

第1章 绪论

1.1 单纵模光纤激光器概述

光纤激光器是目前的研究热点之一,在光通信、激光加工、生物医学和国防军工等领域得到了广泛应用^[1-3]。光纤激光器与传统的固体、气体激光器相比具有许多优越性,例如体积小,重量轻,光束质量好,阈值低,增益高,抗电磁干扰,散热好,免维护,宽调谐等^[4-6]。光纤激光器种类繁多,按其增益介质可分为:晶体光纤激光器、稀土掺杂光纤激光器、非线性光学形光纤激光器和塑料光纤激光器;按其应用可分为:高功率光纤激光器、拉曼放大光纤激光器、超连续谱光纤激光器和单频光纤激光器^[7]。其中单频光纤激光器除了具有上述光纤激光器的优点之外还具有超窄线宽以及低噪声等特点,被应用于高速光通信、远距离传感、相干检测、高精度光谱等领域^[8-10],尤其是波长可调谐的单纵模光纤激光器能极大提升光网络运行效率的和抗干扰性能,近年来引起人们的广泛关注。

单频光纤激光器的波长选取和调谐是通过可调谐窄带滤波器件,如 F-P 标准具、可调滤波器或光纤 Bragg 光栅 (FBG) 等实现的^[11]。这些滤波器件可以限制增益谱内可以起振的纵模数量,如只让满足特定条件的少数几个纵模形成激光振荡时就成为窄线宽激光器,只允许一个纵模振荡就成为单频 (single-frequency) 激光器,输出光线宽极窄具有极高的相干性,因此具有很高的实用价值^[12]。所以单纵模光纤激光器 (single mode fiber laser) 成为光纤激光器研究领域的一个热点。

光纤通信中密集波分复用系统中要达到密集的复用波长需要多波长窄线宽光源,而单频光纤激光器能提供最好的保证,同时在相干光通信系统中可以采用更多的信号调制方式,如频率调制、相位调制等^[13]。光纤传感系统使用单频光相干探测,可以大幅度提高探测灵敏度,通过对极微小变化量的探测与分析,就能实现远程高精度的定位测量。单频光纤激光器在激光雷达和激光测距系统中也有非常重要的应用^[14-15],利用光相干检测,就可搭建能够实现探测距离几百公里且精度很高的激光雷达或测距仪。

为了获得单纵模输出人们提出各种结构的光纤激光器,然而跳模成为影响单纵模输出的重要因素,同时也破坏了它低相位噪声特性和高相干性^[16-17],限制了单频光纤激光器的实用化进程。稳定的单纵模激光输出的关键是要采取有效措施消除谐振腔中存在的多模振荡,并抑制跳模效应。因此深入研究光纤激光器的选模原理和跳模机制,并从原理和实验中入手抑制跳模和消除多纵模振荡,实现宽调谐且稳定的单纵模激光输出具有重要的意义。

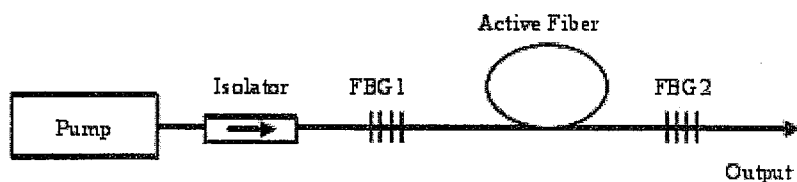
1.2 单纵模光纤激光器结构

单纵模激光器的结构有很多种,但总的来说不外乎两大类,线形腔结构和环形腔结构^[18]。下面就针对这两类激光器的特点进行分析。

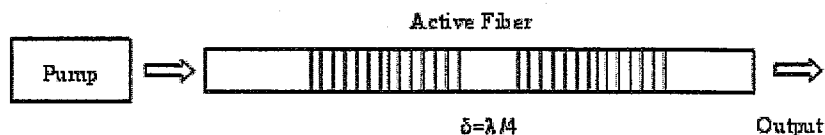
1.2.1 线形腔单纵模光纤激光器

线形腔结构简单,是单纵模光纤激光器最常用的结构,主要有超短腔,Fox-Smith腔、以及在长腔结构插入控制器件等^[19]。

超短腔光纤激光器主要是采用很短的腔长,达到获得很大纵模间隔的目的,从而在增益带宽内容易内选取一个单纵模。主要有分布 Bragg 反射式 (DBR)^[20]和分布反馈式 (DFB)^[21]两类,其基本结构可以参考图 1-1。



(a) DBR 光纤激光器基本结构



(b) DFB 光纤激光器基本结构

图 1-1 超短腔光纤激光器基本结构示意图

分布 Bragg 反射式 (DBR) 构成的光纤激光器, 一般采用直接写入或熔接上两个具有相同中心波长的 Bragg 光栅, 光栅之间只留有很小距离以形成短腔结构, 腔长一般不过几厘米, 但是这样做的后果就是增益太低, 甚至造成无法形成激光输出, 并且难以制作中心波长完全一样的 Bragg 光栅。华南理工大学杨中民等人^[22]通过自制的净增益高达 5.2dB/cm 的铒镱共掺单模磷酸盐玻璃光纤 ($\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped single mode phosphate glass fiber), 采用窄带光纤光栅 (NB-FBG, 3dB 带宽 0.06nm, 反射率 50.5%) 为谐振腔的前腔镜, 熔接在 2cm 的磷酸盐光纤上, 以二色镜 (反射率大于 99.5%) 取代另一个光纤光栅作为后腔镜, 解决了上述问题。其中窄带光纤光栅长度 1.5cm, 总有效腔长不到 3cm, 得到纵模间隔为 3.4GHz, 在 NB-FBG 7.5GHz 的带宽内可以得到一个优势单纵模。整个系统封装在铜管中, 为了防止腔长变化产生漂移系统温控精度在 0.05°C , 得到线宽小于 2KHz, 功率 300mw 的单纵模激光输出。

分布反馈式 (DFB) 构成的光纤激光器, 相比于一般的 DBR 激光器, 它只有一个光纤光栅, 通过直接在掺杂光纤上写入一个相移光栅来构成激光谐振腔。相移光栅是一种非均匀周期光栅, 通常在栅距范围内留有 $\lambda/4$, 即 $\pi/2$ 的相移间隔。从而在相移光栅反射带中心存在一个极窄的透射窗口, 因此相移光栅具有非常好的模式选择特性, DFB 激光器就能够形成单纵模激光输出。由于是利用相移间隔, 这种 DFB 光纤激光器腔长有限, 很难得到高功率。Kringelbotn 等人通过在 3cm 长的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸铝光纤上刻写了 2cm 长的相移光栅做成了第一台 DFB 光纤激光器^[23]。

超短腔光纤激光器的优点是结构简单, 单纵模工作状态稳定, 线宽也可以达到几 KHz, 几乎没有跳模, 能够满足一般应用, 但是调谐困难, 限制了它的进一步应用, 且受温度等影响腔长微小变化就容易产生漂移, 必须对腔长精确控制, 也难以插入其它光学器件 (如偏振控制器) 实现更多的功能, 限制了它光学性能的扩展提升。

Fox-Smith 腔光纤激光器本质上就是一种线形复合腔结构^[24], 利用两个谐振腔共振特性选频, 在图 1-2 中, 由耦合器分路形成了两个光程长度不同的 F-P 腔, 每个腔的自由光谱范围 (free spectral range, FSR) 不同, 激光必须同时满足两个

F-P 腔的谐振条件，设计两路光程长度，就可以扩大复合腔的 FSR，使激光器获得单纵模输出。由于 Fox-Smith 谐振腔是通过控制两光纤长度关系来实现腔内纵模间隔的扩大，因此谐振腔长可以较长，即增益光纤长度可以很长，有利于获得高功率输出。但是腔长变长使得空间烧孔效 (spatial hole burning)^[25] 容易产生，长光路也易受环境扰动影响，如对温度，声波，震动十分敏感，造成单纵模的不稳定，只用复合腔结构很难得到稳定运行的单纵模激光，常存在其它频率的跳模。

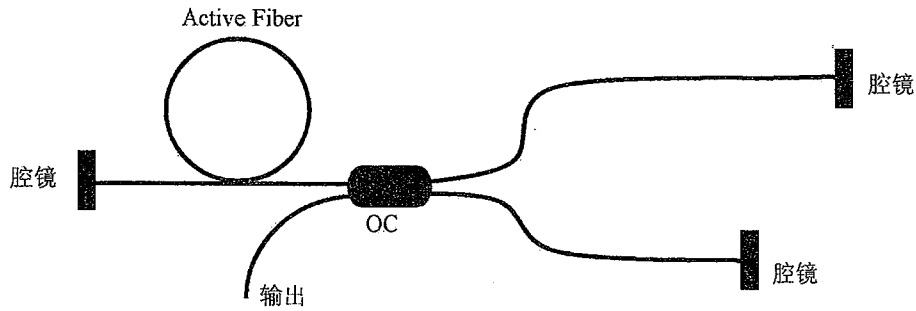


图 1-2 Fox-Smith 结构谐振腔激光器

由于简单的长线形腔有严重的空间烧孔效应，容易多纵模同时起振难以实现单纵模激光输出，为此人们采用非相干技术和加入饱和吸收体等方法消除空间烧孔以实现激光器单纵模运转。

非相干技术的实现原理是通过控制腔内往返相遇光波的状态，使其无法形成干涉和驻波效应，从而消除空间烧孔。由干涉原理可以知道，圆偏振光之间和偏振方向互相垂直的线偏振光之间都是无法形成干涉的，两光频率不相同也无法形成干涉。文献^[26]在线形腔中增益光纤两端加上偏振控制器，通过调整偏振控制器实现传播方向相反偏振方向相同的圆偏振光避免干涉；文献^[27]通过法加入拉第旋转器实现往返的光波偏振态正交，也不能形成驻波效应；文献^[28]是在线形腔的两端各加一个调制频率为 ω 的声光调制器，它对两个不同方向的光附加了相反的频移，使它们的频率差为 2ω ，这样也无法形成干涉，从而实现单纵模输出，非相干技术通常要使用多个控制器件，使得激光器结构复杂，不利于工程化应用^[26]。

饱和吸收体法就是在腔中加入一段未被泵浦的稀土掺杂光纤，线形腔中相反方向的光在未泵浦光纤中发生干涉，当光功率和掺饵光纤长度合适时，在驻波波峰处就会发生饱和吸收，即形成了空间烧孔现象，这就相当于是自写入光纤光栅，

由于这种自写入光栅长度很长，形成的光栅反射带宽也极窄，且反射中心波长具有自适应特性与形成干涉的光波长相同，这样不在中心波长的光腔内损耗会很大，所以能起到选模作用有效抑制跳模。1994年，Horowitz等人首次使用光纤可饱和吸收体并结合偏振控制器用于纵模选择和抑制跳模，该激光器采用线形谐振腔结构，输出光谱线宽 5kHz，单频运转稳定时间为数分钟^[29]。图 1-3 为 Horowitz 的实验结构图，它既利用饱和吸收体产生空间烧孔选频，又利用偏振控制器消除了线形腔中的空间烧孔，从而实现了较稳定地单纵模输出。饱和吸收体也可以用在环形腔中，通过在环形腔中加入环形器，在环形器公共端加入一段稀土掺杂光纤作为饱和吸收体，尾端加上 FBG 使进入光纤中的光与 FBG 反射回的光形成干涉。但这些利用饱和吸收体选频的激光器的问题在于难以选择合适的未泵浦掺杂光纤长度。

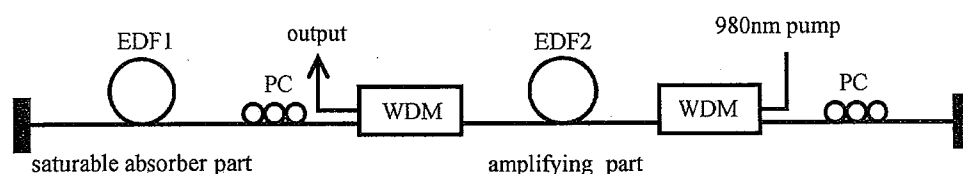


图 1-3 加入偏振控制器的饱和吸收体光纤激光器

基于非相干技术和饱和吸收体的线形腔光纤激光器，线宽也比较窄，但输出激光的稳定性还需要提升，并且损耗大，转换效率低，输出功率极低。

1.2.2 环形腔单纵模光纤激光器

由上一节可以知道，要实现光纤激光器宽调谐必须采用环形腔结构。环形腔还具有其它优点，如直接在腔内插入隔离器或环形器就能使激光单向传播，克服了驻波烧孔效应，具有较低的相对强度噪声、低阈值，而且可以通过增加掺杂光纤长度提高输出功率。然而因其构成环形腔所需要器件较多，腔长较长，纵模间隔较小，腔长与纵模间隔成反比，因此长环形腔会造成在掺铒光纤增益曲线下有大量密集的纵模，增加了模式跳变的可能性，甚至形成多模振荡，因此需要扩大纵横间隔，并选出单纵模。而直接在光纤环形谐振腔加入 F-P 标准具、光纤光栅标准具^[30-31]，外注入反馈等方法又大大增加了系统的复杂性。

为了实现掺铒光纤激光器单纵模输出，下面对几种相对实用的结构：光纤环形谐振腔、复合环形腔和自反馈注入环形腔等简要介绍。构成光纤环形腔的关键器件是 2×2 光纤耦合器，光纤耦合器的4个臂采用不同的连接方式可以分别作为激光输出端构成环形腔，可以构成 Sagnac 环，还能够构成不同类型的光纤环作为次级谐振腔辅助选频。

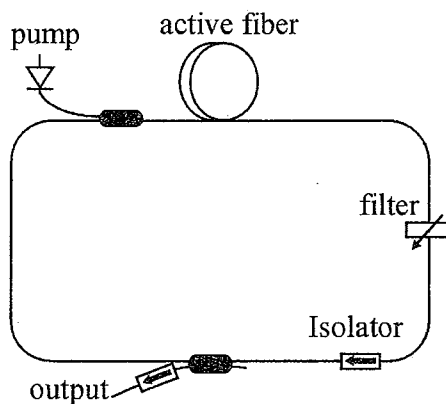


图 1-4 光纤环环形谐振腔激光器

将 2×2 光纤耦合器的直通臂接入腔内就可以构成最基本的环形谐振腔，图 1-4 为典型的光纤环环形谐振腔结构，谐振腔中的光纤耦合器起到提供激光反馈、模式选择和激光输出的作用，谐振腔的精细度由腔内损耗和光纤耦合器分光比共同决定的（将在下一章进行详细分析）。在光纤环环形谐振腔内插入隔离器，使腔内激光单向传输，谐振腔就工作在行波状态，这样就可以避免因空间烧孔效应而产生多纵模振荡。在谐振腔内插入窄带滤波器等光学器件，可以获得单纵模激光输出，但由于窄带滤波器不能做得足够窄，因掺杂光纤中存在一定的非均匀加宽效应，易受环境影响产生多纵模竞争，导致单纵模很不稳定，产生跳模。

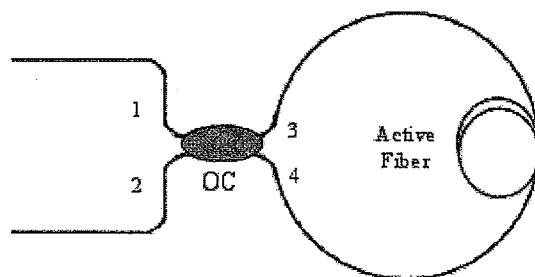


图 1-5 Sagnac 环环形谐振腔激光器

图 1-5 为环中加入掺杂光纤的 Sagnac 环环形腔激光器最基本结构, 将 2×2 光纤耦合器的同端的两臂连接起来, 就构成了一个 Sagnac 环, 由 1 或 2 端口进入, 经过耦合器分光作用, 光在腔内双向传播, 当加入隔离器后, 与光纤环形谐振腔激光器类似, 形成行波腔, 在 2 或 1 端口加入反射及滤波器件作为光反馈和模式选择, 并能通过插入选频器件获得单纵模输出。

如在环形腔中加入光纤光栅作为波长选择器件, 用光纤环谐振腔和 F-P 谐振器腔作为选频器件以扩大有效纵模间隔, 并加入未泵浦的掺铒光纤作为饱和吸收体抑制多纵模, 最终可以得到单纵模输出并消除拍频噪声^[32]。Song 等人通过基于可调 FBG 和 4m 饱和吸收体的环形腔结构实现了线宽 750Hz 调谐范围 1522-1562nm 的激光输出^[33]。Sun 等人采用图 1-6 所示结构得到了一种单纵模环形腔光纤激光器^[34], 基于 FBG 的 F-P 滤波器和可调谐的饱和吸收体都保证了稳定的单纵模运行。

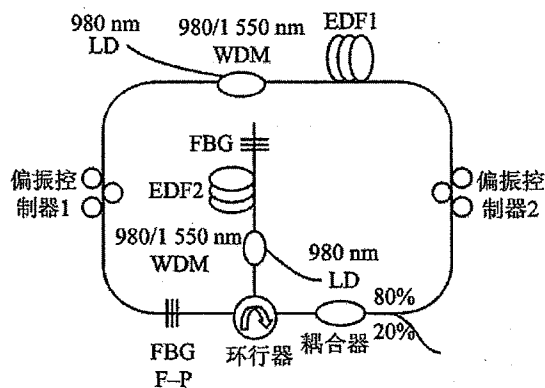


图 1-6 光纤光栅 F-P 滤波器结合饱和吸收体环形腔光纤激光器

光纤饱和吸收体是非线性二波混频机制的一种应用形式^[35], 二波混频是广泛存在于非线性介质中的一种非线性效应, 其它实现形式主要有: 腔外光注入锁定^[36]、自反馈注入等。

自反馈光注入也可以认为是腔外光注入方式的一种改进, 即简单的将光纤激光器输出激光的一部分光重新耦合注入到激光谐振腔中, 让反馈注入光在掺杂光纤中与腔内振荡激光干涉, 形成类似于饱和吸收体中的增益光栅, 达到选择纵模和抑制跳模的目的, 最终获得稳定的单纵模运转。自反馈光注入光纤激光器由 Lee 等在 2000 年首先提出, 其基本结构如图 1-7 所示^[37]。

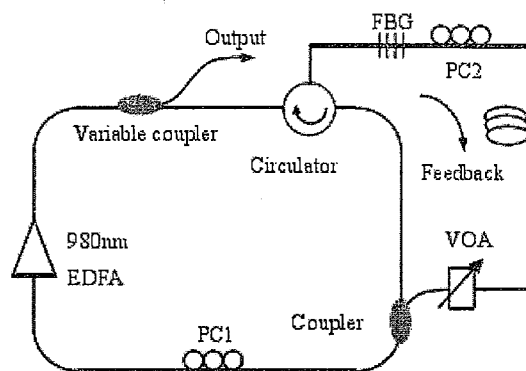


图 1-7 自反馈注入环形腔光纤激光器

复合环形腔光纤激光器由两个或两个以上的光纤环形谐振腔组成，通过在主环形腔中加入一个或多个由单个耦合器构成的光纤环构成复合腔^[38]，图 1-8 即为加入了三个光纤环的复合环形腔光纤激光器结构，这种光纤环是把一个 2×2 光纤耦合器的直通臂的输入端与输出端相连，构成一个环形谐振腔，由它和主环腔腔组成复合腔结合了环形腔和短腔的优点，既能够用较长的主腔获得高增益，又能利用环长较小的光纤环谐振腔扩大纵模间隔，从而实现单纵模输出。如加入多个光纤环，就可以扩大纵模间隔到几十 GHz 以上，达到 nm 量级，结合滤波器很容易实现单纵模输出。该类激光器为全光纤结构，具有结构简单、成本低、易于实现、方便调谐、可以加入光学器件实现功能扩展等优点。只是由于器件多，光纤长度太长，会造成单纵模不稳定，所以我们对复合环形腔光纤激光器的稳定性进行了深入的研究。

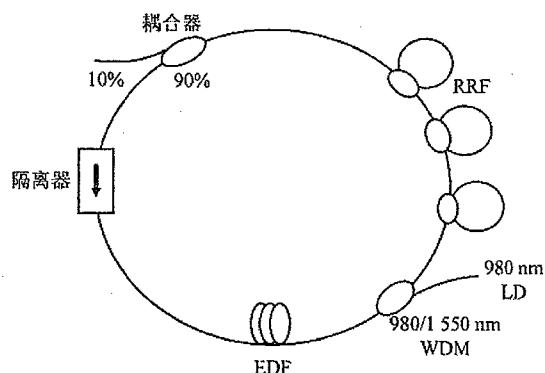


图 1-8 基于光纤复合环形腔单纵模光纤激光器

1.3 环形腔单纵模光纤激光器的研究现状

在上一节的分析中，我们可以看到线形腔单纵模激光器虽然结构简单，易获得窄线宽单纵模输出，但是调谐困难，而环形腔内加入隔离器就可以避免线形腔中存在的空间烧孔效应，加入可调谐滤波器件就能实现宽调谐。这其中复合腔又更为简单实用，但是光纤环形腔激光器腔长太长，虽然有助于获得更窄的线宽，但同时会造成谐振腔内纵模间隔太小，有可能起振的潜在纵模数量增加，再加上腔长长又易受环境影响，稀土掺杂光纤本身存在一定的非均匀加宽，使它容易产生模式竞争出现跳模，或导致光纤激光器常常工作在多纵模状态，使光纤激光器输出的光谱线宽被严重展宽。为了实现稳定的单纵模，过去二十年来人们设计了各种复合环形腔光纤激光器^[39-42]，常用的是通过加入由光纤耦合器（OC）构成的光纤环作为辅腔以扩大复合腔的有效纵模间隔，并结合选模器件选取单纵模。在复合腔光纤激光器中通常用两种基本的光纤环作为辅腔，一种是一个 OC 构成的单 OC 光纤环，另一种是两个相同耦合比的 OC 组成的双 OC 光纤环。

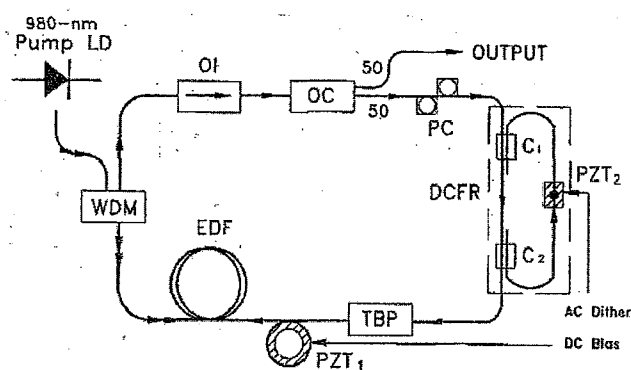


图 1-9 单纵模复合环形腔掺铒光纤激光器

1996 年, Zhang 等报道了一种复合环形腔结构的单纵模可调谐掺铒光纤激光器^[42], 它是基于全光纤结构的环形腔激光器, 图 1-9 中主要由增益介质和一些光纤器件插入到主腔中构成复合谐振腔。增益介质为 10 米长的掺铒光纤 (EDF), 掺杂浓度为 220ppm, 截止波长为 925nm, 980nm 的泵浦光可以以基模传输, 充分铒离子掺杂区域, 其 EDF 具有良好的增益平坦性, 采用反向泵浦结构通过波分复用耦合器 (WDM coupler) 将泵浦光注入到主腔中, 泵浦源功率约为 90mW。通过在腔内加入光学隔离器 (OI) 使激光沿箭头所示的顺时针方向传播防止后向

反射, 50%的激光输出, 剩余激光反馈回腔内继续震荡放大, 通过一个在线偏振控制器 (PC) 调节复合环形腔的偏振态 (SOP), 保持偏振态与双 OC 光纤环谐振腔的一个本征偏振方向相同对保证单纵模震荡、优化波长调谐范围和抑制激光噪声非重要。一个商用可调谐带通滤波器 (TBP) 具有 1.5nm 的半高全宽 (full width at half maximum, FWHM), 作为波长调谐和限制模式数目的器件。通过在双 OC 辅腔和主腔内分别加上压电陶瓷 (PZT), PZT1, PZT2 实现对腔长的微调, 环形腔总腔长 30m, 对应的 FSR 为 6.8MHz。通过 TBP 和 DCFR 选取出单纵模, TBP 的带宽约为 200GHz, 作为初步选频, DCFR 的通带带宽为 20MHz, FSR 即通带间隔为 2GHz, 利用 DCFR 辅腔与主腔的 Vernier 效应使 TBF 选出单纵模。激光器输出功率几乎在 1525-1570nm 调谐范围内都可达到 20mW, 短期光谱线宽小于 5kHz, 边模抑制比 40dB。利用复合腔的滤波特性及腔长和偏振态的控制, 使激光频率能在长时间内保持稳定。

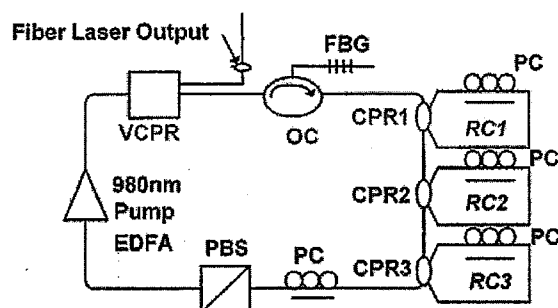


图 1-10 多环腔单纵模光纤激光器结构图

1998 年 Lee 等人第一次提出了多环腔 (MRC) 结构的单纵模掺铒光纤激光器^[41], 图 1-10 所示, 通过在主环形腔中插入三个不同长度的单 OC 光纤环作为滤波器, 利用 FBG 作为限模器件, 保证激光器单纵模震荡。可以有效抑制 1GHz 以内的边模, 输出功率 23mW, 边模抑制比在 1533nm 处达到 51dB, 短期线宽 2KHz。

2007 年, Yeh 等人提出了一种 S-band 可调谐且稳定的单纵模掺铒光纤激光器^[40], 图 1-11 所示, 通过加入两个单 OC 环构成复合腔, 结合可调 F-P 滤波器 (Fabry-Perot tunable filter, FFP-TP) 和两个偏振控制器 (PC) 保证单纵模震荡。输出功率大于 0dBm, 功率波动小于 0.05dB, 波长变化小于 0.02nm, 有效抵制 500MHz 以内的边模, 边模抑制比大于 54.3dB/0.05nm。调谐范围 1481-1513nm。

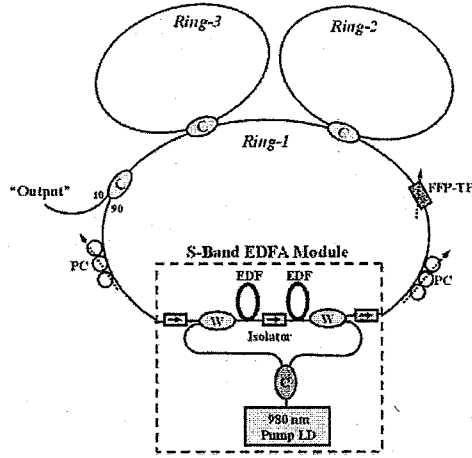


图 1-11 多环腔单纵模光纤激光器结构图

目前为止，还没有人报道过级联单 OC 环和双 OC 环结构的复合腔光纤激光器，本文中，我们提出了一种级联单 OC 环和双 OC 环作为辅腔利用 FBG 作为限模和调谐器件的单纵模光纤激光器。

1.4 本论文的主要工作

目前，国外单频光纤激光器发展趋于成熟，美国 NP Photonics 公司已经可以提供线宽 1KHz 以下，功率 100mw 以上，1550nm 附近波长的宽调谐的窄线宽单纵模光纤激光器，国内有很多高校和科研院所也进行了相关的工作，但是国内的单频光纤激光器存在频率稳定性不好等问题，而单纵模光纤激光器又是高速远距光通信、远距离光纤传感和高精度相干检测系统不可或缺的光源，单纵模光纤激光器的发展对国防、工业和科技的发展水平有重要影响，高稳定度单纵模激光在引力波探测、高精度光谱、量子频标等科学研究前沿具有重要应用。在激光雷达、光电对抗、保密通信等国家安全领域具有巨大的应用前景。本文以研制出单纵模稳定性好的光纤激光器为目标，通过理论分析与实验模拟相结合，针对已经提出的新型的复合环形腔结构的辅腔设计、参数优化等相关问题，展开相应的理论与实验研究，本论文的主要工作包括：

本文在实验室初步实现了单频输出的复合环形腔光纤激光器的基础上，分析了复合环形腔单纵模光纤激光器选模机制，通过模拟其中两种不同类型辅腔的通带特性，设计辅腔耦合比优化谐振通带带宽以保持单纵模的稳定性，并分析了通过设计辅腔长度使扩大的通带间隔与 FBG 带宽的关系对调谐过程中单纵模稳定

性的影响,在此基础上,提出了优化后的实验结构方案。利用自行搭建 F-P 扫描干涉仪系统和实验室已搭建好的线宽测量系统,实现了对光纤激光器单纵模运转状态的监测。最后在实验上对不同主腔、辅腔参数的情况下跳模位置和单纵模状态进行了对比和验证,对复合腔激光器的结构上进行了优化和改进,实现了稳定的单纵模激光输出,并利用可调 FBG 实现了宽调谐且保持稳定的单纵模运转。本论文的章节安排如下:

第一章概述了单纵模光纤激光器的研究背景和种类,主要实现技术和关键技术,以及复合环形腔光纤激光器发展现状。

第二章对环形复合腔光纤激光器的单纵模选模机制、模式竞争和跳模机制进行了深入分析,通过模拟其中两种不同类型辅腔的通带特性,为单纵模的稳定性寻找理依据。并进一步研究了辅腔参数的设计对选取单纵模的影响,最后提出了优化后的实验结构方案。

第三章分析了 F-P 扫描干涉仪的检测原理,介绍了线宽测量系统,明确了每种方法的测量范围,为跳模规律测量提供了技术保证,为进一步验证跳模机制提供了重要的理论依据。

第四章在实验上对不同主腔、辅腔参数的情况下跳模位置和单纵模状态进行了对比和验证,对复合腔激光器的结构上进行了优化和改进,确定了参数和设计原则,实现了稳定的单纵模激光输出,并在宽调谐的情况下获得了稳定的单纵模。

1.5 本章小结

概述了单纵模光纤激光器的研究背景和种类,回顾单频光纤激光器的发展趋势,并介绍了主要应用,主要实现技术和关键技术,以及复合环形腔光纤激光器发展现状。最后给出本文的主要工作及各章节安排。

第2章 复合环形腔单纵模光纤激光器基本理论

单纵模环形腔结构相对线形腔复杂,但可以通过在腔内增加滤波器和调谐器件实现宽范围调谐,并且由于光在环形腔内为单向运行,有效的克服了空间烧孔效应,容易实现单纵模运转。单纵模光纤环形激光器实现可宽带调谐的最主要的器件为中心波长可调谐的滤波器。一般通过加入多个光纤环谐振腔作为辅腔,利用复合腔的 Vernier 效应^[43-44]结合可调谐光纤光栅实现单纵模选取和波长调谐。本章阐述了模式选择原理和跳模机制,并通过对辅腔结构和谐振特性的分析,推导两种光纤环形谐振腔的光谱特性函数,讨论谐振腔结构参数对单纵模稳定性的影响,给出能实现光纤激光器稳定的单纵模运转的腔结构设计参数。

2.1 选模原理

单频激光器要求激光输出既是单横模又是单纵模。相应的,模式选择技术也可以分为两大类,即横模选择技术和纵模选择技术,通常的单模光纤指的是单横模,一般地光纤激光器由于光路全部为单模光纤以及采用单模掺杂光纤作为激光工作介质,自身就已经具有单横模选择特性,因此只需对光纤激光器进行纵模选择。

当光在腔内往返传播时,将发生干涉,要在腔内形成稳定的振荡,就要求光波因干涉相长。由多光束干涉理论可知,发生相长干涉的条件是:光波从某一点出发,经腔内往返一周再回到原来位置时,应与初始出发波同相,因而只有某些特定频率的光才能满足谐振条件:

$$2\Phi = 2q\pi, \quad q = 1, 2, 3, \dots \quad (2-1)$$

Φ 为单程相移, L 为几何腔长, $\Phi = kL$, q 值定义为纵模序数,每一个 q 值对应正反两列沿轴线相反方向传播的同频率光波,这两列光波叠加将在腔内形成驻波,谐振腔形成的每一列驻波就是一个纵模。激光器中满足谐振条件的不同纵模对应着谐振腔内各种不同的稳定驻波场,具有不同的频率。由于谐振腔的腔长远

大于光波波长，波节数是一个很大的量， q 是一个很大的值，也就意味着对纵模不加以控制的激光器，具有成千上万个不同的纵模。

波矢 k 的值与谐振频率 ν 之间又有关系： $k = 2\pi n\nu/c$ ， n 为增益介质折射率，可以得到稳定存在于腔中的激光振荡模式的谐振频率为：

$$\nu = \frac{qc}{2nL}, \quad (2-2)$$

式 (2-2) 表明，激光谐振腔的谐振频率与纵模序数 q 有关。腔内相邻纵模频率之差 $\Delta\nu$ 称为纵模的频率间隔。由式 (2-2) 得，

$$\Delta\nu_q = \nu_{q+1} - \nu_q = \frac{c}{2nL}, \quad (2-3)$$

而环形腔中，由于光是单向传播的，经腔内传播一周再回到原来位置时，应与初始出发光波同，因而光程差为线形腔中的一半，纵模频率间隔扩大为 2 倍即

$$\Delta\nu_c = \frac{c}{nL}。$$

由此可知谐振腔中有可能形成稳定激光振荡的光频率是一系列分立的频率，其中只有满足谐振条件，且落在增益带宽内的频率才能形成激光振荡，即激光器的单纵模选择和能否实现单纵模输出是由增益带宽和纵模间隔的比值关系决定的，可通过两条途径来实现：一是限制激光器的有效增益带宽，二是扩大能相邻两个纵模之间的频率间隔，扩大到一定程度就可以使得只有一个纵模落在增益线宽范围内，当增益带宽内只存在单个纵模时就能实现单纵模输出^[45]。

通过结合这两种途径得到激光器的模式选择特性获得单纵模输出是最为根本有效的方法，下一节将会提到，激光器中某一个纵模能否起振和维持振荡主要取决于这一个纵模的增益与损耗的相对大小，因此可以通过在腔内插入一定的模式选择器件，对于不同频率的纵模产生增益和损耗的差异，只有中心频率附近的少数净增益较大的纵模形成振荡，最终通过模式竞争得以输出单纵模。

2.2 跳模机制

跳模是影响单纵模光纤激光器稳定性的重要因素，它破坏了窄线宽光纤激光器的低相位噪声特性和高相干性，限制了单频光纤激光器的进一步应用。因此了

解跳模的机制，并从原理和实验中入手解决跳模是至关重要的。跳模从字面上理解就是模式的跳变，即纵模的跳变，它存在于均匀加宽激光器中的模竞争^[46]、非均匀加宽激光器的多纵模振荡。

1) 均匀加宽激光器中的模式竞争

在均匀加宽激光器中，许多个不同谐振频率的纵模落在均匀加宽增益曲线范围内，且小信号增益系数 $g^0(\nu)$ 都大于阈值 g_t ，这些模式消耗相同的上能级粒子数，因此几个满足阈值条件的纵模在振荡过程中互相竞争。为了简单起见，这里只假设在增益曲线内只有三个纵模满足上述要求，谐振频率分别为 ν_{q-1} 、 ν_q 、 ν_{q+1} ，见图 2-1。在最开始时，每个纵模的小信号增益系数都大于阈值，因此三个纵模的光强 I_{q-1} 、 I_q 、 I_{q+1} 都在增大，但是随着光强增大到一定程度，增益由小信号增益变为饱和增益，整个增益曲线不断下降，当增益曲线下降至图中曲线 1 时， ν_{q+1} 首先达到阈值，增益系数与阈值 g_t 相同，光强 I_{q+1} 不再增大。但这时 ν_{q-1} 、 ν_q 两个纵模的增益系数仍然大于阈值，光强 I_{q-1} 、 I_q 仍在增大，粒子数依然在消耗，因此增益曲线继续下降，而纵模 ν_{q+1} 因增益系数将小于阈值，在振荡中损耗，光强不断衰减，直到为零被完全抑制熄灭。同理，当增益曲线继续下降曲线 2 的位置时， ν_{q-1} 的增益系数也达到阈值 g_t ，光强 I_{q-1} 不再增大，而 ν_q 的增益系数仍然大于阈值， I_q 仍在增大，增益曲线继续下降，导致 ν_{q-1} 模也被衰减至零。最后当增益曲线下降到曲线 3 时， ν_q 模的增益系数等于阈值 g_t ，光强不再增强，增益曲线不再下降， I_q 达到稳态，最终在增益曲线范围内只有 ν_q 模能维持稳定的振荡。结果总是靠近中心频率 ν_0 的一个纵模占据优势，形成稳定振荡，其它纵模都被抑制而熄灭。

理想情况下，均匀加宽稳态激光器的输出应是稳定单纵模的，但实际上并不总是如此，这是因为腔长引起的漂移会使模式发生跳变，线形腔中的空间烧孔效应也能引起多纵模振荡。

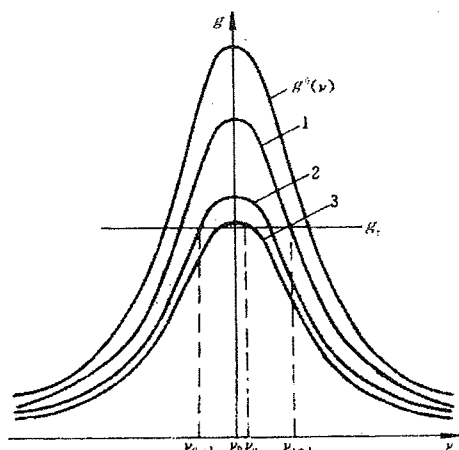


图 2-1 均匀加宽激光器中建立稳态振荡过程中的模式竞争

当外界条件改变时，比如温度和应力引起的腔长变化，其它净增益大于零的纵模通过获得更多的增益粒子形成模式竞争，并最终取代之前的纵模从而建立起另一个稳定振荡。因此从本质上来说跳模就是两个或多个纵模之间模式竞争的过程，而模式就发生在参与竞争的纵模之间形成跳变。漂移引起的跳模现象可以通过以下面的典型的案例进行描述^[47]。如图 2-2 所示。有跳模时激光器的输出激光频率，会随时间不断的变化，最开始随着激光器变稳定过程中，光频率逐渐减小，减小到某一频率时又突然发生跳变，增大到另一个数值，然后重复上述过程，最终光频率在一个频率 ν_0 为中心，在附近反复跳变。可以用图 2-2 来解释这种跳模现象。图中表示的是激光器刚启动时的情况。设此时频率为 ν_q 的纵模比 ν_{q+1} 模更接近中心频率 ν_0 ，因此 ν_q 模就具有相对较大的小信号增益系数，此时通过模式竞争 ν_q 纵模形成稳定振荡。由于激光器启动后腔内温度升高，使得谐振腔的腔长变大，将会使各纵模的谐振频率都向低频的方向漂移。在这个过程中，当 ν_{q+1} 模的频率变成比 ν_q 模频率更接近中心频率 ν_0 时， ν_{q+1} 模就能在与 ν_q 模的竞争中占据优势并取而代之形成振荡，又因为纵模的频率间隔为 $\Delta\nu_q = \frac{c}{2nL}$ ，驻波条件为 $L = q \frac{\lambda}{2n}$ 因此，激光频率就在 $\nu = \nu_0 \pm \frac{c}{4nL}$ 之间变化， L 为谐振腔的长度，之后每伸长一个半波长，就会产生一次跳模，这样只要进入中心频率两边 $\frac{\Delta\nu_q}{2} = \frac{c}{4nL}$ 范围内的频率都会通过模式竞争形成振荡，相当一个特殊的边界值，随着谐振频率

的低频方向漂移，输出激光的频率也随之减小，之后又有一个纵模进入范围内。这样就形成了一个锯齿形的频率轨迹。

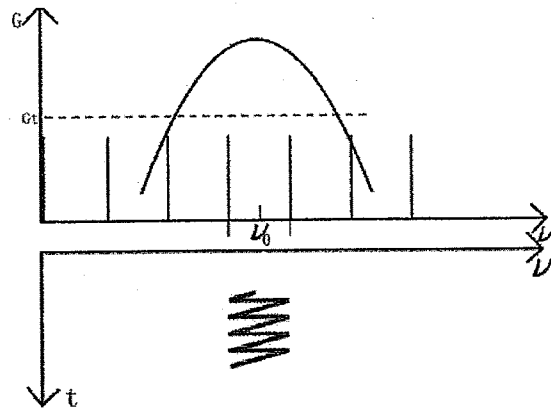


图 2-2 漂移中的跳模现象

当激光器稳定后腔长不再单调增加，频率不再朝一个方向漂移，受环境影响，腔长会减少或者增加，频率漂移也会向低频方向，也会向高频方向，随时间的频率轨迹图形也不再是锯齿形，而是无规律的，即模式在 $\nu = \nu_0 \pm \frac{c}{4nL}$ 随机跳动。

频率为 ν 的纵模在腔内形成稳定振荡时，腔内形成一个驻波场，波节处光强最小，波腹处光强最大，光强不同消耗的反转粒子数不同，从而沿腔轴向的反转粒子数密度和增益系数分布不同，波节处增益系数（反转粒子数密度）最大，波腹处增益系数（反转粒子数密度）最小，这种现象称为空间烧孔效应。由于其它纵模如 q 的波节和波腹与 q 模纵模的波节和波腹并不重合，这些纵模就可以在 q 纵模的波节处得到较高的增益，从而形成振荡，这就是均匀增宽激光器中，在激光较强时，也可能出现少数几个较弱的其它频率光的原因。由于、空间烧孔效应，不同纵模可以消耗不同空间的反转粒子而同时产生振荡，这一现象称为纵模的空间竞争^[48]。

如果粒子的空间转移很迅速，空间烧孔便无法形成。如气体增益介质中，粒子迅速的无规则热运动加速了粒子交换，消除了空间烧孔，气体激光器可获得单纵模振荡。而固体增益介质中（包括光纤），粒子被紧紧束缚在晶格上，粒子在空间转移所需的时间远远大于激光形成所需的时间，所以空间烧孔不能消除。同样以均匀加宽为主，但固体介质的激光器一般为多纵模振荡。就是因为这样，我们采用含隔离器的环形腔来避免空间烧孔可能引起的多纵模振荡。

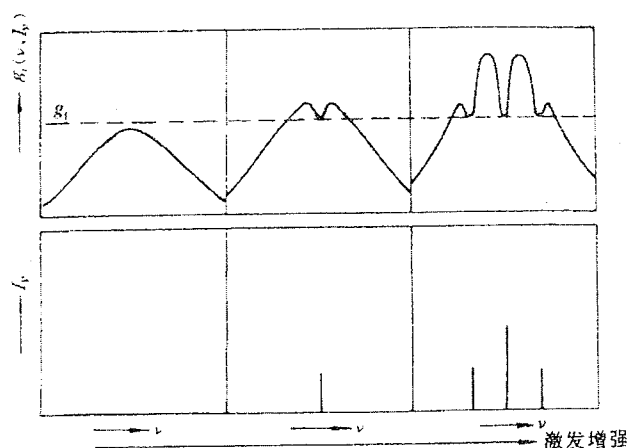


图 2-3 非均匀加宽激光器的模竞争现象

2) 非均匀加宽激光器中的模式竞争

在非均匀加宽激光器中的模竞争现象是由于,某一纵模光强的增加并不会使整个增益曲线均匀下降,而只是在增益曲线上造成对称的两个烧孔,只要纵模间隔足够大,各纵模基本上互不影响,所有小信号增益系数大于 g_t 的纵模都能稳定

振荡。 $\Delta\nu_q$ 和 $\delta\nu$ 分别为纵模间隔和烧孔频宽, $\Delta\nu_q = \frac{c}{2nL}$, $\delta\nu = \sqrt{1 + \frac{I_{s1}}{I_s}} \Delta\nu_H$, 当

$\nu_q = \nu_0$ 时, 且 $\Delta\nu_q < \delta\nu$ 时, ν_{q-1} 及 ν_{q+1} 模形成的两个烧孔重合, 如图 2-3 所示, 当相邻纵模所形成的烧孔重叠时, 相邻纵模因共用一部分粒子而相互竞争, 形成跳模和多纵模振荡。

2.3 辅腔特性分析

在环形腔光纤激光器中, 光路长度长, 纵模间隔小, 不易选出单纵模, 因此需要加入其它器件进行选模, F-P 标准具、可调滤波器或 Bragg 光栅等。而这些方法相对复杂, 常用的是加入多个光纤环作为辅构成复合腔。由 F-P 腔理论可知, 多个光束的相位差为波长整数倍时会波长相长, 相位差为奇数倍时为波长相消, 因其相消和相长和频率是有关的, 可以利用这种频率特性进来滤波。在全光纤激光器中, 一般采用 2×2 光纤耦合器构成的光纤环形腔来实现多光束干涉, OC 环构成一个谐振腔, 基于多光束干涉的原理, 在直通臂中的光相当于透射光, 在耦合臂

中的光相当于反射光，经过多次反射的光在输出端相干叠加。下面我们利用传输矩阵理论对其透过特性进行推导。

2.3.1 辅腔光谱透射函数

通常环形腔中的复合腔采用两种最基本的光纤环构成，分别是由一个光学耦合器（OC）构成的单 OC 环^[40-41]和由两个 OC 构成的双 OC 环^[42]。单纵模激光器的结构中多是级联一个或多个单 OC 环作为辅腔构成复合腔。

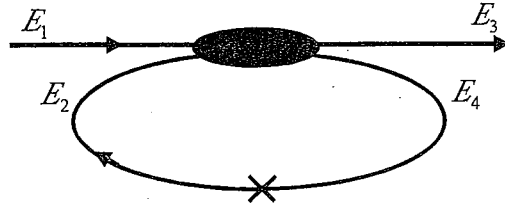


图 2-4 单 OC 光纤环传输矩阵示意图

单 OC 环辅腔采用方案的是由一个耦合器构成，其中一个直通臂的输入端与输出端相连，构成闭合回路。图 2-4 中，若输入光纤环内的振幅为 E_4 ，其余两个端口 E_1 和 E_3 分别作为辅腔的输入和输出端口。考虑耦合器从一端到另一端损耗为 α_1 ，相连环路中熔接损耗等为 α_2 ，得到各端口光振幅间关系：

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \sqrt{1-\alpha_1} \begin{bmatrix} \sqrt{1-k} & i\sqrt{k} \\ i\sqrt{k} & \sqrt{1-k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}, \quad (2-4)$$

展开上式可以得到：

$$E_3 = \sqrt{1-\alpha_1} (\sqrt{1-k} E_1 + i\sqrt{k} E_2), \quad (2-5)$$

$$E_4 = \sqrt{1-\alpha_1} (\sqrt{1-k} E_2 + i\sqrt{k} E_1), \quad (2-6)$$

在环形腔中运行一周之，产生相位延迟，即有

$$E_2 = \sqrt{1-\alpha_2} E_4 e^{-ikl}, \quad (2-7)$$

其中环路长为 l ，有相位差 $\varphi = j/l$ ，其中 $j = 2\pi n/\lambda = 2\pi n\nu/c$ ， λ 为光波长， ν 为光频率， c 为真空中光速。代入式(2-6)中可以得到：

$$E_2 = \sqrt{(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)}(\sqrt{1-k}E_2 + i\sqrt{k}E_1)e^{-j/l}, \quad (2-8)$$

将此式左右展开并化简可得到：

$$E_2 = \frac{i\sqrt{(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)}\sqrt{k}e^{-j/l}}{1-\sqrt{(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)}\sqrt{1-k}e^{-j/l}}E_1, \quad (2-9)$$

将式(2-9)代入式(2-5)可以得到：

$$E_3 = \sqrt{1-\alpha_1} \frac{\sqrt{1-k} - \sqrt{(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)}e^{-j/l}}{1-\sqrt{(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)}\sqrt{1-k}e^{-j/l}}E_1, \quad (2-10)$$

有了入射光与出射光振幅比，就可以到光强比，从而得到透射率为：

$$\begin{aligned} T &= \frac{I_3}{I_1} = \frac{E_3 \cdot E_3^*}{E_1 \cdot E_1^*} \\ &= \sqrt{1-\alpha_1} \frac{\sqrt{1-k} - \sqrt{(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)}e^{-j/l}}{1-\sqrt{(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)}\sqrt{1-k}e^{-j/l}} \cdot \sqrt{1-\alpha_1} \frac{\sqrt{1-k} - \sqrt{(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)}e^{j/l}}{1-\sqrt{(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)}\sqrt{1-k}e^{j/l}} \\ &= (1-\alpha_1) \frac{(1-k) + (1-\alpha_1)(1-\alpha_2) - 2\sqrt{(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)}\sqrt{1-k}\cos(j/l)}{1 + (1-\alpha_1)(1-\alpha_2)(1-k) - 2\sqrt{(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)}\sqrt{1-k}\cos(k/l)} \\ &= (1-\alpha_1) \left(1 - \frac{k(1-(1-\alpha_1)(1-\alpha_2))}{1 + (1-\alpha_1)(1-\alpha_2)(1-k) - 2\sqrt{(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)}\sqrt{1-k}\cos(j/l)} \right) \end{aligned} \quad (2-11)$$

可以看出，当损耗都为零时，透射率恒为1与耦合比无关，因此单OC环辅腔必须加入适当耗损才具有滤波特性，而实际上也是无法做到零损耗的。

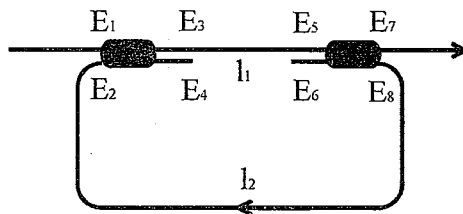


图 2-5 双 OC 光纤环传输矩阵示意图

图 2-5 为双 OC 环的结构和传输矩阵示意图，两个 2×2 光纤耦合器构成的光纤环形腔由于耦合器的分光作用，能实现等平行板多光束干涉中光的反射和透射，在直通臂中的光相当于透射光，在耦合臂中的光相当于反射光，经过两次透射和多次反射的光在输出端形成了多光束叠加，与 F-P 腔原理也相同。而 F-P 腔中透射谱的精细度与腔的反射率有关系，反射率越大，透射光谱的精度度越高，对应到双 OC 环腔中，就是耦合系数越大，谐振通带越窄，下面我们就利用传输矩阵理论验证这一点。

设两个耦合器损耗分别 α_1, α_2 ，两耦合器各自一个直通臂的直连端长度 l_1 ，为损耗为 α_3 ，反向连接端长度分为 l_2 ，损耗为 α_4 ，直通臂另两端分别作为输入输出端口，得到各端口光振幅间关系：

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \sqrt{1-\alpha_1} \begin{bmatrix} \sqrt{1-k_1} & i\sqrt{k_1} \\ i\sqrt{k_1} & \sqrt{1-k_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}, \quad (2-12)$$

$$\begin{bmatrix} E_7 \\ E_8 \end{bmatrix} = \sqrt{1-\alpha_2} \begin{bmatrix} \sqrt{1-k_2} & i\sqrt{k_2} \\ i\sqrt{k_2} & \sqrt{1-k_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_5 \\ E_6 \end{bmatrix}, \quad (2-13)$$

因 E_6 端口既无光输入，也无光输出， $E_6 = 0$ ，由上两式展开得到：

$$E_3 = \sqrt{1-\alpha_1} (\sqrt{1-k_1} E_1 + i\sqrt{k_1} E_2), \quad (2-14)$$

$$E_4 = \sqrt{1-\alpha_1} (i\sqrt{k_1} E_1 + \sqrt{1-k_1} E_2), \quad (2-15)$$

$$E_7 = \sqrt{1-\alpha_2} \sqrt{1-k_2} E_5, \quad (2-16)$$

$$E_8 = \sqrt{1-\alpha_2} i\sqrt{k_2} E_5, \quad (2-17)$$

E_3 与 E_5 及 E_2 与 E_8 端口之间分别有光纤连接，产生相位延迟，即有：

$$E_2 = \sqrt{1-\alpha_4} E_8 e^{-i\beta l_2}, \quad (2-18)$$

$$E_5 = \sqrt{1-\alpha_3} E_3 e^{-i\beta l_1}, \quad (2-19)$$

联立以上各式，得到：

$$E_2 = \sqrt{1-\alpha_2} \sqrt{1-\alpha_3} \sqrt{1-\alpha_4} i \sqrt{k_2} E_3 e^{-j\beta l_1} e^{-j\beta l_2}, \quad (2-20)$$

代入到式 (2-14) 中得到：

$$E_3 = \sqrt{1-\alpha_1} \left(\sqrt{1-k_1} E_1 - \sqrt{k_1 k_2} \sqrt{1-\alpha_2} \sqrt{1-\alpha_3} \sqrt{1-\alpha_4} E_3 e^{-j\beta L} \right)$$

$$E_3 = \frac{\sqrt{1-\alpha_1} \sqrt{1-k_1}}{1 + \sqrt{k_1 k_2} \sqrt{1-\alpha_1} \sqrt{1-\alpha_2} \sqrt{1-\alpha_3} \sqrt{1-\alpha_4} e^{-j\beta L}} E_1, \quad (2-21)$$

其中 L 为环形腔的有效长度， $L = l_1 + l_2$ ，联立式 (2-16)、(2-19) 和 (2-21) 得到：

$$E_7 = \frac{\sqrt{1-\alpha_1} \sqrt{1-\alpha_2} \sqrt{1-\alpha_3} \sqrt{1-k_1} \sqrt{1-k_2} e^{-j\beta l_1}}{1 + \sqrt{k_1 k_2} \sqrt{1-\alpha_1} \sqrt{1-\alpha_2} \sqrt{1-\alpha_3} \sqrt{1-\alpha_4} e^{-j\beta L}} E_1, \quad (2-22)$$

从而得到双 OC 环对不同频率光波的透射率：

$$T = \frac{E_7 \cdot E_7^*}{E_1 \cdot E_1^*}$$

$$= \frac{\sqrt{1-\alpha_1} \sqrt{1-\alpha_2} \sqrt{1-\alpha_3} \sqrt{1-k_1} \sqrt{1-k_2} e^{-j\beta l_1}}{1 + \sqrt{k_1 k_2} \sqrt{1-\alpha_1} \sqrt{1-\alpha_2} \sqrt{1-\alpha_3} \sqrt{1-\alpha_4} e^{-j\beta L}} \cdot \frac{\sqrt{1-\alpha_1} \sqrt{1-\alpha_2} \sqrt{1-\alpha_3} \sqrt{1-k_1} \sqrt{1-k_2} e^{j\beta l_1}}{1 + \sqrt{k_1 k_2} \sqrt{1-\alpha_1} \sqrt{1-\alpha_2} \sqrt{1-\alpha_3} \sqrt{1-\alpha_4} e^{j\beta L}}$$

$$= \frac{(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)(1-\alpha_3)(1-k_1)(1-k_2)}{1 + k_1 k_2 + (1-\alpha_1)(1-\alpha_2)(1-\alpha_3)(1-\alpha_4) + 2\sqrt{k_1 k_2} \sqrt{1-\alpha_1} \sqrt{1-\alpha_2} \sqrt{1-\alpha_3} \sqrt{1-\alpha_4} \cos(jL)}$$

$$(2-23)$$

由此可见，当各耦合器和光纤损耗以及熔接损耗为零的理想情况下，透射率可以简化为：

$$T = \frac{(1-k_1)(1-k_2)}{1 + k_1 k_2 + 2\sqrt{k_1 k_2} \cos(kL)}, \quad (2-24)$$

当 $k_1 = k_2$ 时，相位为 $k(l_1 + l_2) = kL = 2\pi n\nu L / c = 2m\pi$ 时 (m 为整数)， $\nu = m \frac{c}{nL}$ ，

最大透射率仍能达到 1，即相对应的谐振腔的纵模间隔为 $\Delta\nu = \frac{c}{nL}$ 。

因此, 出射光强是随频率周期性变化的, 其周期即此环形谐振腔的自由光谱范围 $\Delta\nu_{FSR} = \frac{c}{nL}$, 根据 3dB 带宽计算公式:

$$T_{mid} = \frac{1}{2} |T_{max} + T_{min}|, \quad (2-25)$$

T_{max} , T_{min} 分别是在一个周期内透射率最大值和最小值, 将 T_{mid} , T_{max} 代入式(2-24)中计算, 即可得出对应的频率值 ν_{mid} 和 ν_{max} , 由此可得到 3dB 带宽为:

$$\nu_{3dB} = 2 |\nu_{mid} - \nu_{max}|, \quad (2-26)$$

精细度可表示为: $F = \frac{\Delta\nu_{FSR}}{\nu_{3dB}}$ 。

2.3.2 辅腔光谱特性

根据光纤环透射光谱函数公式(2-11)和(2-23)式, 可以对光纤环形谐振腔输出光谱线宽特性进行数值计算模拟, 并分析讨论谐振腔腔长、光纤耦合器耦合比、腔内损耗等对环形谐振腔输出光谱线宽特性的影响。

1) 光谱特性随光纤耦合器耦合比的变化

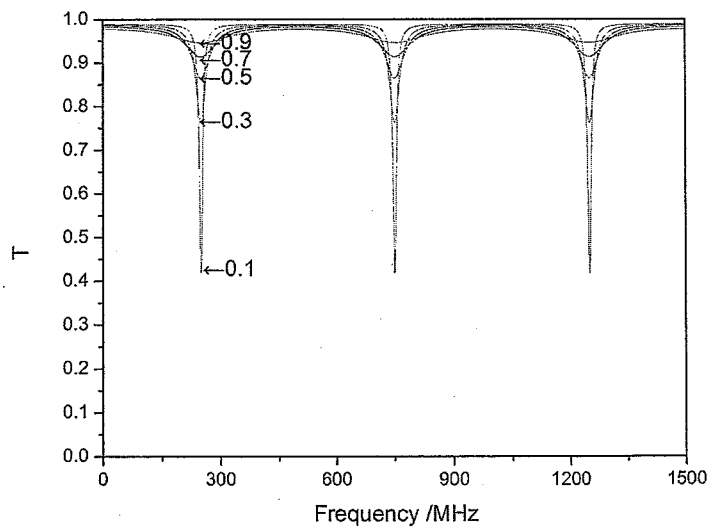


图 2-6 单 OC 环透射光谱曲线随耦合比变化

计算中相关参数取值如下：谐振腔腔长 0.4 米，通过改变光纤耦合器的耦合比，计算谐振腔的透射光谱特性曲线。取光纤环中每个耦合器损耗和熔接点损耗各为 0.05dB，图 2-6 和图 2-7 中分别计算了单 OC 环和双 OC 环在光纤耦合器耦合比为耦合比分别取 0.1、0.3、0.5、0.7 和 0.9 的情况下的光谱特性曲线。从光谱特性曲线可以看出随单 OC 环的透射峰值变化和带宽变化不明显，光谱线宽也很宽，滤波特性不好。

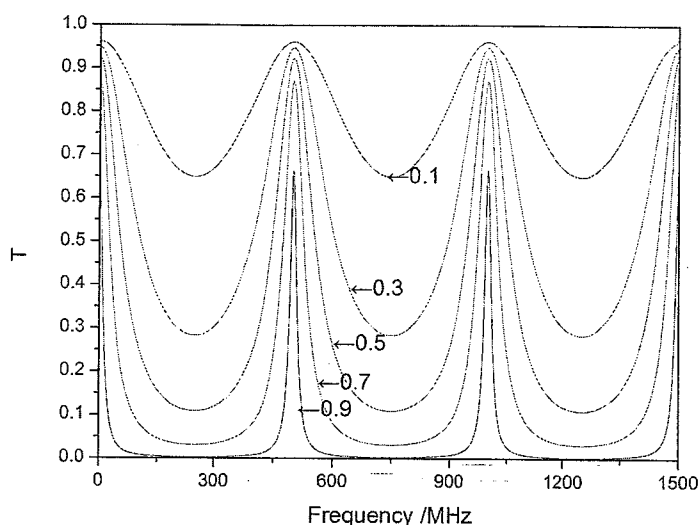


图 2-7 双 OC 环透射光谱曲线随耦合比变化

而双 OC 环光在耦合比大于一定值时，光谱特性曲线会获得非常尖锐的透射峰，同时耦合比的大小又对谐振腔输出光谱线宽产生影响非常大，耦合比越大，精细度越高，谐振腔的通带带宽会越窄。因此在获得一定光功率输出的情况下，提高双 OC 环耦合器的耦合比，将有助于光纤激光器获得更窄的光谱线宽输出。

2) 光谱特性随谐振腔内损耗的变化

光纤环谐振损耗主要包括耦合器损耗和熔接点损耗，传输损耗极小可以忽略，由上图可以看到双 OC 环在耗损相同的情况下耦合比越高透射峰越低，说明损耗有一定影响，尤其是对于高耦合比的双 OC 环影响更大，下面我们分析两种损耗对谐振透射特性的影响。腔长仍取 0.4m 不变，设耦合器损耗和熔接点损耗分别为 0.5/0.5、0.05/1.0、1.0/0.05，单 OC 环和双 OC 环在光纤耦合器耦合比为耦合比都取 0.5，对比图 2-8 和图 2-9，从特性曲线可以看出，不管是单 OC 环，

还是双 OC 环，耦合器的损耗对谐振腔输出的光谱透射峰值的影响更大，低的耦合器损耗更有利于光谱输出。并由 (2-23)、(2-26) 式计算可知，环内损耗增大会使双 OC 环透射谱 3dB 带宽加宽。

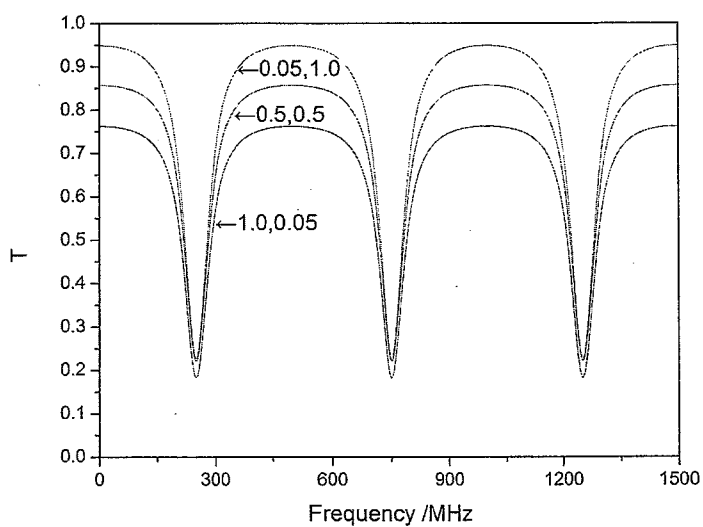


图 2-8 单 OC 环透射光谱曲线随损耗的变化

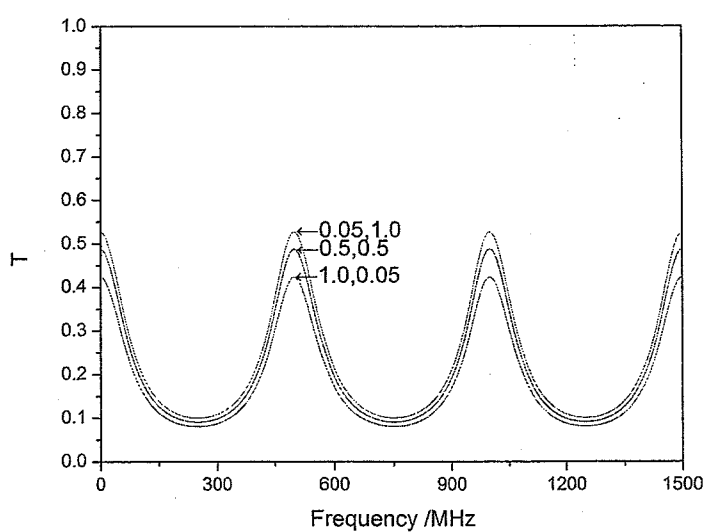


图 2-9 双 OC 环透射光谱曲线随损耗的变化

3) 光谱特性随光纤环谐振腔腔长的变化

图 2-10 为双 OC 环在耦合比为 0.9，忽略损耗的情况下，腔长分别取 0.4m 和 0.25m 时的光谱透射特性图，光纤环谐振腔长增加有助于激光器获得更窄的光谱线宽输出。但随着腔内相邻纵模间隔变窄，谐振腔内纵模数量增加，因此可能起振的纵模数量也会增加，使光纤激光器工作在多模运转状态，同时在外界的扰动下非常容易产生跳模，导致激光器输出光谱线宽被严重展宽。谐振腔长变短，腔内相邻纵模间隔增大，当纵模间隔超过腔内增益介质的增益谱宽或选择模式器的件带宽时，也可以获得单纵模运转，但此时的腔长将非常短，也难以用于光纤激光器中。

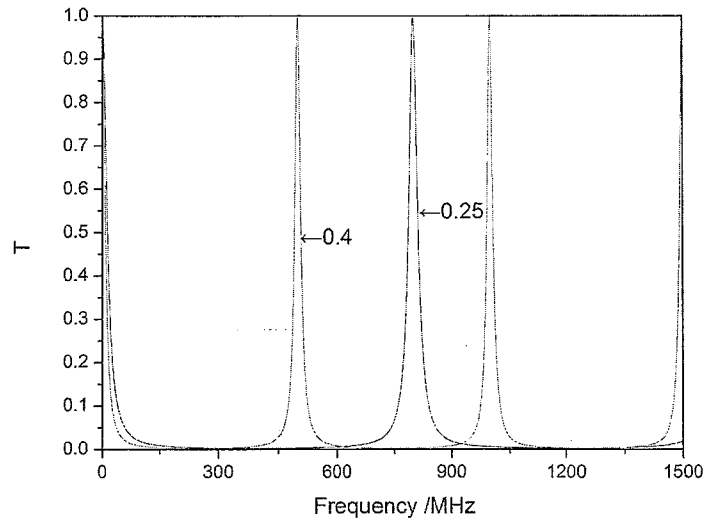


图 2-10 光纤环形腔透射光谱曲线随腔长变化

双 OC 光纤环谐振腔的透射光谱特性和线形 F-P 腔透射光谱特性有着非常相似的特点。所不同的是 F-P 谐振腔是一种线形腔，用作窄线宽激光器的谐振腔时，必须采取有效的措施消除空间烧孔效应，才能实现单纵模运转，获得窄线宽激光输出。光纤环谐振腔是一种环形腔结构，能设计为行波环形腔结构，不需要考虑因空间烧孔效应带来的多模振荡，光纤环形腔激光器长使用长腔结构，这样就可以使用长的增益光纤，不仅使光纤激光器能获得更高的功率输出，也可以获得更窄的单模光谱线宽输出。但谐振腔长增加使得谐振腔内纵模密度加大，光纤激光器受外界扰动而存在严重的跳模现象通过耦合比提高，以及谐振腔长减短等措施，可以改善光纤激光器输出的单模光谱线宽特性。

2.4 结构方案和设计原则

由于光纤耦合器构成的环腔长不能做到太短,受实际条件限制,耦合器长度一般在 5cm 左右,光纤环至少大于 10cm,因此构成环形谐振腔的自由光谱范围(FSR)一般会小于 2GHz,考虑到环形腔中无源器件和掺杂光纤的长度,主腔长度不可能缩短到很短,所以要扩大纵模间隔以实现单纵模的选取必须要采用复合腔结合光纤 Bragg 光栅结构,而由以上分析可以推得,由于复合环形腔其中起决定性作用的是双 OC 环。

目前复合腔单纵模光纤激光器中最常采用的是级联多个单 OC 环作为辅腔。级联光纤环的相邻通带之间的模式竞争可以通过加入选模器件消除,但是由于单 OC 精细度都不高,当腔长设计得过短时虽然可以得到较大的 FSR,同时也造成谐振通带带宽也变大^[49],构成的复合腔的谐振通带也比较大,在谐振通带内相邻的主腔纵模之间,将可能会有严重的模式竞争。另一方面,双 OC 环的谐振带宽相对较越窄,如果用双 OC 环替换单 OC 环就可以把复合腔的谐振通带变窄,但是如果用两个以上的双 OC 环就会造成谐振通带过窄,因为级联后过窄的谐振通带会造成容忍度下降,容易导致另一个通带内的纵模起震,形成通带间的模式竞争。所以级联一个单 OC 环和一个双 OC 环构成成复合腔是最佳选择,因此设计单 OC 光纤环和双 OC 光纤环作为辅腔利用 FBG 作为限模和调谐器件的单纵模光纤激光器,但它们的通带带宽既耦合比的选择还需要确定。

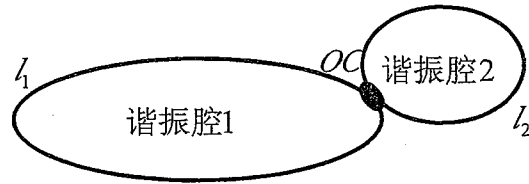


图 2-11 基于双光纤环的复合环形谐振腔结构

谐振腔之所以有选模特性就是因为要满足相位特性,因此如果两个谐振腔相连接,腔内的激光就经过两个腔进行传播,必须同时满足两个谐振腔不同的相位条件。如图 2-11 所示,假设谐振腔 1 腔长为 l_1 ,谐振腔 2 腔长为 l_2 ,可得谐振

腔 1 的谐振频率为 $\nu_1 = \frac{q_1 c}{n l_1}$, 自由光谱范围 $FSR_1 = \frac{c}{n l_1}$ 谐振腔 2 的谐振频率为

$\nu_2 = \frac{q_2 c}{n l_2}$, 自由光谱范围 $FSR_2 = \frac{c}{n l_1}$, 由此可知两个腔分别选取的纵模频率不是

完全一致的, 且腔长不同纵模间隔也不同, 只有同时满足两个谐振频率的纵模才可以稳定存在, 此时光频率都为两个纵模间隔的整数倍, 即此复合腔的纵模间隔

为谐振腔 1 和 谐振腔 2 自由光谱范围的最小公倍数, $FSR_{\text{复合}} = m_1 \frac{c}{n l_1} = m_2 \frac{c}{n l_2}$ 。

理论上扩大纵模间隔的方法有两种, 一是使两个谐振腔腔长差非常小, 最小公倍数会很大; 二是其中一个谐振腔腔长非常短, 可以认为复合腔 FSR 是由腔长较短

的谐振腔决定的, 即 $FSR_{\text{min}} = \frac{c}{n l_1} = m_2 \frac{c}{n l_2}$, 但是本实验中由于通带是有一定带

宽的, 腔长很接近会导致通带间隔无法有效扩大, 另外由于耦合器本身长度和熔接限制, 腔长不可能很小, 无法做到由极短的腔获取较大纵模间隔, 因此还需要对每个谐振腔长度进行合理设计。由以上分析可知, 如果在光纤环形腔中加入一个或多个谐振腔与主腔一起构成复合腔选模, 就会达到扩大纵模间隔的目的。

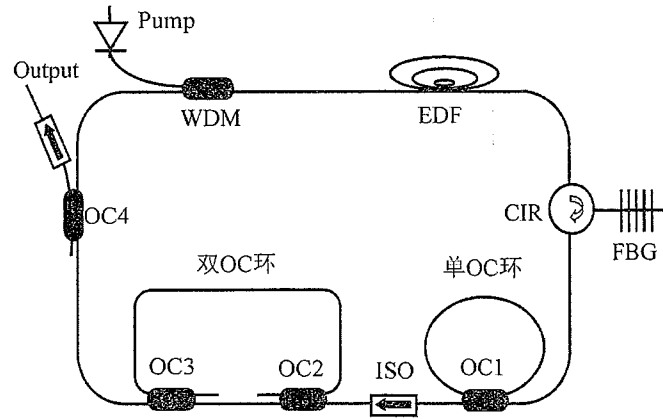


图 2-12 复合环形腔单纵模光纤激光器结构方案图

图 2-12 为设计的复合环形腔单纵模光纤激光器的结构示意图。中心波长为 975nm 最大输出功率为 200mW 的半导体激光二极管 (LD) 作为泵浦源, 泵浦光经波分复用器 (WDM) 耦合进掺铒光纤 (EDF), EDF 长度为 3.6m, 在 975nm 处的吸收系数为 21.6dB/m。。将环形器 (CIR) 输入输出端接在主腔中, 保证激光在主腔内单向运转, 并在公共端连接一个起选频作用的光纤布拉格光栅 (FBG), FBG 的中心波长为 1560nm, 3dB 带宽为 0.2nm, 反射率大于 90%。将

级联的单 OC 环和双 OC 环插入到主腔中作为辅腔扩大通带间隔。单 OC 环中的 OC1 耦合比为 50: 50。双 OC 环中 OC2 和 OC3 的耦合比相同。为消除两辅腔间的串扰, 两个环之间插入一隔离器。耦合器 (OC4) 用于激光输出, 其耦合比为 60: 40, 40% 端口输出, 60% 端口反馈到激光腔内, 形成激光震荡。

级联的复合环形腔单纵模光纤激光器的结构中, 单纵模的选择是通过 FBG 和辅腔相结合来实现的。根据光纤环形腔激光器的基本原理, 只有当主腔以及所有辅腔同时满足相位谐振条件时激光才有可能起振, 两种辅腔的相位条件分别为:

$$\beta L_s = 2m\pi, \beta L_d = (2n-1)\pi, \quad (2-27)$$

式中 β 为公共的传播常数, L_s , L_d 分别表示单 OC、双 OC 环形腔的腔长, m , n 为正整数。由 (2-27) 式可得单 OC 环与双 OC 环的自由光谱范围分别为:

$$S_{FSR_s} = \frac{c}{n_e L_s}, S_{FSR_d} = \frac{c}{n_e L_s}, \quad (2-28)$$

式中 c 为真空中光速, n_e 为光纤的有效折射率。根据 Vernier 效应, 在腔内传播的光必须同时满足各个谐振腔各自的谐振频率才能在腔内传播, 两个 OC 环级联后的复合腔的有效自由光谱范围 S_{FSR_e} 为各辅腔及主腔的有效纵模间隔的最小公倍数, 即:

$$S_{FSR_e} = MS_{FSR_s} = NS_{FSR_d} = XS_{FSR_m}, \quad (2-29)$$

S_{FSR_m} 为主腔纵模间隔, M , N , X 为没有公约数的正整数, 考虑到 M , N 相对于 X 是一个很大的数, 常取前两个光纤环的 FSR 的最小倍数作为复合腔的有效自由光谱范围。

如图 2-13 所示, 当被扩大的复合腔的有效通带间隔与起限模作用的 FBG 的带宽相适应时, 经过这两种形式滤波器的选频作用, 便可选出单个纵模。所以可通过合适的设计单 OC 环以及双 OC 环的长度, 扩大激光器的有效纵模间隔, 在 FBG 的带宽内选出单个纵模。如果通带间隔大于 FBG 带宽, 可能会造成调谐到某些位置没有通带落在 FBG 带宽内, 造成没有优势纵模, 跳模现象严重, 如果

通带间隔远小于 FBG 带宽，又会造成 FBG 带宽内有多个通带，而每个通带内又都有被选中的单纵模，这样也会造成通带间的模式竞争，从而使单纵模不稳定。要得到可调谐且稳定单纵模就要合适的设计两个光纤环的长度，使它们决定的通带间隔为 0.5-1 倍的 FBG 3dB 带宽，这样不管谐振到任何位置，总是只有一个优势通带存在于 FBG 带宽内，选出一个单纵模。

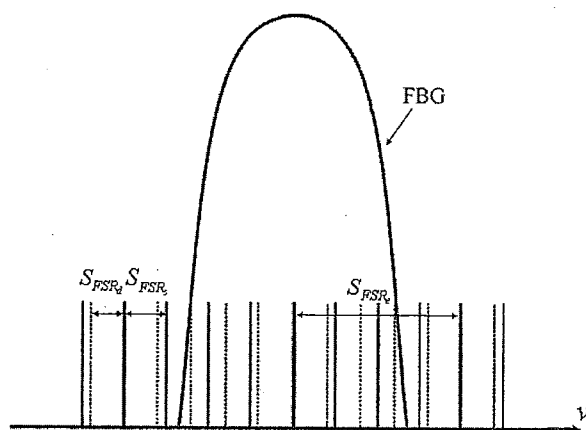


图 2-13 复合环形腔模式选择原理示意图

辅腔 FSR 和精细度共同决定了带宽大小，FSR 和精细度分别是由腔长和耦合比决定的，在腔长确定的情况下， ν_{3dB} 只与耦合比有关。在腔长确定时，当耦合比越大，透射谱精细度越高，透射谱的通带带宽越窄。在谐振通带内透射率越大的纵模损耗越小越容易起振而抑制其它模式，而当通带内模式较多透射率差别不明显时，则难以存在最优模式，模式便会不断跳变。所以谐振通带带宽的优化即耦合比的优化对单纵模的选择及稳定性有至关重要的影响。

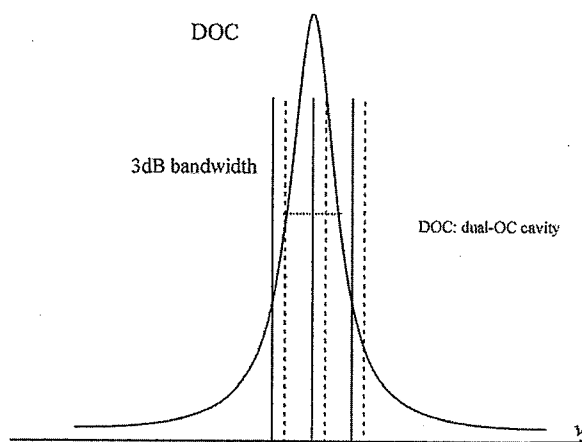


图 2-14 双 OC 辅腔谐振通带与主腔纵模选取

在主腔和两个辅腔腔长都已经确定的情况下, 由于单 OC 辅腔通带很宽, 级联复合腔的谐振通带带宽主要是由双 OC 辅腔决定的, 利用双 OC 环形谐振腔的窄带滤波特性, 选取双 OC 辅腔合适的耦合比, 得到合适复合腔的谐振通带带宽, 如谐振通带带宽过大, 会造成通带内有多个主腔纵模, 容易产生模式竞争和跳变, 产生主腔 FSR 一倍或几倍的跳模。如谐振通带过窄, 当纵模形成振荡后, 如果外面有扰动可能就会造成, 单纵模偏出谐振通带, 以及频率漂移也会造成纵模偏移, 会造成其它通带内的纵模占据优势, 从而在它处起振产生几百 MHz 或 GHz 量级的跳模。所以选择复合腔通带带宽为 1-2 倍的主腔纵模间隔, 以保证总是有一个优势纵模可以起振, 同时又不会形成通带内的模式竞争, 形成单纵模振荡, 如图 2-14 所示, 并且此时对频率漂移有一定的容忍度, 在一定频率范围内的漂移都不会导致跳模, 从而抗环境干扰能力强, 能够保证激光器稳定无跳模的单纵模运转。

2.5 本章小结

本章首先从激光器基本的模式选择原理出发, 然后分析了选模机制, 对模式竞争以及跳模机制进行了深入的研究, 又从理论上推导了光纤环谐振腔的传输矩阵, 通过模拟其中两种不同类型光纤环形谐振腔的输出光谱特性, 比较两种光纤环的不同特点, 为单纵模的稳定性寻找理论解析, 得出有窄带特性辅腔对激光器单纵模的稳定性起到了关键的作用。通过级联这两种不同类型的辅腔扩大通带间隔结合 FBG, 选出单纵模, 并进一步研究了 FBG、主腔和辅腔的长度、两辅腔长度比, 以及窄带辅腔耦合比的大小对选取单纵模的影响, 以及可能出现跳模的位置, 通过设计辅腔耦合比优化谐振通带带宽以保持单纵模的稳定性, 并分析了通过设计辅腔长度使扩大的通带间隔与 FBG 带宽的关系对调谐过程中单纵模稳定性的影响, 在此基础上, 提出了优化后的实验结构方案。

第3章 测量系统及跳模检测

单纵模 (SLM) 光纤激光器由于其优秀的超窄线宽特性, 在激光雷达, 光纤传感, 激光相干测距和光谱检测等领域有极其广泛的应用前景。随着这些应用技术的发展, 对光源线宽的要求也越来越高。但是激光器的跳模作为一种随机噪声是影响激光器性能的重要因素, 各种结构的光纤激光器都无法完全避免由于激光器长时间工作出现的偶发跳模。而跳模将破坏单纵模光纤激光器原有的高相干性, 并增大采用该激光器测量系统中的相位噪声, 间接导致了各种光学检测系统性能的下降。跳模对单纵模光纤激光器影响可以分为以下两个方面, 一是跳模的结果对激光器性能的影响, 二是跳模的过程对激光器性能的影响。因此对跳模的检测和消除也是重要的。

在进行激光线宽测量前, 首先使用光谱仪测出激光的中心波长。对激光线宽进行测量的方法主要有: (1) 相干长度测量法, 对于线宽很小 (kHz 量级) 的光源, 则因相干长度太长在实际光路中很难实现; (2) 外差法, 可以得到很高分辨率, 但对光源频率稳定性有很苛刻的要求; (3) 自零差法, 降低了对光源稳定性的要求, 同时具有较高的分辨率; (4) 扫描 F-P 干涉仪法, 扫描干涉仪测得纵模, 可以从示波器上读取纵模的宽度和间隔。但是由于干涉仪精细度的限制, 其分辨线宽在几十兆赫。扫描后的纵模线宽为激光实际线宽和干涉仪分辨线宽的卷积, 当实际线宽小于干涉仪的分辨线宽时, 测量得到的线宽将是仪器的分辨线宽^[50]。本章主要介绍扫描干涉仪的设计和测量方法以及对论文所设计激光系统的模式进行测量。

3.1 Fabry-Perot 扫描干涉系统

由于一般地光谱分析仪最小分辨率为 0.06nm, 不能分辨单纵模, 即使是高级的光谱分析仪, 例如 AQ6319, 其最小分光谱分辨率只能达到 0.01nm。本实验中采用的是 Thorlab 公司扫描式 Fabry-Perot 干涉仪 (SA-200-12B), 它常被用于检查连续光激光器的光谱特性的精细结构。这种干涉仪的精细度高于 200, 自由光谱范围 (FSR) 为 1.5GHz。通过用压电换能器产生周期性电压改变谐振腔长

来扫描光谱特性，超稳定无热化腔体可以避免热效应带来的腔长变化，然后通过示波器或数据采集卡显示或记录。

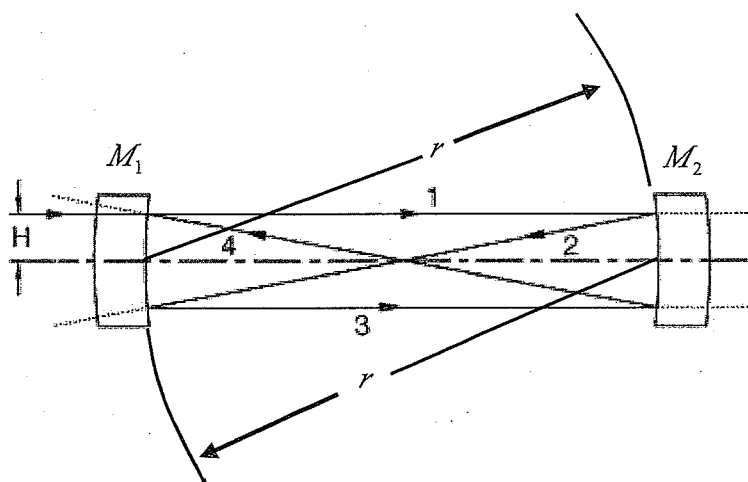


图 3-1 曲率半径为 r 的两个球面反射镜构成的光学谐振腔示意图

如图 3-1 所示，它的核心部件是由两个基本相同的球面反射镜 M_1 、 M_2 构成的光学谐振腔，两个球面反射镜之间的距离与它们的曲率半径相同，它们间距为 r （约为 50mm）。这种结构叫做共焦 Fabry-Perot 谐振腔，腔内不同模式有相同的谐振频率即模式简并是共焦腔的一个特点，所以称它是一种模式简并的共焦腔，这种简并的共焦腔不需要严格匹配谐振腔和输入信号的模式，能够大大简化仪器的准直过程。

两个球面反射镜的外凸面镀有一层宽带增透膜，内凹面镀有一层高反膜，为了消除透镜效应，外凸面的曲率半径与内凹面的曲率半径也是相同的。如图 2 所示为该共焦腔中一束轴外光线射入腔内后在腔体内一个完整的往返传播过程。由图中所示的光线轨迹可以看到，由于腔体对入射光的准直性不太敏感，即使离轴的入射光束与 F-P 腔的光轴不平行，光束也能在腔体内传播一个来回，总光程大约为 $4r$ ，当光束以高度 H 进入共焦腔，光束传播路径分别编号为 1、2、3 和 4；然后光线又会被反射回路 1。光线在共焦腔中传播一个往返所经过的总光程 L 大约可以表示为 $L = 4r$ 。

对于普通的双平面的 Fabry-Perot 谐振腔，光在腔中一个周期往返传输距离为 $2r$ ，它的自由光谱范围为 $FSR = c/2r$ ，其中 r 为反射镜的间距， c 为光在空气

中的传播速度。因此当 $0 < H \ll r$ 时, 共焦腔的有效 FSR 大约是一个双平面谐振腔的一半即 $FSR = c/4r$ 。需要注意的是当 $H = 0$ 并且输入光与共焦腔的轴线平行时, 此时往返传输距离为 $2r$, $FSR = c/2r$ 。

由于光在 Fabry-Perot 共焦谐振腔中传播的实际光程是由 H 决定的, 谐振条件将随着输入光束入射位置的改变而改变。在使用 Fabry-Perot 干涉仪时, 这种与入射光位置的有关变化是需要重点考虑的。为了得到 Fabry-Perot 干涉仪的分辨率与光束入射高度 H 之间的关系表达式, 就必须加入校正球差的几何光程长度的项。修正之后, 当 $0 < H \ll r$ 时, 光程长度改写为

$$L = 4r - H^2/3r^3, \quad (3-1)$$

实际上只要 H 比较小, 光程长度表达式中的第二项远就会小于光的波长, 离轴入射光束就可以看作为同轴入射光束, 基于同样的原因, 当入射光束直径过大时, 也会造成入射光位置的差异, 此时式 (3-1) 中的第二项也限制了入射光束的直径。

对于 Fabry-Perot 谐振腔的干涉仪, 一般用锐度来衡量分辨紧密相邻的两条光谱的能力大小。干涉仪的最小分辨率是根据泰勒判据给出的, 根据泰勒判据, 对于两条待分辨的等强度谱线, 它们叠加后的光强曲线中心点的强度应与原来的单条谱线的强度相等 (见图 3-2)。

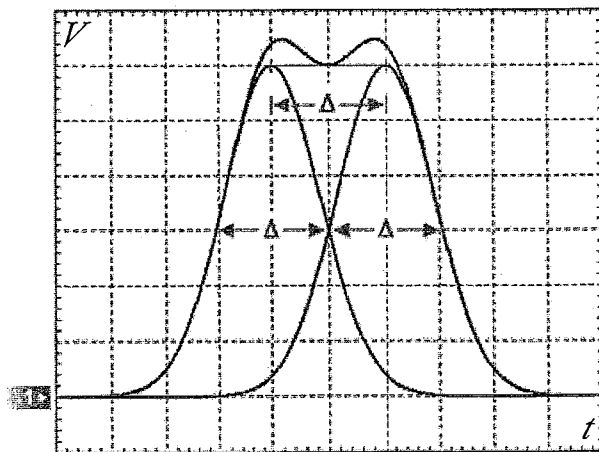


图 3-2 根据泰勒判据, 若能恰好将两条相同的叠加的高斯线形谱线分辨出来, 谱峰间距应该是谱线的半高全宽, 如曲线中所示。

干涉仪的锐度定义为 FSR 与 Δ 的比值, 其中 Δ 为是谱线的半高全宽。根据泰勒判据, 两条恰好能分辨开的谱线间距为 Δ 。因此, Δ 也可以用来衡量系统的分辨率, 干涉仪锐度可以写为 $F = \text{FSR} / \Delta$ 。因谐振腔多光束干涉的透射峰精细度为 $F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R^2}$, R 为镜面反射率, 反射率越高精度越高, 干涉仪锐度越大, 能分辨的 Δ 间距越小, 干涉仪分辨率越高 $\Delta = \frac{\text{FSR}}{F}$ 。待测激光光源线宽必须小于 F-P 干涉仪的一个 FSR。

Fabry-Perot 谐振腔中两反射镜的反射率可以做到很高 (99.4% 以上), 精细度可以达到 200 以上, 此时在干涉仪共焦腔 FSR 为 1.5GHz 时, 分辨率为 7.5MHz。由于共焦 FP 谐振腔需要改变 $\lambda/4$ 的长度来从一个驻波干涉分布转换到另一个驻波干涉分布, 从而产生干涉分布的整体平移, 只有满足干涉条件的光才能过腔, 共焦 F-P 腔就起到非常窄的带通滤光片的作用, 对于真实的连续光谱的输入光而言, 平移效应将表现为透射谱线形的移动, 由于光束未校准或光束直径过大将会导致透射谱线形展宽或不对称, 反射镜不平整会引起线形的对称展宽, 以上因素都会引起精细度的下降, 使系统分辨率降低。

压电换能器由 SA201 控制器驱动, SA201 控制器产生重复扫描腔长所需的锯齿波或三角波电压, 通过周期性改变 F-P 腔的长度, 可以调谐振腔的透射光频率, 当腔长改变量大于 $\lambda/4$ 的长度时, 就能扫过干涉仪的一个自由频谱区, 以保证在任意频率处的光信号都能被扫描到, 透射光的强度用光电二极管测量, 信号由 SA201 中的跨阻抗放大器或等价的放大器进行放大, 然后通过示波器或数据采集卡进行显示或记录。

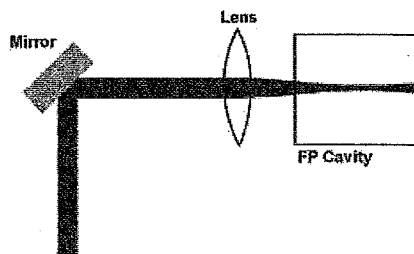


图 3-3 光束准直装置光路示意图

实际实验中, 将共焦 FP 干涉仪安装在标准的可调镜座上, 然后放置在笼式共轴系统组件后的自由空间光束中, 光纤出射的光经过扩束器扩束后通过调整笼式共轴系统中的反射镜和可调镜座对腔体进行对准, 调整笼式共轴系统中的反射镜使光通过透镜中心, 调整透镜位置使焦点位于腔体中心, 即透镜到腔的距离与腔长一半之和为透镜的焦距, 这样可在腔体的中心可以形成具有指定直径的束腰。图 3-3 所示, 扫描腔体时, 反复调节反射镜和 F-P 干涉仪的位置, 通过示波器观察透射光强度, 直到确认腔体与入射光束对准。

图 3-4 为 SA-200-12B 扫描式 Fabry-Perot 干涉仪工作波长为 1275-2000 纳米, 自由光谱范围为 1.5GHz, 精细度大于 200, 典型值 250, 分辨率 7.5MHz, FP 腔体的入射孔径为 600 μm , 如果光束直径超过入射孔径, 干涉仪系统的分辨率将会降低。

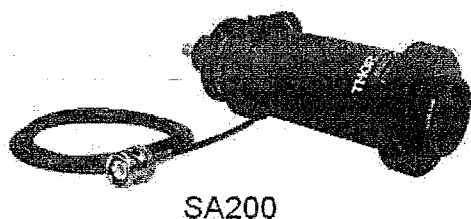


图 3-4 SA-200-8B 扫描式 Fabry-Perot 干涉仪

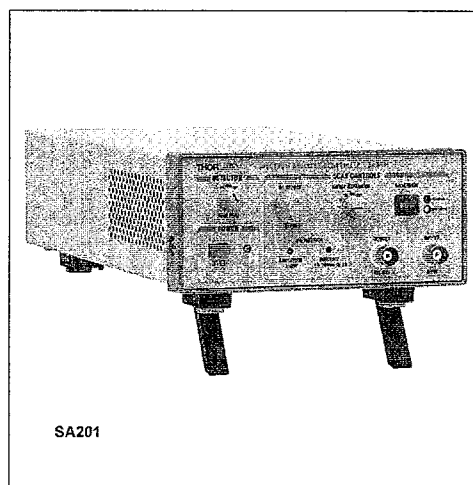


图 3-5 SA201 控制器

图 3-5 所示为 SA201 控制器是专门设计的通过产生高稳定性, 低噪声的斜坡电压信号来控制 Thorlabs 公司的 Fabry-Perot 干涉仪。该斜坡电压信号用来周期性控制干涉仪腔体的两块反射镜的空间距离。控制器有 115 或 230V 可选择的交流电压输入, 提供斜坡电压及扫描时间的调整, 可以选择扫描范围及速度, 并提供偏置电压控制使示波器上的光谱向右或向左移动。SA201 控制器的另一个特性是增加斜坡信号长度的校准过的放大能力, 可放大 1 倍, 2 倍, 5 倍, 10 倍, 20 倍, 50 倍与 100 倍, 这样就可以实现极宽范围的扫描时间。SA201 也含有用来监测腔体透射率的高精度光电探测器放大电路。放大器提供了可调节的互阻抗增

益：10 kV/A，100 kV/A 和 1 MV/A，用来驱动高阻抗负载，如示波器。应用控制器输出的同步信号，可以用示波器来显示输入激光的光谱。电压信号波形有锯齿波和三角波可选，探测器电路中加入了一个消隐电路，以用来消除光电二极管对锯齿波下降沿的响应。图 3-6 为整个测量系统装置示意和实物图。

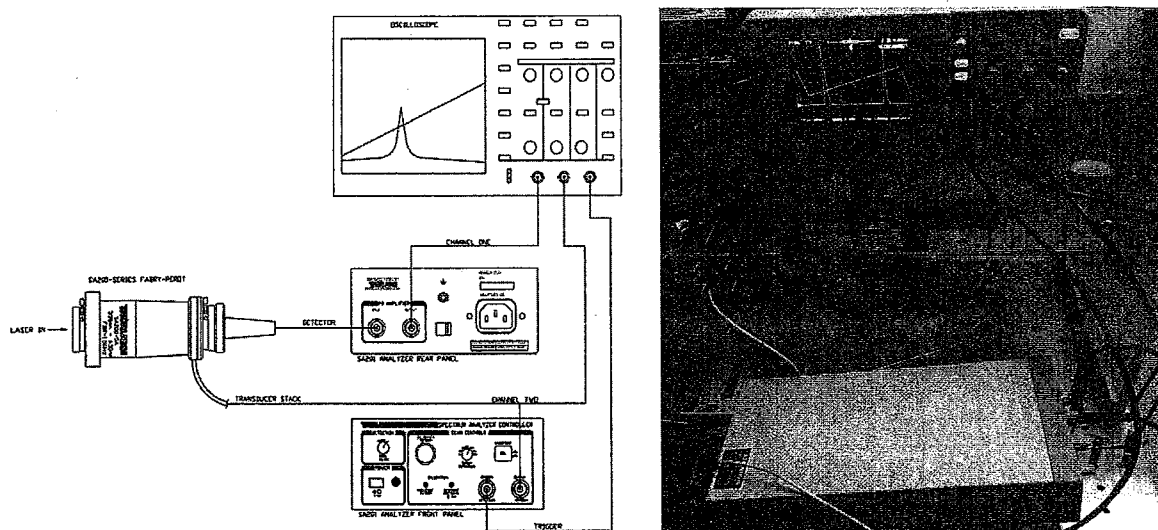


图 3-6 用 F-P 干涉仪测量激光光源的光谱特性的系统装置示意图（左），实物图（右）

3.2 激光线宽测量系统

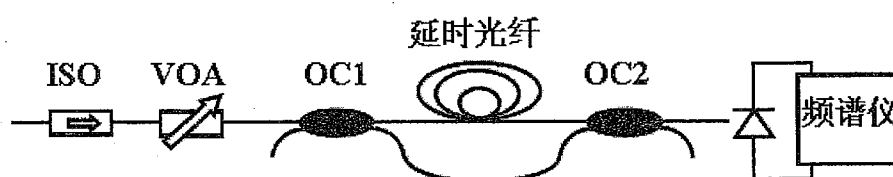


图 3-7 实验室搭建的基于光纤延时零拍法的线宽测量系统

虽然 F-P 干涉仪可以很好的检测跳模，但是由于精细度限制无法分辨 MHz 量级以下的线宽，显然无法对 kHz 量级光谱线宽进行测量，因此需要利用实验室自行搭建的基于光纤延时零拍法原理的激光线宽测量系统对激光线宽进行测量。

1980 年 Okoshi 提出的延时自外差干涉法目前已经广泛应用于激光器线宽的测量，它实际上就是对直接外差测量法的改进，利用光纤耦合器件和普通单模光纤作为主要部件，以马赫—曾德干涉仪为原理搭建，利用双光路干涉原理实现了

光谱线宽的自外差测量。与传统由分光镜和透镜等组成的空间光路相比,设计难度大大降低,系统精度也有效提高。因此基于光纤干涉仪的线宽测量系统得到了实际的应用。相比延时自外差干涉法减少了声光调制器损耗,灵敏度增加,测试系统如图 3-7 所示。延时自零差的基本原理是利用干涉仪把光的频率噪声转换为强度噪声其关键是把被测激光器的一部分光作为本地振荡本地振荡即为参考激光参考激光经过光纤延迟线延时另一部分作为信号光直接传输从延迟的与非延迟的光波之间产生的拍频信号确定出激光器线宽测量。单纵模激光本身可以看做是一个振幅稳定相位有一定扰动的准单频光,相位扰动造成频谱的展宽,与另一路经过延迟的光相干合成后,相位的扰动将转化为强度噪声,反应为相应的光电流频谱展宽,经过相关函数关系换算就可得到实际激光线宽,零拍拍测得的电流谱线宽是实际激光线宽的 2 倍。

由实验室自行搭建的基于马赫-曾德光纤干涉仪和频谱仪(Agilent E4402B,最小分辨率为 10Hz)构成的零拍法激光线宽测量系统,马赫-曾德光纤干涉仪由 2 只 3dB 光纤耦合器构成,所用光纤延迟线为 50km。系统的装置原理如图 3-7 所示。待测激光经过隔离器后进入到测量系统中,然后经过一个中心波长为 1550nm 可调衰减器,对光功率进行衰减,这是考虑到每次测量的激光功率不相同,而光纤型光电二极管只能承受 1mw 以下的功率,要对输入光功率大小进行控制,以确保不损坏光电二极管。光经过可调衰减器之后由 2x2 单模光纤耦合器 OC1 进行分束,一路光经由延时光纤后与另一路无延时的光纤通过 3dB 的 2x2 单模光纤耦合器 OC2 进行合束。延时光纤为长飞的 G652 通信光纤,总长度为 50.4Km,在 1550 波段传输损耗为 0.19dB/Km,因此经过延时光纤后损耗为 9.6dB,即经过延时光纤后功率下降为原来的 0.11 倍,若要保证两路进入 OC2 的光功率相等,就要选取 OC1 的耦合比为 90: 10。90%的端口接在延时光纤上,10%的端口直接由 OC1 输出进入 OC2。激光器波长在 1550 波段,所以选用 InGaAs 探测器,它可测范围为 900nm-1600nm。又因为实验中激光是光纤输出,所以采用 FC/PC 接口的 PIN 型光电探测器,它有相对可靠的光电流曲线,灵敏度为 0.9A/W,带宽为 1.5GHz,最高输入光功率为 1mW。测量系统的频谱仪的是 Agilent 公司型号为 E4402B 的频谱分析仪,它的可测带宽为 3KHz-3.0GHz,考虑到待测激光线宽量级很小,在频谱仪上安装了两个模块为 E4402B-1DR 和 E44028-UKB,分

别实现了 RBW 为 10Hz，以及扩大带宽为 100Hz-3.0GHz，以提高分辨率和扩大测量带宽。并且为增强抗干扰性和系统稳定性，在测量系统下面添加了泡沫板上面罩了透明罩用来消除震动和声波对光纤长度的影响。最终得到线宽测量系统的测量精度可以达到 2KHz，系统装置如图 3-8 所示。

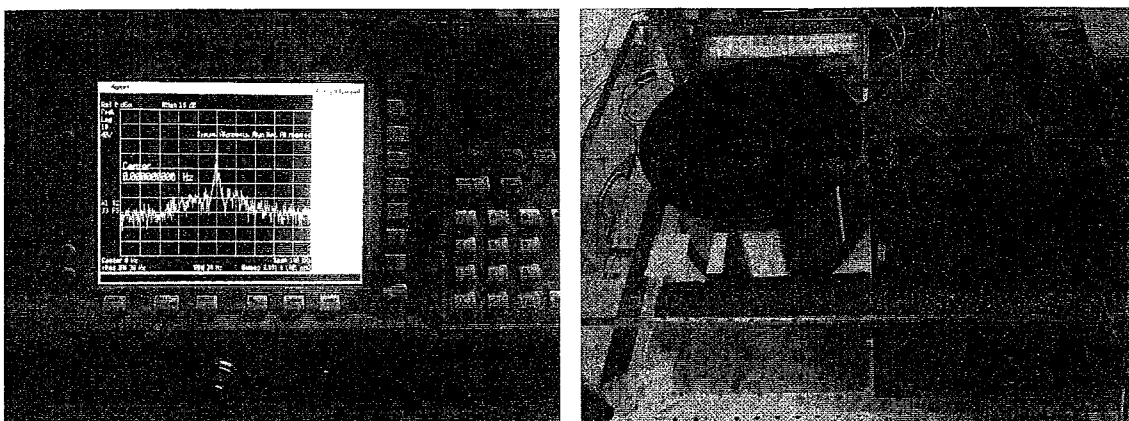


图 3-8 激光线宽测量平台：频谱仪（左），马赫-曾德光纤干涉仪（右）

3.3 跳模检测方法

目前观测和分析光纤激光器的纵模，以及分辨激光是否为单纵模的方法主要为扫描干涉仪法和自零差法。

采用激光扫描 F-P 干涉仪检测激光纵模比较方便直观，特别是在观测模式数量（确定单纵模）、确定偏振特性及模式竞争中有不可替代的作用^[51-52]。其最高分辨率能达到 1-10MHz，可以分辨出主腔为 7 米的环形腔（对应的纵模间隔为 30MHz）中的纵模，不足之处在于扫描周期较长，无法保持检测的实时性与连续性。

同一时刻只有当被测激光满足 F-P 干涉仪无源腔谐振频率的那些光信号才能通过，即 F-P 干涉仪自由光谱范围的整数倍：

$$\nu = nFSR = n \frac{c}{4r}, (n \text{ 为正整数}) \quad (3-1)$$

所有满足这个频率条件的光都可以通过，在谐振腔后部的光电转换器产生电信号，从而在示波器上显示信号强度，而不满足这个频率条件的激光束无法透过干

涉仪，在示波器上没有相应信号，当压电控制器改变腔长时，所有透射通带都在移动，总有一个腔长使得频率 $\nu_0 = mFSR_0$ ，这时光会透过干涉仪在示波器上显示对应位置，此时可能还有另一频率的光，

$$\nu_1 = (m+x)FSR_0, \quad (3-2)$$

x 为整数， m, n 相对于 x 都是很大的数，也满足条件，因此在干涉仪有光透过时并不能得知光的确定频率和模式个数，因为所有相差为一个 F-P 腔 FSR 频率的光都可以通过扫描干涉仪，并在示波器上留下的通光位置是重叠的。

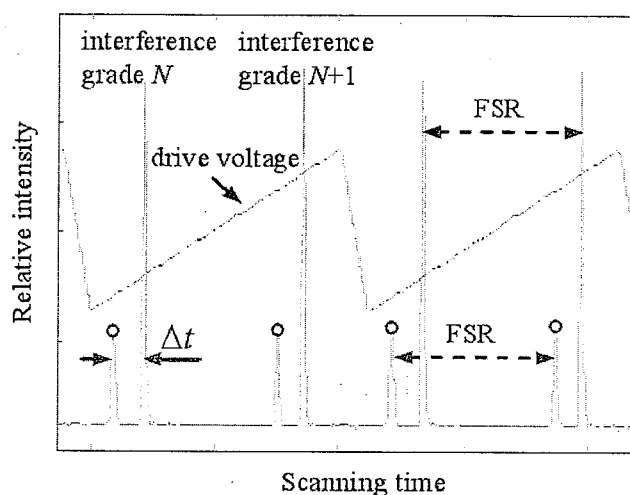


图 3-9 有两个纵模通过扫描型 F-P 干涉仪形成的干涉谱线

如图 3-9 所示，F-P 干涉仪可以测量纵模间的频差以分析精细光谱，光强较小的为待测跳模，较大的为现在占优势光强较强的纵模对应的信号。若现在光频率为 ν_0 ，假设它们现在处在干涉仪的同一级自由光谱范围内，即频率差小于一个 FSR，也即扫描过一定长度后腔长增加 Δr ，随着 F-P 腔长的增加，FSR 变小，能透过 F-P 腔的同级数谐振光的频率越小。频率差为 $\Delta\nu$ ，F-P 腔长为 r ，则待测模式的频率 $\nu_x = \nu + \Delta\nu$ ，谐振时有：

$$\nu_x = \nu_0 + \Delta\nu = n \frac{c}{4(r - \Delta r)}, \quad (3-3)$$

与式 (3-1) 两式相减得，

$$\Delta\nu = n \frac{c}{4(r - \Delta r)} - n \frac{c}{4r} = n \frac{c\Delta r}{4r(r - \Delta r)} \approx n \frac{c \cdot \Delta r}{4r \cdot r} = \nu_0 \frac{\Delta r}{r}, \quad (3-4)$$

若跳模频率与现有纵模频率之间的扫描时间差为 Δt ，一个干涉仪的 FSR 对应的扫描时间间隔为 T_0 ，由于锯齿波电压的扫描周期即扫描时间间隔 Δt 与腔长改变量是线性关系的^[53]，因此：

$$\Delta\nu = \nu_0 \frac{\Delta t}{T_0}, \quad (3-5)$$

由式 (3-2) 的分析可知，当实际上它们光的频差大于一个 FSR 时，则无法测量频差的绝对值，而是否大于一个 FSR 也是未知的，因此 $\Delta\nu$ 的表达式为：

$$\Delta\nu = \Delta\nu \pm xFSR, \quad (3-6)$$

也就是当示波器显示一个光频位置时，对应的理论上光频率有无数个，但是环形腔激光器本身的光纵模频率为 $\nu_L = q \frac{c}{nl}$ ，要出现上述现象必须要同时满足 F-P 干涉仪的谐振频率即： $\nu_{Lasr} = q \frac{c}{nl} = n \frac{c}{4r} = nFSR$ ，在只有少数纵模起振的情况下，恰好出现示波器上只有一个纵模而实际上是两个纵模的概率很小。

因此，F-P 干涉仪可以很好的监测 10MHz 以上的纵模改变，而自零差测量系统受所采用 PIN 型光电探测器限制，只能检测到 3GHz 以内的模式变化。即使有上述情况发生，也可以结合自零差线宽系统显示的跳模位置，判断满足 $\Delta\nu$ 的跳模是否在 3GHz 以内，由于自零差测量系统可以实现 2KHz 的线宽测量，同时结合这两种系统就可以实现对激光器单纵模稳定性，激光线宽，跳模位置的监测。

3.4 本章小结

本章主要分析了 F-P 扫描干涉仪的检测原理和结构装置，并简单介绍了实验室搭建的自零线宽测量系统，明确了每种方法的测量范围，讨论了检测方法，为进一步验证跳模机制提供了重要的理论数据，为下面将进行的实验对比中跳模规律的测量提供了技术保证。

第4章 单纵模光纤激光器稳定性研究

在第二章中我们已经分析了采用复合环形腔单纵模光纤激光器的结构中,单纵模的选择是通过 FBG 和辅腔相结合来实现的。经理论计算,我们发现双 OC 环相比单 OC 环有着较高的精细度和较窄的谐振通带,因此当将这两种环级联起来作为辅腔时,双 OC 环的窄带特性对激光器单纵模的稳定性起到了关键的作用。第三章中讨论了 F-P 干涉仪和线宽测量系统的检测方法和范围,以下我们就对双 OC 环辅腔的稳定性进行实验验证。

4.1 辅腔对单纵模稳定性影响

由上一章分析可以知道,环形腔结构可以有效避免空间烧孔效应,但由于环形腔较长,且掺杂光纤增益谱比较平坦,仅利用环形腔的腔长选模是困难的。首先采用光纤光栅进行限模,由于光纤光栅带宽一般只有 0.2nm,相对对 1.55 μm 的激光,其频率带宽为 25GHz,而环形腔的纵模间隔只有几十 MHz,就意味着其中仍可有近千个纵模在 FBG 带宽中存在,当环境噪声引起折射率的改变时,这些模式就很容易产生跳模,影响激光的稳定性。当被扩大的复合腔的有效纵模间隔与起限模作用的 FBG 的带宽相适应时便可选出单个纵模。所以可通过合适的设计单 OC 环以及双 OC 环的长度,扩大激光器的有效纵模间隔,在 FBG 的带宽内选出单个纵模。但是激光器的单纵模运转并不能仅以长度的设计来保证,因为当作为辅腔的 OC 环当满足谐振条件时,其谐振通带并非一条频率线,而是具有一定的宽度,宽度的大小是由谐振腔的精细度决定的,影响单纵模的选择以及激光器输出的稳定性。

据图 2-12 所示结构搭建的实验系统中,此时主腔长 6.8 米,对应的纵模间隔为 31MHz,选择单 OC 环长为 0.45m,对应的 FSR 为 460MHz,根据 Vernier 效应设计双 OC 环长为 0.56m,对应的 FSR 为 370MHz,此时扩大的通带间隔为 17GHz,与在 FBG 带宽(25GHz)相适应。由式(2-26)计算可以得到在双 OC 环中耦合器耦合比分别为 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 时对应的双 OC 辅腔谐振通带带宽分别为 77, 59, 43, 28, 14MHz。激光器输出端及所有器件的闲置端口都

加隔离器以消除端面反射，整个系统封装在隔震金属腔内以减小环境微扰影响，如图 4-1 所示。采用光谱分析仪（Agilent 86140B，最小分辨率为 0.06nm）检测其输出光谱，F-P 干涉仪检测（Thorlabs，SA200-12B，分辨率 7.5MHz）其单纵模特性，激光线宽则由实验室自行搭建的基于马赫-曾德光纤干涉仪和频谱仪（Agilent E4402B，最小分辨率为 10Hz）构成的自零差法激光线宽测量系统检测，输出功率由功率计（EXFO，FPM300）测量。

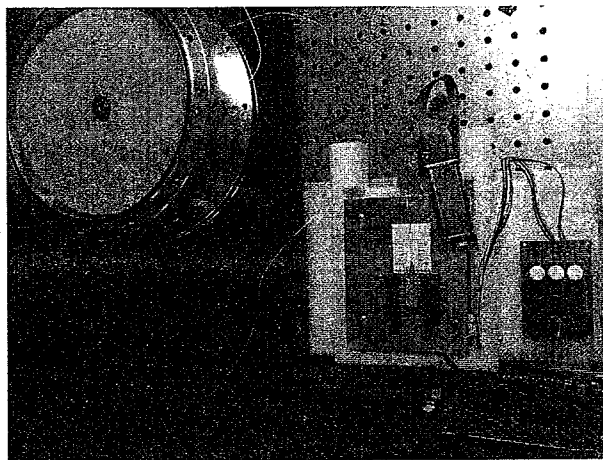


图 4-1 激光器光路封闭在隔震金属腔中

4.1.1 辅腔耦合比对单纵模稳定性的影响

在第二章中已经分析得出双 OC 辅腔耦合比改变对复合腔谐振通带的带宽有决定性作用，现在通过实验验证对单纵模激光器运转的影响，在改变耦合比的同时严格保持其它条件不变。在对比实验中，我们保持除双 OC 环耦合比之外的其它条件不变，更换不同耦合比的双 OC 环，进行稳定性观测。

当加入的双 OC 环耦合比小于 0.5 时，在零频附近的 31MHz 及其倍数频率处，总是有跳模出现，并且耦合比越小，跳模越频繁，稳定性越差，图 4-2 中即频谱显示为最典型的在 31MHz、93MHz 左右有跳模，干涉仪扫描结果显示也有多个位置有纵模出现。这是因为在小于 0.5 时，谐振通带已经大于 80MHz，相对于 31MHz 的主腔 FSR 过宽，通带内可以存在 2-3 个纵模，有可能造成了通带内主腔模式竞争，产生跳模。

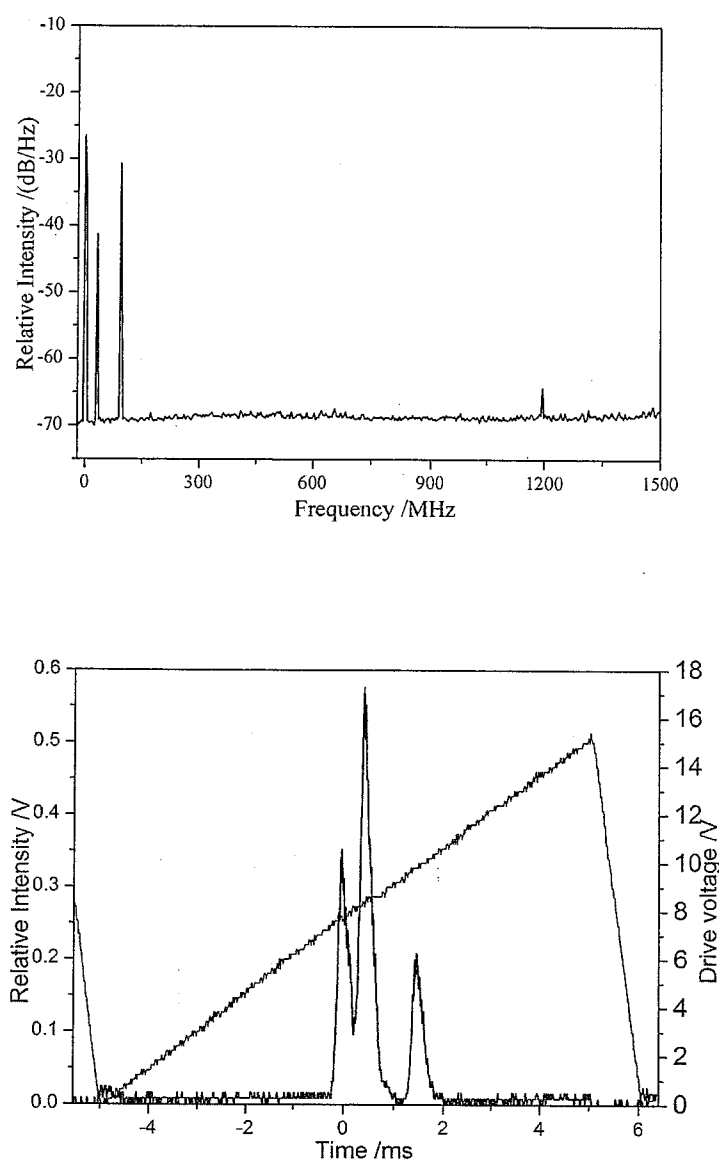


图 4-2 双 OC 环耦合比为 0.5 时频谱显示出现跳模的位置 (上), 干涉仪检测结果 (下)

当耦合比为 0.8, 0.9 时, 在 30MHz 跳模几乎消失, 图 4-3 给出了在 370, 460, 740, 920Mhz 等辅腔 FSR 的倍数频率处出现跳模的拍频图, 在耦合比为 0.9 时尤其严重, 这时谐振通带带宽只有 16MHz, 小于 31Mhz, 主腔纵模间隔, 说明谐振通带过窄, 容易受环境扰动影响, 造成纵模频率超出谐振通带, 而其它相对更好位置处的纵模起振形成跳模。并且激光器输出功率较低, 泵浦功率 180mW 时, 激光功率仅约 9mW, 远小于低耦合比时 20mW 以上的功率, 这是由于高耦合比的双 OC 环透射率对环损耗敏感, 造成整个激光腔损耗变化, 输出功率降低。

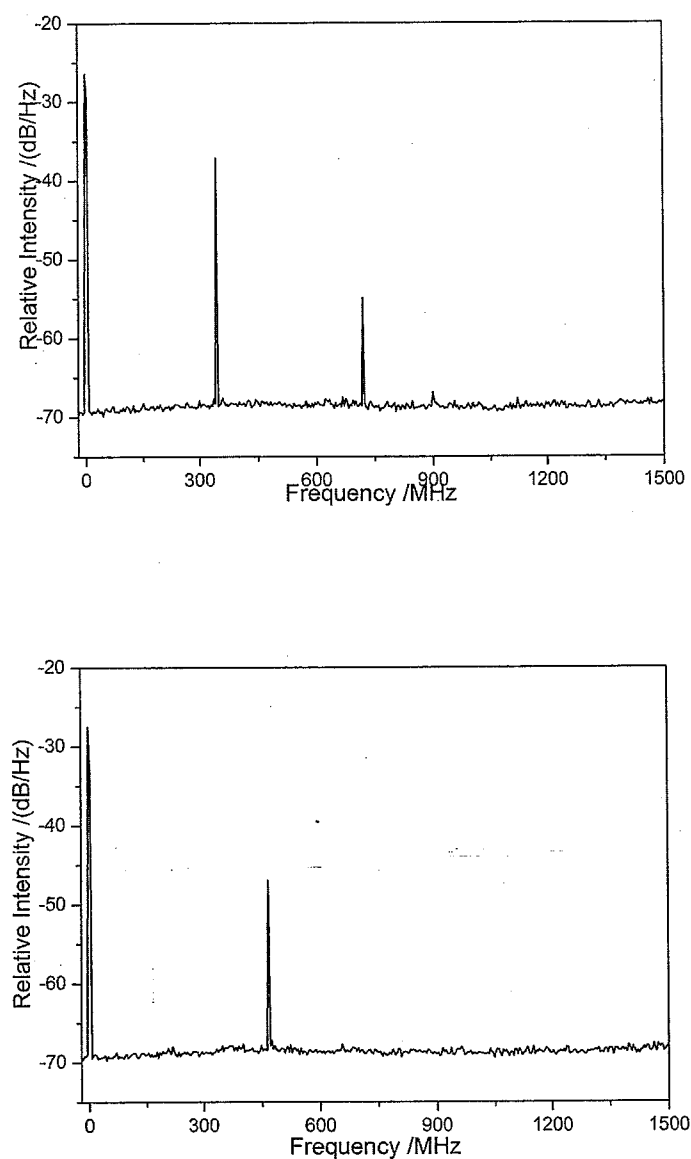


图 4-3 双 OC 环耦合比大于 0.8 时不同时刻频谱显示出现跳模的位置

当耦合比为 0.6 和 0.7 时，单纵模最为稳定，相对于耦合比为 0.6 时，耦合比为 0.7 的时候无跳模运转时间更长，可以达到 30 分钟无跳模，图 4-4 为在耦合比为 0.7 时的检测结果，左图是 FSR 为 1.5GHz 的扫描式 Fabry-Perot 干涉仪（Thorlabs, SA200）扫描结果，清晰地显示了单纵模特性，右图为频谱图，显示无跳模。且抗环境干扰能力更强，在人为施加扰动之后单纵模也能迅速恢复到未加扰动前的稳定状态，这是因为当耦合比为 0.7 时，谐振带宽恰好比主腔纵模

间隔稍大，总有一个纵模频率会在谐振通带内占据优势并起振，这时单纵模的稳定性也是最好的。

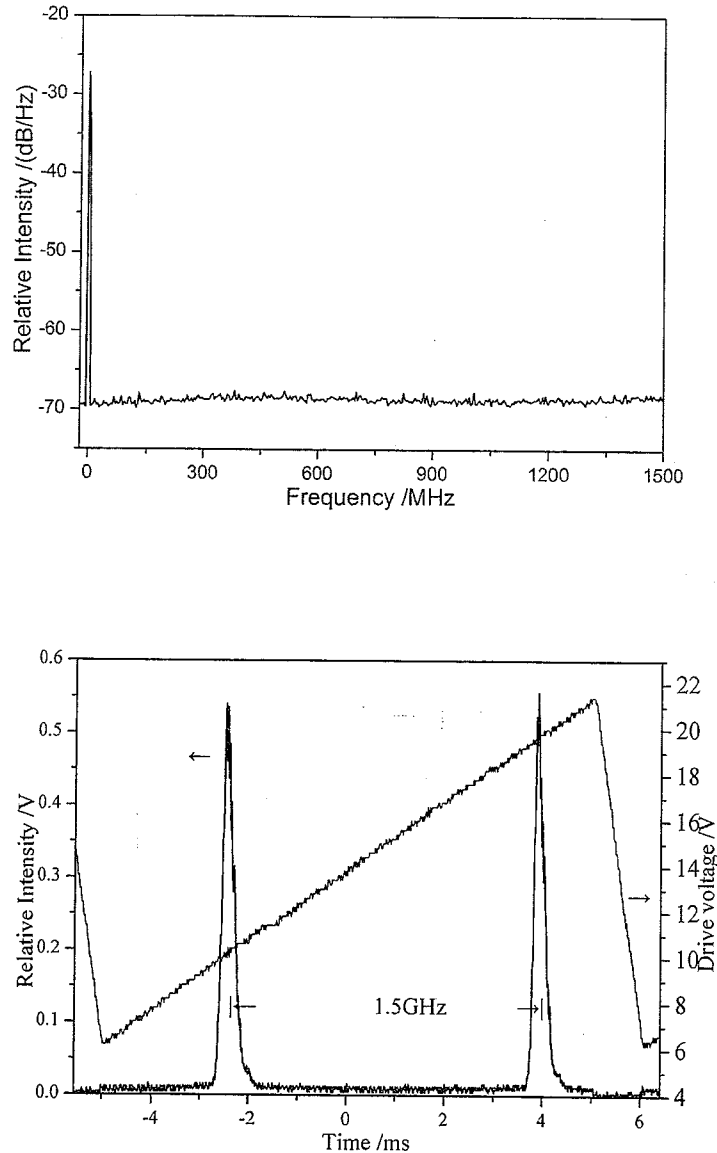


图 4-4 耦合比为 0.7 时频谱显示无跳模（上），干涉仪检测结果（下）

由此证实，当级联辅腔中有双 OC 环时，可以利用它优秀的窄带特性，通过双 OC 环的耦合比提升单纵模的稳定性。双 OC 环的耦合比为 0.7 时对应的 3dB 通带带宽为 46MHz，稍大于 31MHz 的主腔 FSR，恰好为 1-2 倍的主腔 FSR，为了验证这一点，接下来在将主腔腔长增加至 20 米，此时主腔纵模间隔为 10MHz 为，依计算得到的双 OC 环耦合比为 0.9 时通带带宽为 14MHz，通过实验发现此

时单纵模最稳定。因此,要确保有且仅有一个优势纵模在级联光纤环通带内就需要在特定主腔腔长下优化双 OC 光纤环的耦合比。最终得出,在主腔和两个辅腔腔长都已经确定的情况下,选取双 OC 辅腔合适的耦合比,使谐振通带带宽为 1-2 倍的主腔纵模间隔,可以实现稳定的单纵模运转。

4.1.2 辅腔长度对单纵模稳定性的影响

由环形复合腔的选模原理,根据复合腔 Vernier 效应设计两辅腔的长度使它们的最小公倍数与 FBG 的 3dB 带宽相适应,以便先取出一个谐振通带。下面就对此进行验证。

当环长度改变至 0.69m 时,复合腔 FSR 的最小公倍数为 6.9GHz,不到 FBG 3dB 带宽 (25GHz) 的一半,几乎在任何调谐位置都没有稳定的单纵模。并且大多数情况下干涉仪可以检测到 3 个模式,而自零差测量系统的频谱上没有对应的拍频,图 4-5 扫描结果显示有 3 个纵模可以起振,这是因为此时通带间隔为 6.9GHz,在 FBG 带宽内可能会有 3-4 个通带,而此时跳模发生在通带间,远大于自零差系统中采用的光电探测器 3GHz 的探测极限,因此光谱仪上没有显示出跳模的拍频(图 4-6),而 F-P 干涉仪就可以显示出大于 10MHz 的任意模式跳变。

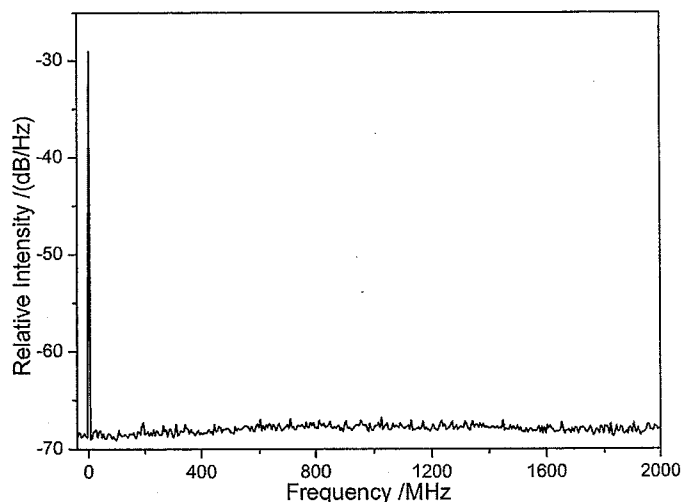


图 4-5 减小复合腔 FSR 时频谱仪检测结果

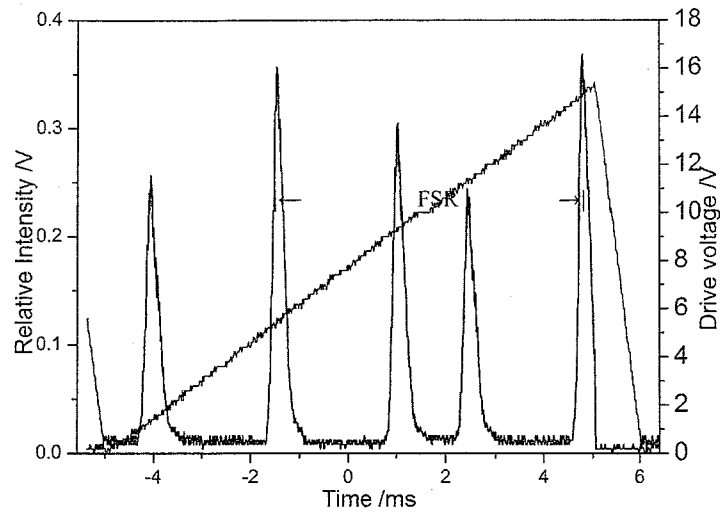


图 4-6 减小复合腔 FSR 时干涉仪检测结果

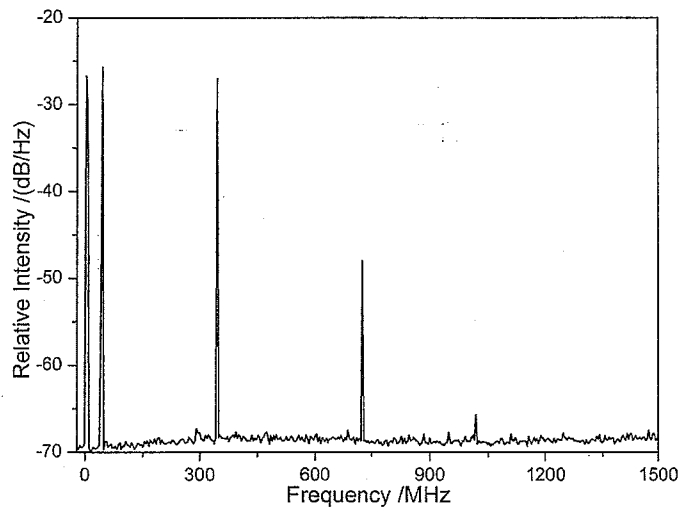


图 4-7 增大复合腔 FSR 时频谱显示结果

当双 OC 环长度为 0.36m 时, 复合腔 FSR 的最小公倍数为 42.6GHz, 大于 FBG 3dB 带宽, 单纵模不能在调谐到任意位置都保持稳定, 在某些位置很稳定, 在另一些位置, 当没有通带落在 FBG 3dB 带内时, 频谱显示噪声谱很多, 纵模变得很不稳定, 干涉仪也检测到出现有几个不同频率的模式。图 4-7 频谱显示在 30MHz 左右和几百 MHz 都有跳模出现, 图 4-8 为干涉仪某时刻内出现跳模的相对位置。这是因为有可能没有任何一个通带存在于 FBG 带宽中, 导致模式自由

竞争。因此，想要得到可调谐且稳定单纵模就要合适的设计两个光纤环的长度，使它们决定的通带间隔为 0.5-1 倍的 FBG 3dB 带宽。

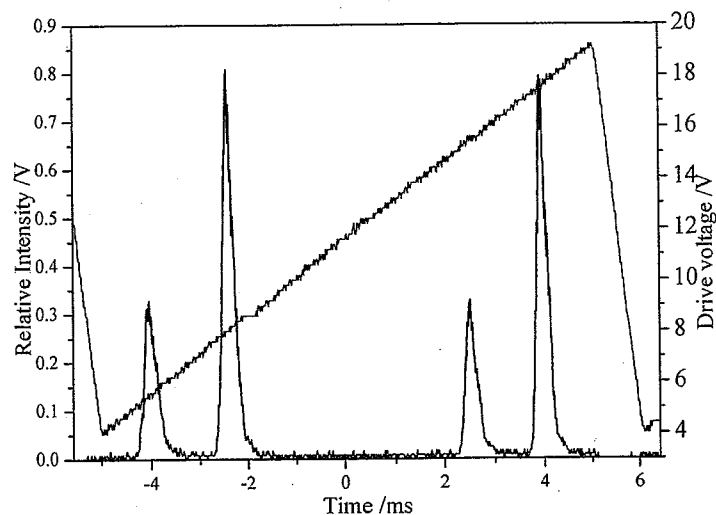


图 4-8 增大复合腔 FSR 时干涉仪扫描结果

因此，想要得到可调谐且稳定单纵模就要合适的设计两个光纤环的长度，使它们决定的通带间隔为 0.5-1 倍的 FBG 3dB 带宽。

4.2 可调谐的单纵模光纤激光器优化方案

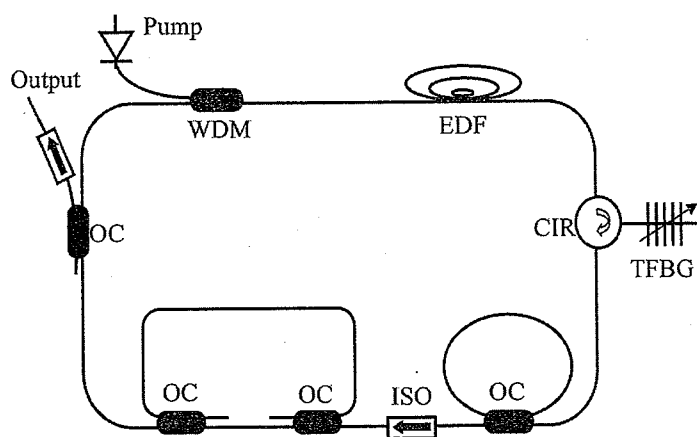


图 4-9 加入可调谐 FBG 的复合环形腔单纵模光纤激光器结构方案图

实验证明，通过合理地设计级联光纤环的长度使它们扩大的通带间隔为 0.5 到 1 倍的 FBG 3dB 带宽，同时优化双 OC 环中耦合器耦合比保证在被选中的级

联光纤环通带内只有一个优势纵模,有效地消除了相邻通带之间的模式竞争和通带内主腔纵模之间的竞争,实现单纵模振荡。据此设计的主腔腔长 6.8m,单 OC 环长为 0.45m,双 OC 环长为 0.56m、耦合比为 0.7,此时扩大的通带间隔为 17GHz,为 FBG 带宽 (25GHz) 的 0.68 倍,在此基础上加入可调谐的 FBG (TFBG) (图 4-10),得到图 4-9 所示的宽调谐稳定的单纵模复合环腔光纤激光器结构。

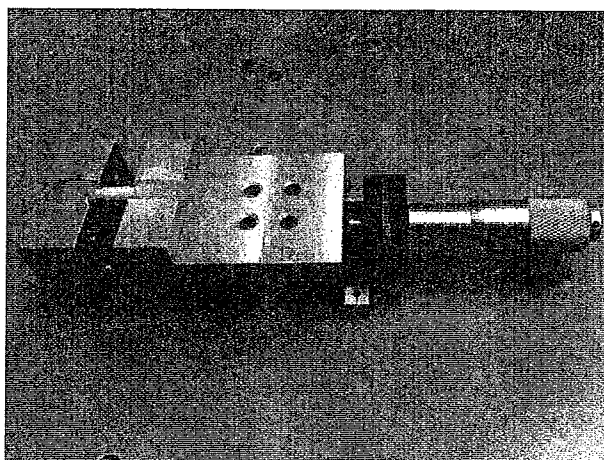


图 4-10 可调谐的 FBG

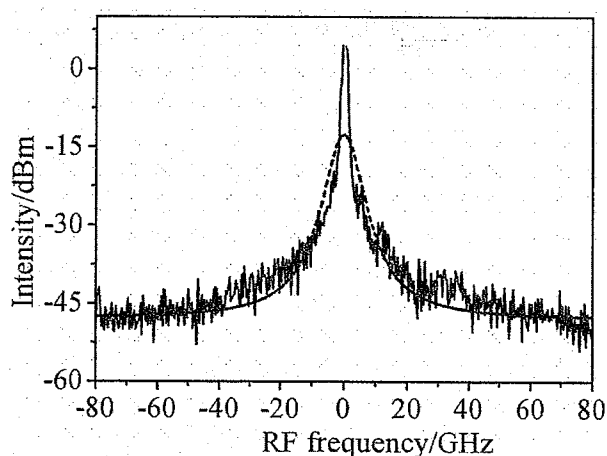


图 4-11 激光输出线宽特性

图 4-11 为最终得到经过洛伦兹线形模拟的光纤激光器的线宽拍频图,下降 20dB 时短期线宽小于 40KHz,受测量系统 2KHz 精度限制,得出实际线宽应该小于 2kHz。当泵浦功率为 180mW 时,激光输出功率约 26mW (图 4-12),30 分钟内输出激光的功率波动小于 0.4%。

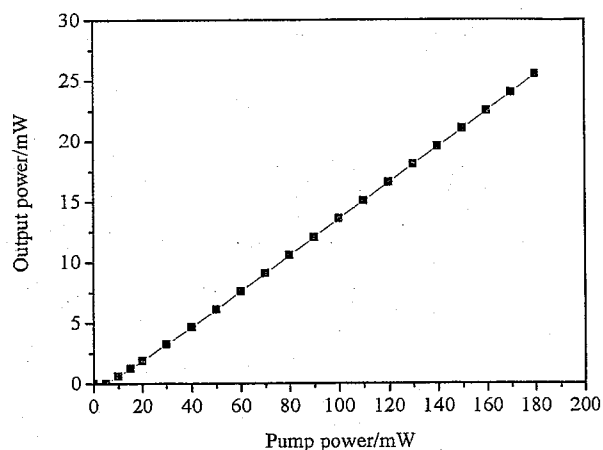


图 4-12 输出激光功率

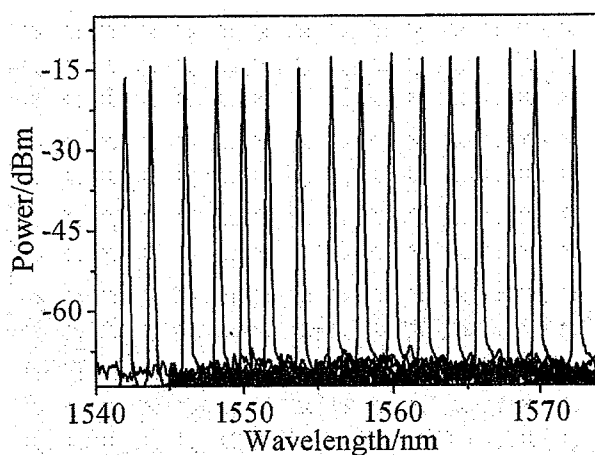


图 4-13 单纵模光纤激光器的宽带调谐特性

图 4-13 所示为光纤激光器的调谐特性。为泵浦功率为 180mw 时使用 FBG 进行波长调谐时的输出光谱，可见激光器波长能在 1542-1572nm 范围内调谐，仅受限于使用的 FBG 的调谐范围，整个调谐范围内边模抑制比 SMSR 均大于 50dB。

4.3 本章小结

本章对级联单 OC 光纤环和双 OC 光纤环作为辅腔的宽调谐单纵模掺铒光纤激光器进行稳定性的优化研究，根据第二章中提出的设计原则，实现了稳定的单纵模激光输出，并利用可调 FBG 实现了宽调谐且保持稳定的单纵模运转。当双 OC 环的耦合比为 0.7 时，在半个小时内没有观察到跳模，且当设计环的长度使级联环的通带间隔为 0.68 倍的 FBG 带宽时，可以实现在调谐到 1542-1572nm 范围内的任意波长时都保持稳定的单纵模。

第5章 总结与展望

单纵模窄线宽光纤激光器得到商品化产业化，并在光学传感，光学测量，相干通信，光谱学，非线性光学等方面得到广泛应用，随着对线宽的要求更高对单纵模光纤激光器的稳定性要求也更严格。本文针对环形腔光纤激光器如何获得稳定的单纵模激光输出问题，对谐振腔结构设计、纵模选择以及跳模检测抑制方法等展开详细的理论分析与实验研究。在实验室初步实现了单频输出的复合环形腔光纤激光器的基础上，分析了复合环形腔单纵模光纤激光器选模机制，通过模拟其中两种不同类型辅腔的通带特性，对模式竞争以及跳模机制进行了深入的研究，为单纵模的稳定性寻找理论解析。进一步研究了 FBG、主腔和辅腔的长度、两辅腔长度比，以及窄带辅腔耦合比的大小对选取单纵模的影响，以及可能出现跳模的位置，通过设计辅腔耦合比优化谐振通带带宽以保持单纵模的稳定性，并分析了辅腔长度对调谐过程中单纵模稳定性的影响，在此基础上，提出了优化后的实验结构方案。

利用自行搭建 F-P 扫描干涉仪系统和实验室已搭建好的线宽测量系统，并分析它们的检测原理，明确了每种方法的测量范围，为跳模规律测量和跳模机制分析提供了技术保证，实现了对光纤激光器单纵模运转状态的全面监测，为进一步分析跳模机制获得了重要的理论数据。最后在实验上对不同主腔、辅腔参数的情况下跳模位置和单纵模状态进行了对比和验证，对复合腔激光器的结构上进行了优化和改进，确定了使光纤激光器实现稳定单纵模运转的优化参数和设计原则，实现了稳定的单纵模激光输出，并利用可调 FBG 实现了宽调谐且保持稳定的单纵模运转。当双 OC 环的耦合比为 0.7 时，在半个小时内没有观察到跳模，且当设计环的长度使级联环的通带间隔为 0.68 倍的 FBG 带宽时，可以实现在调谐到 1542-1572nm 范围内的任意波长时都保持稳定的单纵模，输出功率达到 20mw，短期小于 2KHz。

还应在以下的几个方面有所改进，并最终形成性能优良、可靠性高的激光器。

- 1) 进行更完善指标参数测试，如边模抑制比 (SMSR)、强度噪声 (RIN) 等。

- 2) 通过优化设计, 改进腔形结构, 进一步提高输出线宽指标, 提高模式的稳定性。
- 3) 采用全保偏器件, 或采用更好的封装, 提高环境适应能力, 完善电路及输出显示模块和调谐功能, 提升易用性。
- 4) 在实现初步放大的基础上, 对放大器进行优化, 研究放大的单频特性, 进一步提高输出功率。

参考文献

- [1] Hill K O, Malo B, Bilodeau F, et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask[J]. Applied Physics Letters, 1993, 62(10): 1035-1037.
- [2] Voraberger H, Ribitsch V, Janotta M, et al. Application of mid-infrared spectroscopy: Measuring hydrogen peroxide concentrations in bleaching baths[J]. Applied spectroscopy, 2003, 57(5): 574-579.
- [3] Shah R Y, Agrawal Y K. Introduction to fiber optics: Sensors for biomedical applications[J]. Indian journal of pharmaceutical sciences, 2011, 73(1): 17.
- [4] Miyajima Y, Komukai T, Sugawa T, et al. Rare earth-doped fluoride fiber amplifiers and fiber lasers[J]. Optical Fiber Technology, 1994, 1(1): 35-47.
- [5] Mynbaev D K, Scheiner L L. Fiber-optic communications technology[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- [6] Wyatt R. High-power broadly tunable erbium-doped silica fibre laser[J]. Electronics Letters, 1989, 25(22): 1498-1499.
- [7] 郭玉彬, 霍佳雨. 光纤激光器及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008, 1: 12~15, 85~89.
- [8] Fu Z H, Wang Y X, Yang D Z, et al. Single-frequency linear cavity erbium-doped fiber laser for fiber-optic sensing applications[J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(8): 594.
- [9] Zyskind J L, Sulhoff J W, Sun Y, et al. Singlemode diode-pumped tunable erbium-doped fibre laser with linewidth less than 5.5 kHz[J]. Electronics Letters, 1991, 27(23): 2148-2149.
- [10] 杨石泉, 丁镭, 袁树忠, 等. 几种新型多波长光纤激光器[J]. 光通信技术, 2002, 26(1): 42-45.

- [11] Kashyap R, Armitage J R, Campbell R J, et al. Light-sensitive optical fibres and planar waveguides: Advances in optical technology[J]. BT technology journal, 1993, 11(2): 150-160.
- [12] 叶震寰, 楼祺洪, 薛东. 窄线宽光纤激光器进展[J]. 光学与光电技术, 2004, 2(1): 1-4.
- [13] 王天枢. 全光通信用高功率低噪声可调谐单频光纤激光器研究 [D]. 吉林大学, 2007.
- [14] Liégeois F, Vercambre C, Hernandez Y, et al. Pulsed high-peak-power and single-frequency fibre laser design for LIDAR aircraft safety application[C]//Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2006: 63670H-63670H-10.
- [15] Poulsen C V, Varming P, Pedersen J E, et al. Applications of single frequency fiber lasers[C]. Lasers and Electro-Optics Europe, 2003. CLEO/Europe. 2003 Conference on. IEEE, 2003: 617.
- [16] 梁迅. 光纤水听器系统噪声分析及抑制技术研究 [D]. 国防科学技术大学, 2008.
- [17] 马明祥, 杨华勇, 徐攀, 等. 抽运调制条件下超窄线宽掺铒光纤环形激光器的跳模特性研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 122-126.
- [18] 郭玉彬, 霍佳雨. 光纤激光器及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008, 1: 85~99
- [19] 伍波. 1.5 μm 掺铒窄线宽光纤激光器研究 [D]. 电子科技大学, 2007.
- [20] Ball G A, Morey W W, Glenn W H. Standing-wave monomode erbium fiber laser[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 1991, 3(7): 613-615.
- [21] Kogelnik H, Shank C V. Coupled - wave theory of distributed feedback lasers[J]. Journal of applied Physics, 1972, 43(5): 2327-2335.

- [22] Liu T, Yang Z M, Xu S H. 3-Dimensional heat analysis in short-length Er³⁺/Yb³⁺ co-doped phosphate fiber laser with upconversion[J]. Optics Express, 2009, 17(1): 235-247.
- [23] Kringlebotn J T, Archambault J L, Reekie L, et al. Er³⁺/Yb³⁺ co-doped fiber distributed-feedback laser[J]. Optics Letters, 1994, 19(24): 2101-2103.
- [24] Barnsley P, Urquhart P, Millar C, et al. Fiber Fox-Smith resonators: application to single-longitudinal-mode operation of fiber lasers[J]. JOSA A, 1988, 5(8): 1339-1346.
- [25] Zayhowski J J. The effects of spatial hole burning and energy diffusion on the single-mode operation of standing-wave lasers[J]. Quantum Electronics, IEEE Journal of, 1990, 26(12): 2052-2057.
- [26] Chang D I, Guy M J, Chernikov S V, et al. Single-frequency erbium fibre laser using the twisted-mode technique[J]. Electronics Letters, 1996, 32(19): 1786-1787.
- [27] Takushima Y, Yamashita S, Kikuchi K, et al. Single-frequency and polarization-stable oscillation of Fabry-Perot fiber laser using a nonpolarization-maintaining fiber and an intracavity etalon[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 1996, 8(11): 1468-1470.
- [28] Sabert H, Ulrich R. Gain stabilization in a narrow-band optical filter[J]. Optics letters, 1992, 17(16): 1161-1163.
- [29] Horowitz M, Daisy R, Fischer B, et al. Narrow-linewidth, singlemode erbium-doped fibre laser with intracavity wave mixing in saturable absorber[J]. Electronics Letters, 1994, 30(8): 648-649.
- [30] Lv C, Wang Z, Yun B, et al. Stable single frequency Er-doped all-fiber ring laser with fiber Bragg grating Fabry-Perot filter[J]. Chinese Optics Letters, 2005, 3(4): 212-214.

- [31] Polynkin A, Polynkin P, Mansuripur M, et al. Single-frequency fiber ring laser with 1W output power at 1.5 μm [J]. Optics Express, 2005, 13(8): 3179-3184.
- [32] Yang X X, Zhan L, Shen Q S, et al. High-power single-longitudinal-mode fiber laser with a ring Fabry–Perot resonator and a saturable absorber[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2008, 20(11): 879-881.
- [33] Song Y W, Havstad S A, Starodubov D, et al. 40-nm-wide tunable fiber ring laser with single-mode operation using a highly stretchable FBG[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2001, 13(11): 1167-1169.
- [34] Sun J Q, Yuan X H, Zhang X L, et al. Single-longitudinal-mode fiber ring laser using fiber grating-based Fabry–Perot filters and variable saturable absorbers[J]. Optics communications, 2006, 267(1): 177-181.
- [35] Chi M, Huignard J P, Petersen P M. A general theory of two-wave mixing in nonlinear media[J]. JOSA B, 2009, 26(8): 1578-1584.
- [36] Kishi N, Yazaki T. Frequency control of a single-frequency fiber laser by cooperatively induced spatial-hole burning[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 1999, 11(2): 182-184.
- [37] Lee C C, Chi S. Single-longitudinal-mode operation of a grating-based fiber-ring laser using self-injection feedback[J]. Optics Letters, 2000, 25(24): 1774-1776.
- [38] 陆俊军, 陈淑芬, 白杨. 光纤复合环形腔单模激光器的研究[J]. 光学技术, 2005, 31(2): 212-213.
- [39] Zhang X, Zhu N H, Xie L, et al. A stabilized and tunable single-frequency erbium-doped fiber ring laser employing external injection locking[J]. Journal of lightwave technology, 2007, 25(4): 1027-1033.
- [40] Yeh C H, Huang T T, Chien H C, et al. Tunable S-band erbium-doped triple-ring laser with single-longitudinal-mode operation[J]. Optics express, 2007, 15(2): 382-386.

- [41] Lee C C, Chen Y K, Liaw S K. Single-longitudinal-mode fiber laser with a passive multiple-ring cavity and its application for video transmission[J]. Optics letters, 1998, 23(5): 358-360.
- [42] Zhang J L, Yue C Y, Schinn G W, et al. Stable single-mode compound-ring erbium-doped fiber laser[J]. Lightwave Technology, Journal of, 1996, 14(1): 104-109.
- [43] Chou S Y, Yeh C H, Chi S. Unitizations of double - ring structure and Erbium - doped waveguide amplifier for stable and tunable fiber laser[J]. Laser Physics Letters, 2007, 4(5): 382-384.
- [44] Zhang X, Chen W, Liu Y, et al. Single longitudinal mode fiber laser with multiple ring cavities and its frequency stabilization[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(1): 50.
- [45] 孙倩, 宁提纲, 胡旭东. 单频光纤激光器的研究进展[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2010 (4): 1-3.
- [46] 周炳琨, 高以智, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. 169~170
- [47] 郭玉彬, 霍佳雨. 光纤激光器及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 北京, 2008. 65~66
- [48] Neev J, Kowalski F V. Unidirectional device for a ring laser using an acousto-optic modulator[J]. Optics letters, 1988, 13(5): 375-377.
- [49] Yin F, Yang S, Chen H, et al. 60-nm-wide tunable single-longitudinal-mode ytterbium fiber laser with passive multiple-ring cavity[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2011, 23(22): 1658-1660.
- [50] 单频激光线宽的测量方法介绍. 佚名
- [51] Qiu T, Suzuki S, Schülzgen A, et al. Generation of watt-level single-longitudinal-mode output from cladding-pumped short fiber lasers[J]. Optics letters, 2005, 30(20): 2748-2750.

- [52] Wang T S, Guo Y B, Wang K. Analyzing longitudinal - mode of single - frequency ring fiber laser[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2007, 49(6): 1494-1497.
- [53] 马明祥, 杨华勇, 徐攀, 等. 抽运调制条件下超窄线宽掺铒光纤环形激光器的跳模特性研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 122-126.

作者简历

马龔（1988-），男，汉族，2005-2009 年就读于南京信息工程大学，物理学专业，2009 年获得理学学士学位；2010 年考入中国科学院安徽光学精密机械研究所，攻读硕士学位，专业为光学，研究方向为光纤激光技术，指导老师为毛庆和研究员。

在读期间发表的学术论文与取得的其它研究成果

已发表论文:

- [1] 马龔, 李文彩, 龙虎, 李磐, 毛庆和. 基于级联光纤环的复合环形腔单纵模光纤激光器的研究[J]. 量子电子学报. (已录用).
- [2] 田允允, 冯素娟, 马龔, 毛庆和. 一种基于 FBG 宽调谐的复合环形腔单纵模光纤激光器[J]. 量子电子学报, 2013, 30(3): 288~292.
- [3] Feng S J, Mao Q H, Tian Y Y, **Ma Y**, Li W C, and Wei L. Widely Tunable Single Longitudinal Mode Fiber Laser With Cascaded Fiber-Ring Secondary Cavity[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2013, 25(4): 323-326.