短波长的边模的噪声功率低^[12].这是因为前者的负关联要强于后者,而这种不对称的关联则是源于主模式对短波长方向的增益

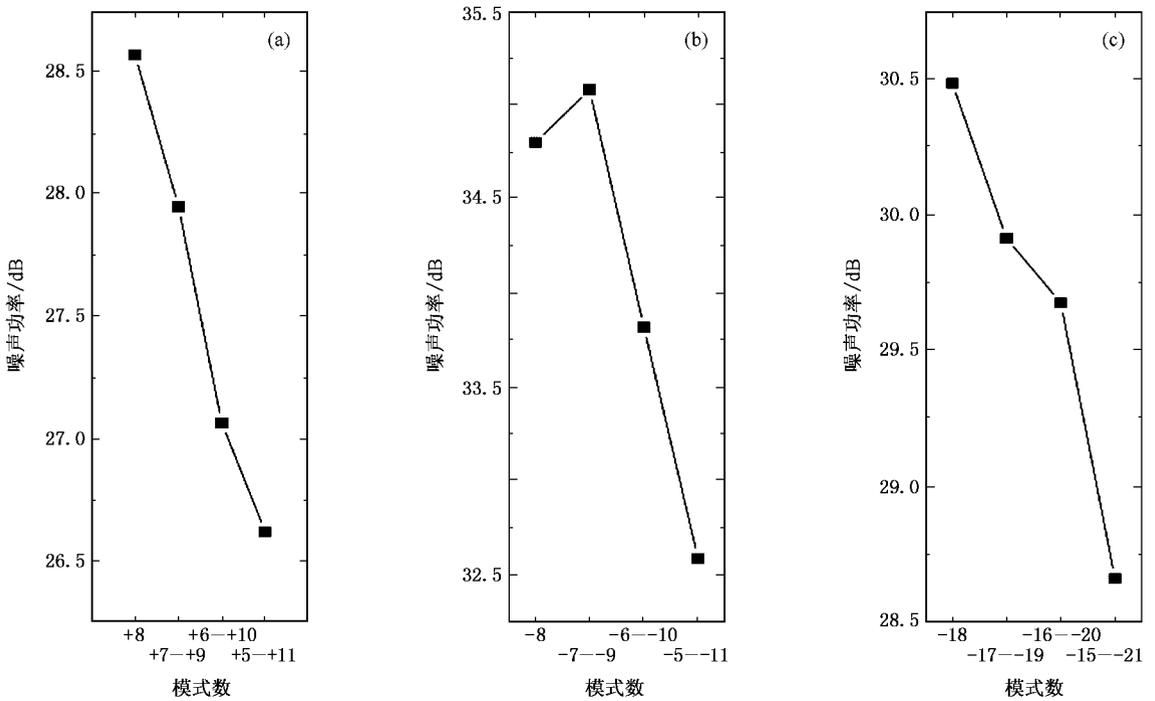


图5 以+8级、-8级、-18级边模为中心对称展开狭缝时,强度噪声功率随模式数的变化。散粒噪声基准对应0 dB。(a)+8级边模 (b)-8级边模 (c)-18级边模

抑制强于对于长波长方向的增益抑制,纵模之间存在明显的周期性负关联,即每一个增益峰值对应的纵模与其邻近的被同一“波浪”所覆盖的纵模间都有明显的负关联现象,这是由于输出增益的周期性变化使得“波峰”处的纵模增益相对于“波谷”处的纵模增益被抑制的程度小得多,因而呈现较强的周期性负关联。不难理解,位于增益峰值处的纵模在改变工作条件时会通过模式竞争成为主模式。实验上,这一

点可以从主模波长随电流的变化特性得到印证,如图6所示。从图6可以看出:增大抽运电流时,波长在平稳线性上升一段后会出现台阶状的跳跃,右边显示的是相应的纵模数的变化。每次跳跃的间隔与功率起伏的模式间隔一致。减小抽运电流时,可以看到显著的回滞现象^[15],然而跳跃间隔依然是功率起伏的模式间距的整数倍。到目前为止,我们尚不清楚造成此增益起伏的物理机制,问题的根源可能需要对量子阱LD的内部结构进行细致的分析才能找到。

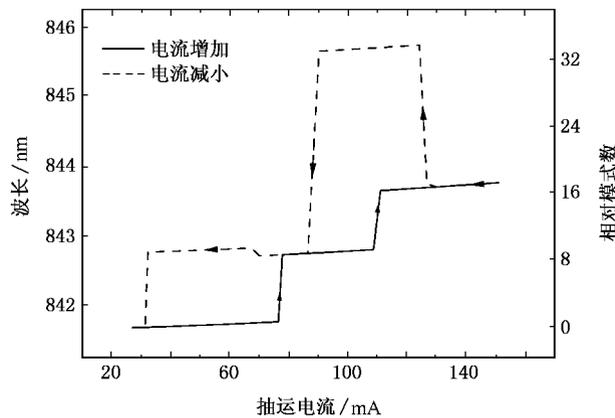


图6 LD的主模波长随抽运电流的变化。LD工作温度为16℃,阈值电流为25 mA。右侧坐标为相对于阈值时LD主模式的纵模数

4. 结 论

本文在实验上对常温下自由运转的LD的纵模噪声特性进行了系统的研究。实验发现了LD纵模强度以及其相应噪声的一些与以往不同的特点,即纵模间的强度和噪声功率存在周期性起伏。同时通过自制的高分辨光栅干涉装置,观察到纵模间存在的周期性局部负关联效应,并对这一现象的内在物理过程进行了初步探讨。这些新的特点对进一步完善目前的LD噪声的理论模型,提高人们对LD噪声特性的认识具有积极的意义。

- [1] Wieman C E , Hollberg L 1991 *Rev. Sci. Instrum.* **62** 1
 [2] Wang Y H , Yang H J , Zhang T C *et al* 2005 *Chin. Phys.* **14** 1120
 [3] Yamamoto Y 1994 *Science* **263** 1394
 [4] Richardson W H , Machida S , Yamamoto Y 1991 *Phys. Rev. Lett.* **66** 2867
 [5] Richardson W H , Yamamoto Y 1991 *Phys. Rev. Lett.* **66** 1963
 [6] Wang H , Freeman M , Steel D 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 3951
 [7] Freeman M J , Wang H , Steel D G *et al* 1993 *Opt. Lett.* **18** 2141
 [8] Zhang T C , Poizat J P , Grellu P *et al* 1995 *Quantum Semiclassic. Opt.* **7** 601
 [9] Zhang T C , Li T Y , Effenterre D *et al* 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 1498 (in Chinese) [张天才、李廷鱼、Effenterre D 等 1998 物理学报 **47** 1498]
 [10] Zhang T C , Hou Z J , Wang J M *et al* 1996 *Chin. Phys. Lett.* **13** 734
 [11] Marin F , Bramati A , Giacobino E *et al* 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 4606
 [12] Becher C , Gehrig E , Boller K J 1998 *Phys. Rev. A* **57** 3952
 [13] Freeman M J , Wang H , Steel D G *et al* 1993 *Opt. Lett.* **18** 379
 [14] Lathi S , Yamamoto Y 1999 *Phys. Rev. A* **59** 819
 [15] Lathi S , Tanaka K , Morita T *et al* 1999 *IEEE J. Quantum Electron.* **35** 387

Inter-mode intensity correlations in a free-running diode laser^{*}

Zhang Yu-Chi Wang Xiao-Yong Li Gang Wang Jun-Min Zhang Tian-Cai[†]
 (State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices , Institute of Opto-electronics ,
 Shanxi University , Taiyuan 030006 , China)

(Received 9 March 2006 ; revised manuscript received 8 December 2006)

Abstract

Intensity fluctuation and phase noise are key factors limiting the applications of the diode lasers in many fields. The intensity noise of a free-running diode laser was investigated experimentally. Tens of longitudinal modes from the diode laser were successfully separated and identified by a self-made monochromator with 0.01 nm resolution. The noise of either the individual mode or the jointed modes of main mode and the sideband modes was detected using a low-noise radio frequency photodetector. The properties of the intensity noise between either the main mode and the side modes , or the side modes themselves were investigated systematically. The anticorrelation between main mode and side modes was confirmed , and the periodical anticorrelations between small longitudinal modes were found. These results can help us to understand the mechanism of the intensity noise of the diode lasers as well as the noise suppression for intensity-squeezed light generation.

Keywords : diode laser , intensity noise , anticorrelation

PACC : 4255P , 4262 , 0765

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10434080 , 60578018) , the Cultivation Foundation of the Major Program of the Scientific and Technical Innovation of Ministry of Education , China (Grant No. 705010) , the Cheung Kong Scholars Program from Ministry of Education , the Innovative Research Team Program in University of Ministry of Education , China (Grant No. IRT0516) , the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2006CB921102) and the Scientific Research Foundation of Shanxi Province , China.

[†] E-mail : tczhang@sxu.edu.cn