光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022011705

DFB 半导体激光器自注入锁定失稳因素分析

胡康永，宋伟宁，朱旭阳，孔　梅*

（长春理工大学 物理学院，长春 130022）

摘　要： 分布反馈(Distributed Feedback,DFB)半导体激光器具有体积小、成本低和工艺成熟等优势,但兆赫兹量级的线宽使其应用范围受限。采用环形谐振器对其进行自注入锁定,可将线宽压窄到千赫兹量级,但仍存在锁定不稳定的问题。文章采用四只不同的环形谐振器对 DFB 半导体激光器进行自注入锁定,通过实验监测自注入锁定时多个端口的光功率、偏振态和光波长的变化,揭示影响 DFB 半导体激光器自注入锁定稳定性的因素有谐振模式跳变、偏振态跳变,以及外界温度和振动引起的锁定环路的相位变化,且使用不同类型的环形谐振器进行锁定时,主导的影响因素不同。控制这些影响因素可以改善 DFB 半导体激光器自注入锁定的稳定性,使 DFB 半导体激光器自注入锁定技术有更好的应用效果。

关键词： DFB 半导体激光器；自注入锁定；锁定稳定性

中图分类号： TN248.4　**文章编号：** 1001－5868(2022)03－0552－05

Analysis of Instability Factors of Self-injection Locking of DFB Semiconductor Laser

HU Kangyong, SONG Weining, ZHU Xuyang, KONG Mei

(School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, CHN)

Abstract: Distributed feedback (DFB) semiconductor lasers have the advantages of small size, low cost and mature manufacturing technology. However, their application scope is limited due to the MHz linewidth. The linewidth can be narrowed to the order of kHz by self-injection locking with ring resonators, but there exists instability as the laser being locked. We self-injection lock a DFB semiconductor laser to four different ring resonators and monitor the changes of optical power, polarization state and wavelength at multiple ports of the locking circuit. It is revealed that the factors affecting the locking stability of DFB semiconductor laser include resonant mode hopping, polarization state hopping, and phase change of the feedback locking loop caused by external temperature and vibration, and the dominant factors are different when different types of ring resonators are used. Control of these factors can improve the stability of the self-injection locking of DFB semiconductor lasers, so that better application effect can be achieved for the self-injection locked DFB semiconductor laser.

Key words: DFB semiconductor laser; self-injection locking; locking stability

0　引言

原子钟[1-2]、量子光学[3-5]、光频梳[6]、相干光通信[7]、激光雷达[8]等领域都要求激光器具有超窄线宽、高稳定性和低噪声。半导体激光器具有体积小、成本低的优势,分布反馈(DFB)半导体激光器可以实现单纵模输出,线宽一般在兆赫兹量级,然而其线宽和稳定性仍难以达到上述应用的要求,因此进一步压窄 DFB 半导体激光器的线宽并提高其稳定性有重要意义。

自注入锁定是 DFB 半导体激光器线宽压窄的重要技术手段。自注入锁定是指光通过外腔谐振器

收稿日期：2022－01－17.

* 通信作者：孔　梅　E-mail：kongmei@cust.edu.cn

后，部分反馈回激光器内腔，实现激光器频率锁定。自注入锁定的反馈光来自激光器本身，不需要额外的光源，这不仅能降低锁定成本，而且能够简化锁定结构，便于集成。环形谐振腔是 DFB 半导体激光器自注入锁定的常用外腔，目前基于各种环形腔可将 DFB 半导体激光器的线宽压窄到千赫兹甚至几赫兹的量级[9]，并已应用于光学频率梳产生[10]、耗散克尔光孤子生成[11]、光谱纯度提高[12]和光纤振动传感[13]等方面。然而，自注入锁定 DFB 半导体激光器存在失锁及功率和频率跳变不稳定等问题。以往一般认为自注入锁定的不稳定来源于跳模现象，即由于各种因素引起的激光频率波动或外腔谐振频率漂移等导致激光频率从外腔的一个谐振峰锁定到另一个谐振峰[14]。Escobedo 等发现注入光偏振态的变化也能引起自注入锁定的失稳[15]。实际上，用不同类型和长度的环形谐振器对激光器进行自注入锁定时，锁定的稳定性显著不同[13-14]，目前，对不同环形谐振器锁定时影响锁定稳定性的因素还缺乏系统的研究。

本文采用四种不同的环形谐振器对 DFB 半导体激光器进行自注入锁定，通过对锁定过程中光功率、波长和偏振态的监测，揭示了锁定模式、偏振态、反馈相位与激光器稳定性之间的关系。本文的研究可为提高 DFB 半导体激光器自注入锁定的稳定性提供有益参考。

1　半导体激光器自注入锁定方案和实验测试方案

1.1　自注入锁定原理和锁定方案

自注入锁定的过程是使半导体激光器的输出光通过外腔的选频后，部分反馈回半导体激光器的谐振腔内。外腔的设置相当于增加了谐振腔的有效长度，提高了谐振腔的品质因子(Q)，同时反馈光注入可以使特定模式振荡，抑制其他模式，这两者同时作用可达到降低激光器线宽，提高激光器频率稳定性的目的[16]。

我们利用双总线环形谐振器对 DFB 半导体激光器进行自注入锁定，如图 1 所示，其中双总线环形谐振器由一个环形腔通过两个耦合器(C_1 和 C_2)和两个总线波导耦合构成(图中红色虚框内部分)。DFB 半导体激光器的输出光经过环行器和隔离器进入环形谐振器，隔离器的作用是隔离环形谐振器内由背向瑞利散射等产生的反射光。环形谐振器下载端(B 端口)的输出光经过环行器进入 DFB 半导体激光器中，实现激光器的自注入锁定。本实验使用的 DFB 半导体激光器为 14 针蝶形封装激光器，实验用的器件之间均采用保偏光纤连接，通过仪器观察 A 端口和 B 端口输出光各项参数来分析激光器的稳定状态和反馈注入光的特性，锁定压窄后的激光通过 C 端口输出并测量。

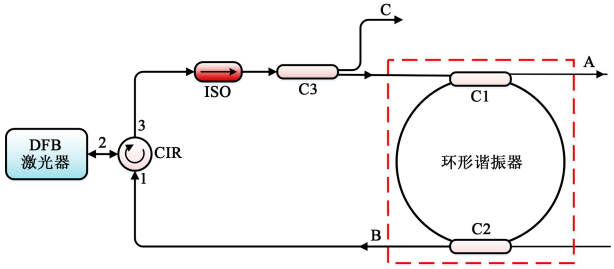


图 1　DFB 半导体激光器自注入锁定光路图。ISO：隔离器；C_1，C_2，C_3：耦合器；CIR：环行器

1.2　自注入锁定稳定性测试方案

激光器自注入锁定时的失稳首先直观地体现在 A 和 B 两端口处输出功率的跳变，因为双总线环形谐振器直通和下载端的透射率是频率的函数，当锁定频率发生跳变时，两端口处的输出功率会发生明显而突然的变化。因而，我们将 A 和 B 两端口接示波器，用于检测失稳的发生时刻。此外，B 端口输出光即为实现激光器自注入锁定的注入光，也将 B 端口的部分输出光分别接波长计(型号：AQ6150，显示分辨率为 0.1 pm)和偏振合成/分析仪(PSY-101)，监测注入光的波长和偏振态变化，以便分析自注入失稳的原因。自注入锁定后的激光线宽通过 C 端口测量。整个实验系统如图 2 所示。整个实验系统放在光学平台上以隔离振动，除反馈回路外的部

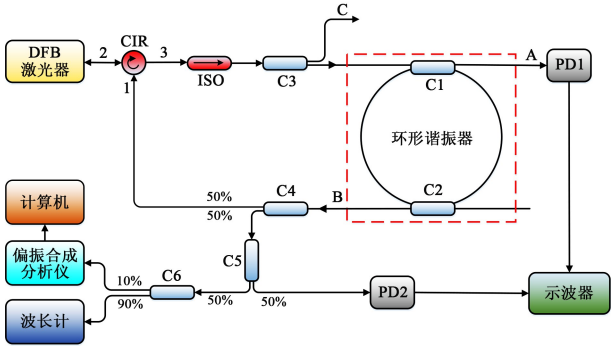


图 2　DFB 半导体自注入锁定稳定性实验光路图。ISO：隔离器；PD：光电探测器；CIR：环行器；C_i($i=1\sim6$)：耦合器

分都用海绵覆盖，从而抑制外界瞬时温度变化与空气流动的影响。实验中 DFB 半导体激光器的输出功率为 17 mW。

为了分析自注入锁定时造成失稳的主要因素，采用几种不同的环形谐振器对 DFB 半导体激光器进行自注入锁定，包括 4 m 周长非保偏光纤环和保偏光纤环各一个，以及 63 cm 非保偏光纤环和 2 cm 半径二氧化硅光波导环各一个。

2 实验结果与讨论

2.1 采用 4 m 长非保偏光纤环的自注入锁定

首先采用环长为 4 m 的非保偏光纤环形谐振器进行自注入锁定实验测试。用光电探测器和示波器监测锁定时 A 端口和 B 端口的输出光功率变化，再通过波长计和偏振合成/分析仪监测 B 端口光波长和偏振态的变化，测量结果如图 3 所示。图 3(a)和(c)中，橙色和紫色线分别表示 B 端口和 A 端口的输出光功率，绿色线为 B 端口输出光波长，各条线上的箭头指向其对应的坐标轴。黑色虚线框标示了输出光功率发生跳变的时刻。图 3(b)和(d)用邦加球显示了 B 端口输出光偏振态的变化情况。邦加球正面轨迹显示为红色，背面轨迹为蓝色。两个绿点分别对应跳变前后偏振态在邦加球上的位置，图中同时给出了这两点具体的偏振状态。

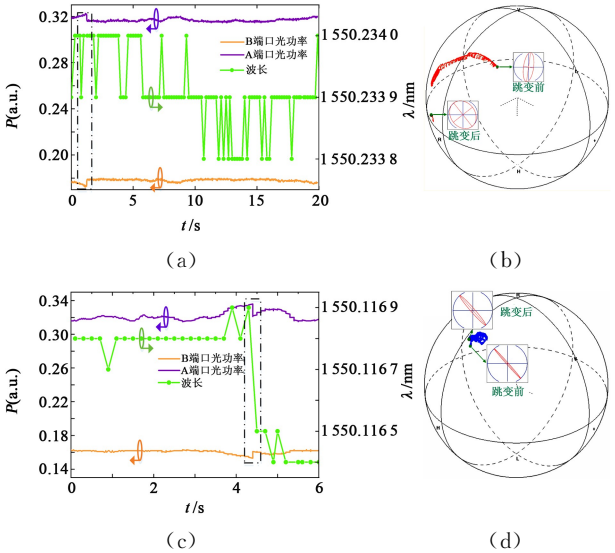


图 3 采用 4 m 长非保偏光纤环的自注入锁定实验结果。(a)，(c) A 和 B 端口光功率及 B 端口光波长随时间变化曲线；(b)，(d) 失稳前后偏振态在邦加球上的位置

图 3(a)和(b)是用 4 m 长非保偏光纤环锁定时常见的跳变情况，即当功率轨迹发生跳变时，对应的反馈波长变化很小，在 0.1～0.2 pm 范围，这种小幅度波长变化在稳定锁定时也会出现(图 3(a))。而由图 3(b)可以看到反馈光偏振状态发生比较大的跳变，由跳变前的近圆偏振变为强的椭圆偏振光。设邦加球半径为 1，跳变前后偏振态在邦加球上的直线距离为 0.876。因而可以认为，此时影响锁定失稳的主要原因为注入锁定光偏振态的跳变。

图 3(c)和(d)是用 4 m 长非保偏光纤环锁定时的另一种跳变情况，其出现几率低于偏振态跳变情况。即此时注入反馈光波长跳变了 0.4 pm，与 4 m 光纤环的自由光谱范围(0.4 pm)相当，而偏振态变化很小，在邦加球上移动的直线距离只有 0.081。这表明此时是由真正的谐振模式跳变引起的锁定失稳。

2.2 采用 63 cm 长非保偏光纤环的自注入锁定

接下采用环长为 63 cm 的非保偏光纤环进行锁定，对比不同环长时影响自注入锁定系统稳定性的原因。

观察波长与功率变化对应关系图 4(a)发现，当功率轨迹发生跳变时，波长变化为 0.2 pm，远小于 63 cm 环的自由光谱范围 2.63 pm，即此时并没有谐振模式跳变。由图 4(b)可以看到，功率跳变前后反馈注入光偏振态在邦加球上的位置发生了较大变化，跳变的直线距离为 0.261。这些表明，由于 63 cm 环的自由光谱范围很大，不会出现谐振模式跳变失稳，此时影响系统不稳定的主导因素是偏振态的跳变。

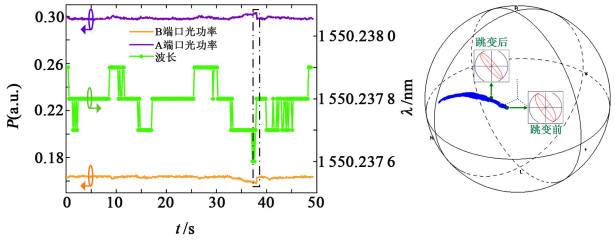


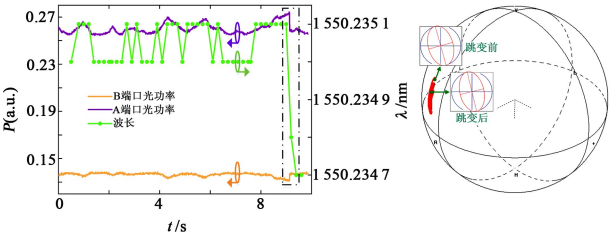
图 4 采用 63 cm 长非保偏光纤环的自注入锁定实验结果。(a) A 和 B 端口光功率及 B 端口光波长随时间变化曲线；(b) 失稳前后偏振态在邦加球上的位置

实验中还可以看到，4 m 非保偏光纤环的无跳变稳定时间平均为几十秒，而 63 cm 非保偏光纤环的稳定时间为几分钟。其原因也主要在于 63 cm 环的自由光谱范围大，避免了由于谐振模式跳变引起的失稳。此外，环越短越不易受外界环境干扰，也有利于锁定状态的稳定。

2.3　采用 4 m 长保偏光纤环的自注入锁定

进一步地，使用 4 m 长保偏光纤环进行自注入锁定，研究反馈注入光的偏振态受到限制时系统稳定性的影响因素。

实验表明，在用保偏光纤环进行锁定的情况下，自注入锁定系统仍存在失稳现象。如图 5(a)显示，当 A 和 B 端口光功率发生跳变时，反馈注入光的波长变化非常明显，波长计显示波长有 0.4 pm 的跳变，即发生了谐振模式跳变。图 5(b)显示，功率发生跳变时，偏振态变化幅度较小，偏振位置变化为 0.103。可见，用 4 m 长保偏环进行自注入锁定时，锁定失稳主要是由注入光从环形谐振器的一个谐振模式跳变到另一个谐振模式引起的。



(a)　　(b)

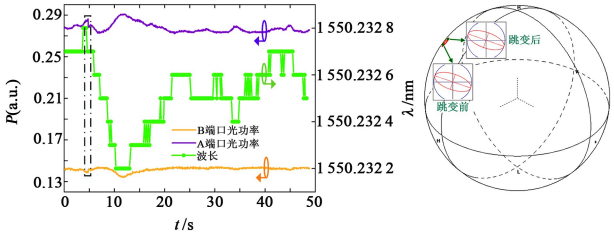
图 5　采用 4 m 长保偏光纤环的自注入锁定实验结果。(a)A 和 B 端口光功率及 B 端口光波长随时间变化曲线；(b) 失稳前后偏振态在邦加球上的位置

2.4　采用 2 cm 半径光波导环的自注入锁定

最后使用光波导环形谐振器进行自注入锁定，对比光纤环和光波导环自注入锁定的稳定性。光波导环形谐振器具有半径小、模式限制强和包装封闭受外界干扰小等优点。我们采用的二氧化硅光波导环形谐振器也是双总线结构，半径为 2 cm，对应的自由光谱范围是 13.2 pm。

由于光波导环自由光谱范围和谐振带宽大，所以在锁定过程中即使光波长有缓慢变化，也不会超出某个谐振模式的带宽，不会出现谐振模式跳变。另外，光波导环的隔离性好，不容易出现偏振态波动。这两点使得其锁定时间长，不容易发生失稳。

图 6 显示当输出光功率发生跳变时，反馈注入光的波长和偏振态都无明显变化，其中波长变化为 0.1 pm，偏振态位置移动距离为 0.055。因而，这时锁定不稳定的原因既不是谐振模式跳变，也不是偏振态跳变，而是由外界一些影响因素使得反馈注入光的相位发生变化引起的。理论分析也表明反馈光相位的跳变能引起锁定失稳[17]。造成反馈相位不稳定的外界因素主要是温度和空气流动。本实验系统反馈回路较长，从图 2 中 C_2 耦合器算起，到 DFB 激光器端面，总共约 5 m，实验中反馈回路无法很好屏蔽，所以反馈光相位不可避免地会受到外界扰动的影响。



(a)　　(b)

图 6　采用 2 cm 半径波导环的自注入锁定实验结果。(a)A 和 B 端口光功率及 B 端口光波长随时间变化曲线；(b)失稳前后偏振态在邦加球上的位置

2.5　对比和总结

将以上实验结果和分析总结为表 1。可见，波导环长对线宽压窄的影响不大，但对锁定稳定时间有明显影响，环越短，锁定时间越长。这与环长与自由光谱范围和谐振带宽的关系密切相关。对于非保偏长环，影响锁定稳定性的因素主要是反馈注入光偏振态跳变和谐振模式跳变。对于非保偏短环，引起失稳的因素主要是偏振态的跳变。对于保偏长环，失稳的主要原因是谐振模式跳变；对于光波导环，由于谐振模式跳变和偏振态跳变都不易发生，引起失稳的原因主要是外界扰动引起的反馈光相位变化。

表 1　不同类型环形谐振器锁定效果和失稳原因

环形谐振器	自由光谱范围/pm	压窄后线宽/kHz	平均稳定时间	失稳主要原因
4 m 长非保偏光纤环	0.4	10	100 s	偏振态跳变、谐振模式跳变
63 cm 长非保偏光纤环	2.6	15	200 s	偏振态跳变
4 m 长保偏光纤环	0.4	10	45 s	谐振模式跳变
2 cm 半径光波导环	13.2	20	30 min	相位跳变

3 结论

DFB半导体激光器自注入锁定的不稳定影响因素有反馈光偏振态、反馈光波长和相位等，这些条件的变化都会影响自注入锁定系统的稳定性。采用不同类型的谐振器时，引起锁定失稳的主导因素不同。我们通过实验测试和对比分析得出了用不同环形谐振器对DFB半导体激光器进行自注入锁定时，影响系统不稳定的主要因素，为改善DFB半导体激光器自注入锁定的稳定性打下了基础。外界环境是导致自注入系统不稳定的一个不可忽略的因素，它一方面会通过引起反馈光的相位变化引起锁定失稳，另一方面也会通过引起谐振模式跳变以及谐振波长和谐振光偏振态变化引起锁定跳变。因而，在自注入锁定系统中尽量隔离外界影响是非常必要的。此外，减小环的尺寸对降低外界因素干扰和提高锁定效果非常有益。可以预期，采用片上集成方案，将谐振器与DFB半导体激光器集成封装在一个密闭模块内，能显著提高系统的稳定性，因而，这样的锁定方案是获得稳定的小型窄线宽DFB半导体激光器的有效途径。采用光纤环锁定则具有成本低、简单方便的优势。实际应用中可视需要选定不同的锁定方案，并对影响锁定稳定的主要因素进行有效控制。

参考文献：

[1] Bloom B J, Nicholson T L, Williams J R, et al. An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level[J]. Nature, 2014, 506(7486): 71-75.

[2] Pedrozo-Peafiel E, Colombo S, Shu C, et al. Entanglement on an optical atomic-clock transition[J]. Nature, 2020, 588(7838): 414-418.

[3] Prtljaga N, Bentham C, O'Hara J, et al. On-chip interference of single photons from an embedded quantum dot and an external laser[J]. Appl. Phys. Lett., 2016, 108(25): 251101.

[4] Yang L, Zhang Y, Yan X B, et al. Dynamically induced two-color nonreciprocity in a tripod system of a moving atomic lattice[J]. Phys. Rev. A, 2015, 92(5): 053859.

[5] Liu Y, Bing H, Wu J H, et al. Interacting photon pulses in Rydberg medium[J]. Optica, 2016, 3(10): 1095.

[6] 张新亮，赵延菁. 微腔光频梳研究进展[J]. 光学学报，2021，41(8)：17.
Zhang Xinliang, Zhao Yanjing. Research progress of microcavity optical frequency comb[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 17.

[7] Numata K, Camp J, Krainak M A, et al. Performance of planar-waveguide external cavity laser for precision measurements[J]. Opt. Express, 2010, 18(22): 22781.

[8] Kim I, Martins R J, Jang J, et al. Nanophotonics for light detection and ranging technology[J]. Nature Nanotechnology, 2021, 16: 508-524.

[9] 刘云凤，梁 伟. 自注入锁定外腔超窄线宽半导体激光[J]. 中国激光，2021，48(17)：198-201.
Liu Yunfeng, Liang Wei. Self-injection locked outer cavity ultra-narrow linewidth semiconductor laser[J]. Chinese J. of Lasers, 2021, 48(17): 198-201.

[10] Voloshin A S, Kondratiev N M, Lihache V G V, et al. Dynamics of soliton self-injection locking in optical microresonators[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 235.

[11] Herr T, Brasch V, Jost J, et al. Temporal solitons in optical microresonators[J]. Nature Photonics, 2014(8): 145-152.

[12] Lim J, Savchenkov A A, Matsko A B, et al. Microresonator-stabilized extended cavity diode laser for supercavity frequency stabilization[J]. Opt. Lett., 2017, 42(7): 1249.

[13] Zhu X, Li X, Zhang R, et al. Using DFB laser self-injection locked to an optical waveguide ring resonator as a light source of Φ-OTDR[J]. Appl. Opt., 2021, 60(31): 9769-9773.

[14] Wang C, Zhang R, Zhao Z, et al. Comparison of self-injection locking of DFB-LD by optical fiber and optical waveguide ring resonators[J]. Fiber and Integrated Optics, 2019, 38(6): 323-332.

[15] Escobedo J B, Spirin V V, López-Mercado C A, et al. Self-injection locking of the DFB laser through an external ring fiber cavity: Polarization behavior[J]. Results in Physics, 2016, 6: 59-60.

[16] Lachambre J L, Lavigne P, Otis G, et al. Injection locking and mode selection in TEA-CO_2 laser oscillators[J]. IEEE J. of Quantum Electronics, 1976, 12(12): 756-764.

[17] Voloshin A S, Kondratiev N M, Lihache V G V, et al. Dynamics of soliton self-injection locking in optical microresonators[J]. Nature Commun., 2021, 12(1): 235.

作者简介：

胡康永(1997—)，男，硕士研究生，目前主要研究方向为半导体激光器的自注入锁定特性及其应用；

孔 梅(1967—)，女，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为导波光学器件物理和应用、光学传感技术等。