

基于光纤光栅技术的全光纤单纵模激光器研究进展

许 鸥

广东工业大学信息工程学院, 广东 广州 510006

摘要 实现单纵模光纤激光器的技术难点主要在于如何使谐振腔具有高的模式选择性能, 以及如何加入适当的窄带滤波器来辅助选频, 而光纤光栅技术在光纤激光器的设计与性能优化方面扮演着十分重要的角色。综合论述了近年来国内外利用光纤光栅产生单波长或多波长单纵模全光纤激光器的主要实现技术, 并分析其优缺点, 最后给出了总结与展望。

关键词 激光器; 光纤激光器; 光纤光栅; 单纵模; 窄带滤波

中图分类号 TN253; TN929

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.030010

Research and Progress of All-Fiber Single-Longitudinal Mode Lasers Based on Fiber Grating Technologies

Xu Ou

School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract The key technologies of achieving single-frequency fiber lasers are how to enable the resonant cavities to have the high selectivity of modes, and how to properly use the narrow-width filters to help selecting modes. In addition, the fiber grating technology play an important role in the designing and optimizing fiber lasers. The main technologies and methods reported recently about the single or multiple wavelength single-frequency fiber lasers based on fiber gratings are summarized, their merits, demerits are analyzed and the developments are prospected.

Key words lasers; fiber lasers; fiber grating; single-longitudinal mode; narrow-width filtering

OCIS codes 140.3510; 140.3570; 060.3735; 060.2310

1 引言

单纵模光纤激光器, 也称为单频激光器, 其输出激光线宽可以达到千赫兹量级, 具有极高的时间相干性和极低的相位噪声, 在长距离光纤传感系统(用于国防边境、隧道及石油管道监控等)、高速光通信、相干光通信、微波光子学等领域均具有广泛的应用, 是目前光纤激光器的一个重要研究方向。

值得一提的是, 作为一种能在光纤纤芯中实现波长选择性反馈并减小谐振器损耗的全光纤型器件, 光纤光栅技术在光纤激光器的设计与性能优化方面扮演着十分重要的角色。单频光纤激光器技术的最先突破来自光纤布拉格光栅(FBG)技术, 1991年 Ball等^[1]利用FBG技术获得了光纤激光器的单频输出。1995年, Sejka等^[2]发现了采用相移光纤光栅的分布反馈(DFB)光纤激光器可以获得单频激光输出, 测得激光线宽为15 kHz。光纤光栅起着激光选频、反馈或兼有放大的功能, 巧妙地取代了镜片式传统光学谐振腔, 解决了光路需调节的问题。它与稀土光纤的结合使得光纤激光器真正实现了全光纤结构。在各种光纤激光器特别是掺杂光纤激光器中, 光纤光栅都发挥着十分重要的作用, 利用光纤光栅构成谐振腔的激光器结构得到了越来越多的关注。但是, 由于均匀光纤光栅的带宽一般在0.1 nm量级, 单独作为滤波器使用时难以满足单纵模激光输出的需求, 因此, 通常采用两个甚至多个光纤光栅或结合其他器件来实现超窄带宽滤波, 目前带宽可以达到皮米量级甚至更窄。

本文将综合论述近年来国内外利用光纤光栅产生单波长或多波长单纵模全光纤激光器的主要实现技术, 并分析其优缺点。

收稿日期: 2014-09-11; 收到修改稿日期: 2014-10-21; 网络出版日期: 2015-02-05

基金项目: 国家自然科学基金(61471130)

作者简介: 许 鸥(1981—), 女, 博士, 讲师, 主要从事光纤通信及传感方面的研究。E-mail: xuou@gdut.edu.cn

2 单纵模光纤激光器的实现技术

光纤激光器的单纵模特性由激光谐振腔的纵模模式间隔和所用滤波器的带宽共同决定。纵模模式间隔的大小取决于激光谐振腔的长度,要实现单纵模光纤激光器,技术难点主要在于如何使谐振腔具有高的模式选择性能,以及如何加入适当的窄带滤波器来辅助选频。在目前各种光纤激光器结构中,线形及环形腔代表了两种最典型的激光器结构。当采用环形腔结构时,一般来说其谐振腔的腔长往往达到几米甚至几十米,因此对增益光纤的掺杂浓度要求不高,但是较长的腔长会导致纵模模式分布非常紧密,增加了选频难度。当采用线形腔结构时,由于要保证单纵模激光输出,激光器的腔长必须很短,一般都在厘米或毫米量级,当腔长小于一定长度时,基于低掺杂浓度稀土光纤的光纤激光器由于不能提供充分的增益以克服腔内损耗将无法形成激光振荡。针对不同的激光腔结构,国内外已经提出各种基于不同结构光纤光栅的有效技术来实现单纵模激光输出,下面将进行详细介绍及分析。

2.1 基于一对FBG构成的滤波器或激光腔结构

常用方法包括:将一对FBG制作于普通光纤中,且中间无增益光纤,单纯作为滤波器辅助选频;或者将一对FBG制作在普通光纤中,中间熔接一段增益光纤,构成分布布拉格反射(DBR)型激光器;以及将一对FBG写入光敏增益光纤,形成兼顾选频、反馈和放大功能的一体化激光器。

2.1.1 一对相同FBG组成法布里-珀罗(FP)结构作为窄带滤波器辅助选频

在这类方法中,将一对相同FBG写入光敏或氢载光纤中组成FP结构,可以在激光器中作为窄带滤波器辅助选频,如图1所示, L_{g1} 和 L_{g2} 分别为光栅1,2的长度, L 为中间腔长。这种FP结构,将在FBG的阻带内形成多个基本等距分布的谐振峰,谐振峰的间距与两个FBG之间的距离呈反比关系,谐振峰的带宽主要由FBG的反射率决定,反射率越高则得到的谐振峰越窄。

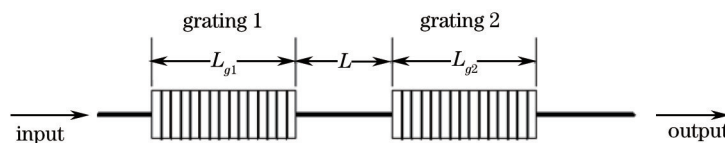


图1 光纤 Bragg 光栅构成的法布里-珀罗滤波器示意图

Fig.1 Scheme of fiber Bragg grating based on Fabry-Perot filter

Cheng等^[3]利用基于FBG对的超精细FP结构(精细度达到600),在一个包含有5.5 m掺铒光纤(EDF)的环形腔激光器中实现了单纵模(SLM)输出,WDM为波分复用,FP腔长约5 mm(图2)。He等^[4]利用基于FBG的FP结构在线形腔激光器中实现了双波长单纵模输出,如图3所示,PC为偏振控制器,LD为半导体激光器,FP腔长约1.7 mm。Sun等^[5]在长约27 m的环形腔激光器中,加入一对间隔约0.45 mm的FBG构成FP滤波结构,结合一段未完全抽运的掺铒光纤作为可变饱和吸收体,以及一个均匀FBG,实现了稳定的单纵模激光输出。Chen等^[6]在线形腔激光器中,一端采用了基于一对FBG的FP结构结合环形器作为双波长窄带滤波器,另一端为一可调FBG,中间为2.24 m掺铒光纤,由于基于FP结构的滤波器带宽小于激光腔长所决定的纵模间隔,因此可以获得单纵模输出,另外利用掺铒光纤中由空间烧孔效应产生的增益光栅,实现了室温下的双波长稳定输出,并通过此双波长激光得到了9.616 GHz的微波信号。

在这类型的激光器中,由于要实现窄带滤波,FP结构中的一对FBG一般需要较高反射率,并且必须保

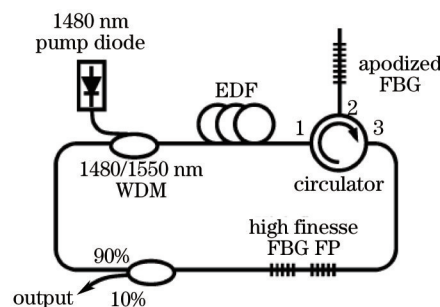


图2 基于FBG构成的FP结构的单纵模环形腔激光器

Fig.2 Configuration of SLM ring laser based on FP structure with FBG

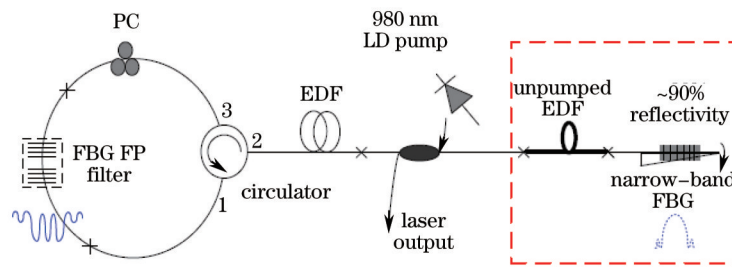


图3 基于FBG构成的FP结构的单纵模线型腔光纤激光器

Fig.3 Configuration of the SLM linear cavity fiber laser based on FP structure with FBG

持很小的间距,即FP腔的长度必须很小,大约都在几个毫米的数量级,即使如此,FP结构传输谱中仍会出现多个分布密集的传输峰,因此,常常还需要另外加入窄带滤波器件来进行进一步选频。比如在Chen等^[6]设计的结构中,使用了切趾FBG作为另一个窄带滤波器,而在He等^[4]的激光器中,除了窄带FBG外,还在激光腔内加入了一段未抽运的掺铒光纤作为饱和和吸收体来进一步辅助选频。

2.1.2 一对FBG中间熔接一段增益光纤构成DBR型激光器

一对FBG中间熔接一段增益光纤,构成DBR型激光器,是一种常见类型的短线型腔激光器。对于这一类型的激光器来说,为了实现单频操作,需要尽可能地缩短谐振腔的长度,但是这样做将限制激光器输出能量。使用高掺铒^[7]或混合稀土掺杂光纤如铒镱共掺^[8]是两种较为直接的解决方法。但纤芯中铒离子浓度过大会导致浓度淬灭和晶化,降低放大效率^[9]。磷酸盐玻璃光纤具有非常高的稀土离子可溶性,掺杂浓度比石英光纤高两个数量级,可以用短的激光腔实现高功率输出,适合用作单频光纤激光器的增益介质,基于高掺杂磷酸盐玻璃的单频光纤激光器已成为光纤激光器领域发展的热点。Spiegelberg等^[10]报道了利用一段2 cm长的铒镱共掺磷酸盐基多组分玻璃光纤及一对宽带(WB)FBG和窄带(NB)FBG构成的DBR结构,如图4所示,实现了经过隔离器(ISO)后能量大于200 mW、线宽小于2 kHz的单频激光输出。Mo等^[11]报道了在一段5 mm长的自制铒镱单模磷酸盐基光纤两侧,利用一个保偏(PM)FBG和一个宽带FBG作为反馈,实现了线宽7 kHz以下的线偏振单纵模激光输出,如图5所示。在此基础上,徐善辉等^[12]报道了短腔单频DBR型铒镱共掺磷酸盐光纤激光器中弛豫振荡噪声的抑制结果。杨飞等^[13]报道了利用1.8 cm长的铒镱共掺磷酸盐玻璃光纤作为增益介质制作了一个可调谐的短直线腔窄线宽单偏振单纵模光纤激光器,其谐振腔反射镜由高反射率的FBG和低反射率的保偏光纤FBG构成,实现了全光纤结构的高功率、高频率稳定性的单频光纤激光器。

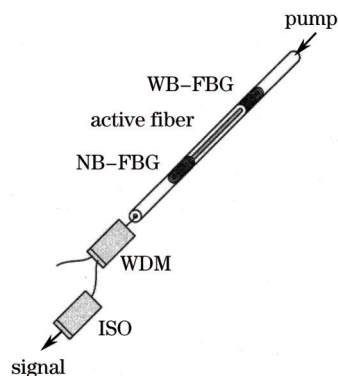


图4 基于FBG对的DBR结构

Fig.4 Schematic of DBR laser based on FBGs

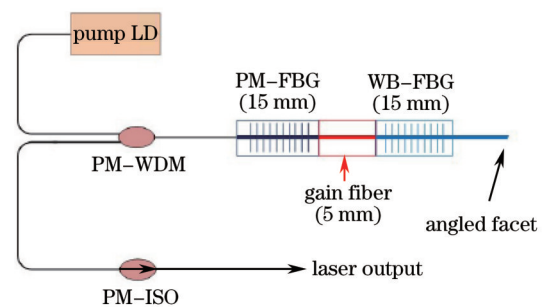


图5 基于两个FBG的DBR型线偏振单频激光器

Fig.5 DBR linearly polarized single-frequency fiber laser based on FBGs

因此,研制高增益系数、低传播损耗、低热聚集效果的单模磷酸盐基光纤是得到这类型激光器有效单频输出的一个关键。另外,将一段有源磷酸盐光纤熔接在两个写在石英光纤上的FBG中间,形成混合型的光纤器件时,由于两种不同类型的光纤所具有的光、热、机械特性都不相同,将它们熔接在一起,会在熔接点引入较高的损耗,并且机械稳定性差^[14]。若所有的功能器件都是基于磷酸盐光纤,必将形成更为紧致且腔内无熔接点的全光纤激光器,可用于对稳健性要求较高的高能输出。

2.1.3 一对FBG直接写入一段有源光敏光纤中构成线形腔激光器

一般的磷酸盐玻璃光纤通常不具备光敏性,难以直接在其中制作有效的FBG。为了在铒镱共掺光纤中有效地写入具有一定反射率的FBG, Dong等^[8]制作了一种特殊结构的光纤,为了提高铒离子与铒离子之间的能量转换效率,纤芯以磷硅酸盐玻璃作为基质,纤芯周围环绕一硼锗共掺石英层以增强光敏性,如图6所示,而FBG可以直接写入这样的光纤中来构成更为有效的一体化激光腔结构,已经得到了基于此种光纤的DBR及DFB型单频光纤激光器^[9]。但这种特殊光纤的制作过程较为复杂,而且相比一般掺杂浓度的光纤,若使用特殊制作的光纤必然将引起成本提高。

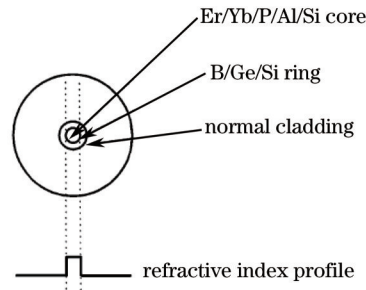


图6 特殊光敏增益光纤结构示意图

Fig.6 Structure of photosensitive Er/Yb fiber

Guan等^[15]在一段商用铒镱共掺磷酸盐玻璃光纤中,直接用193 nm准分子激光器扫描相位掩模板写入一对FBG,得到DBR型激光器。在此基础上,如图7所示,PD为光电二极管,将这一段具有单纵模双偏振态输出的DBR型激光腔固定在压电传感器(PZT)的一端,改变PZT的电压使其拉伸的同时,对激光腔施加了横向应力,改变了光纤双折射率,从而使两个不同偏振态的激光波长分离,实验表明两个激光波长的射频(RF)大小与PZT的驱动电压呈线性关系,因此得到了电可调的频率范围在3.34~14.75 GHz的微波信号。

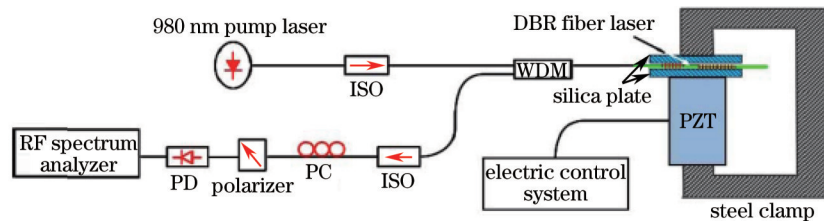


图7 基于双波长单纵模激光器的可调微波信号产生

Fig.7 Experimental configuration of tunable microwave generation using dual-wavelength single longitudinal mode fiber laser

2.2 在一段FBG中引入单个或多个相移点构成单或多波长单纵模激光器

在FBG中的适当位置引入单个或多个相移点可以在光栅反射带中形成单个或多个窄带传输带,可以单纯利用这种相移光栅来进行窄带滤波,也可以将相移光栅直接写入增益光栅中得到典型DFB激光器。这类型的激光器相对于DBR型激光器来说,结构更为紧凑、单纵模操作性能更加稳定;而从另一方面来说,对基于掺铒光纤的DFB激光器研究表明,在制作光栅过程中对增益介质进行的紫外曝光会引起增益介质一定程度的退化,导致对激光器噪声及输出效率产生影响。而DBR型激光器的增益介质部分不需要紫外曝光,这一点也成为了DBR型激光器的一个潜在优势,并且使用较长的腔长还可以减少因基础热波动带来的频率噪声影响^[16]。

2.2.1 在一段FBG中引入单个相移点构成DFB型激光器的优化设计

一般来说,若 π 相移位于光栅的中间位置,得到的DFB型激光器是典型单波长输出,但由于激光腔的对称结构,激光器两端输出的能量是相同的。为了得到单波长、单向输出的激光, Lauridsen等^[17]将 π 相移引入到偏离光栅中心的位置,与相移点较近的一端将输出较大能量的激光,通过优化设计相移点所在位置以及耦合系数,这种非对称结构能得到一个最大输出值。但对这种非对称结构信号分布的研究表明,大部分的能量建立发生在相移点附近,也就是说,光场被限制在相移点附近区域进行谐振,因此能够用于产生激光的有效腔长较短。在此基础上, Yelen等^[18]提出了一种简单的阶梯切趾方案,如图8所示, z_m 处为相移点所在位置;相移点左

侧光栅长度为 L_1 , 耦合系数为 κ_1 ; 相移点右侧光栅长度为 L_2 , 耦合系数为 κ_2 。通过调整相移点两侧的光栅长度及耦合系数的值来增加激光器的有效腔长, 目的是使更长的增益介质能够在光信号的产生过程中发挥作用, 计算和实验表明, 这种切趾方法能够增加 21%~28% 的抽运光-信号光转换率。上面两种优化方法本质上都是基于参数的方法, 即主要的激光腔参数先被赋予初值, 然后通过改变这些参数的值来找到最大输出效率, 但这种方法无法保证能够得到对于给定增益介质来说的极限或称为可能实现的最大效率值。Yelen 等^[19]又提出一种新的思路, 首先对于给定的增益介质和抽运安排, 推导出可能实现的最大效率, 然后利用已有算法找出 DFB 腔中各个参数所需满足的值, 在相同增益与抽运条件下, 与前两种方法比较, 得到了输出能量及效率增加 57% 的理论及实验结果。以上这些优化设计方式都是针对单波长 DFB 激光器来研究的。

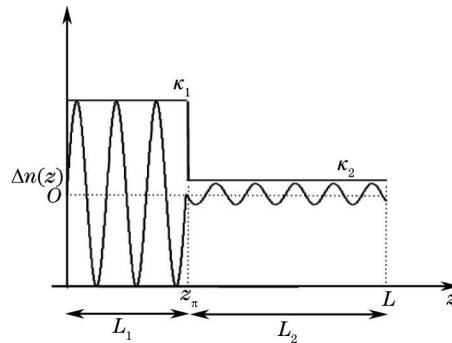


图8 阶梯切趾方案示意图

Fig.8 Illustration of the step-apodized profile

2.2.2 在一段 FBG 中引入多个相移点构成多波长激光器

若在一段 FBG 中引入多个相移点并合理安排相移点的位置及幅度, 能够在光栅的阻带中打开多个窄带传输窗口。比如在一段 FBG 对称的两个位置插入 π 相移, 能够得到双波长传输峰, 但是基于这种结构的滤波器或者 DFB 型激光器, 应用于以掺铒光纤作为增益介质的激光结构中, 一般较难得到双波长同时激射, 由于掺铒光纤在室温下具有均匀展宽效应, 两个波长的激射能量分布几乎相同, 全部集中在两个 π 相移位置附近, 因此必将引起严重的模式竞争。为了得到稳定的双波长输出, 研究者们提出了多种解决方案。

Chen 等^[20]利用等效相移(EPS)法在一段取样光纤布拉格光栅(SFBG)中, 通过改变两个对称位置的取样周期, 得到了双波长超窄带(带宽约为 0.2 pm)传输滤波器, 双峰间隔约 0.147 nm, 并将此滤波器应用于一个基于半导体光纤放大器(SOA)的环形腔激光器中, 如图 9 所示, FBG1 为利用 EPS 法得到的双传输峰滤波器; FBG2 为在同一位置重叠写入两个不同波长的双反射波长结构。ESA 和 OSA 分别为电子次模块和光学次模块, 由于 SOA 是一种室温下的非均匀展宽增益介质, 此激光器得到了稳定的双波长单纵模输出。

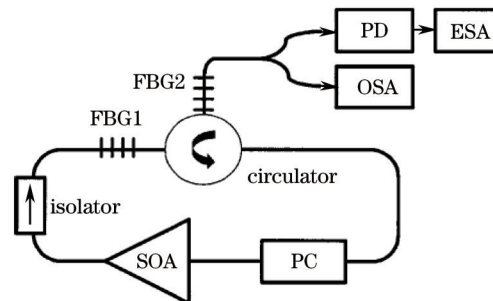


图9 双波长环形激光器结构

Fig.9 Schematic diagram of the dual-wavelength fiber ring laser

除了运用非均匀展宽的增益介质, 研究者们也设计出了基于掺铒光纤的双波长输出激光器结构。Sun 等^[21]提出在一段 FBG 的对称位置处引入两个不同的相移量, 目的是打破激光器的对称结构, 从而将两个激射波长的能量分布在空间上分离, 实验中将 7 cm 长的 FBG 写入一段氢载高增益掺铒光纤中, 对称位置的相移量分别为 0.6π 和 -0.6π , 得到了波长间隔为 52 pm 的双波长激光稳定输出。Dai 等^[22]在啁啾光纤光栅中的两处引入 π 相移, 每个 π 相移所在位置的波长即激射波长, 而激射能量也基本分布在相应的 π 相移处附

近,因此两个波长的主要能量分布在空间上不重合,从而避免了模式竞争,实验中将此啁啾相移结构写在一段掺铒光纤中,得到了间隔 44 pm 的稳定双波长激光输出。此种结构与两个不同波长的 DFB 型激光器级联相似。Yao 等^[23]设计出一种线形腔结构,如图 10 所示,一端用光纤光栅(即图中的 FBG2)做反射器,另一端是包含有一个环形器及一个双 π 相移光纤光栅(即图中的 FBG1)的环形反射器,中间由 1.5 m 掺铒光纤作为增益介质,虽然腔长较长导致了较为紧密(约 40 MHz)的纵模间隔,但相移 FBG 的两个传输峰具有超窄带宽(约 0.3 pm,相当于 37.5 MHz),为实现单纵模输出提供了有利条件,另外一方面,线形腔中的驻波引起了反转粒子数密度的空间洞烧效应,在增益介质中产生增益光栅,从而抑制了基模对增益的获取,同时使得其他模式能够获得较高增益,因此得到了半小时以上的双波长单纵模稳定输出,两波长拍频后得到了约 3.389 GHz 的微波信号。一般来说,基于相移光栅产生的两波长间隔较为有限,大多在 50 pm 左右。

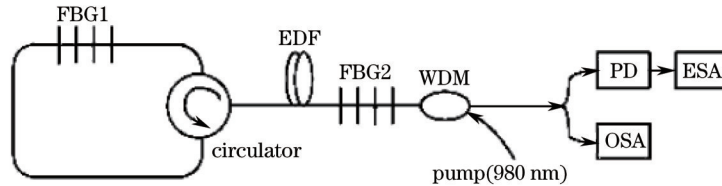


图 10 双波长线形腔激光器结构示意图

Fig.10 Schematic diagram of the dual-wavelength linear cavity fiber laser

2.3 基于取样光纤光栅的单纵模激光器设计方案

取样 FBG 是指对均匀 FBG 进行周期取样得到的一种超结构光栅,通过变换取样周期可以在反射带中得到单个或多个窄传输峰用于单纵模光纤激光选频。

Jiang 等^[24]将一段 SFBG 中心位置的取样周期延长 50%,具体设计思路如图 11 所示,相当于引入了 π 相移量,在 -1 级反射峰中得到了窄带的传输窗口,将其制作在光敏掺铒光纤中得到了 DFB 型单波长输出。Liu^[25]设计了一种取样光栅结构,整个结构可以看作由许多离散的小段 FBG 构成,在前半段结构中,FBG 之间周期性地以代表“0”相移量和“ π ”相移量的距离间隔分开,而在后半段结构中,FBG 之间周期性地以代表“ π ”相移量和“0”相移量的距离间隔分开,如图 12 所示,从而形成整体上的对称取样结构。这种取样光栅也可以看作是两个在不同位置具有独立 π 相移的光栅交织在一起,因此得到了两个窄带传输峰,并且通过改变具体参数,两传输峰的间隔可以在 0.01 nm 到 2 nm 之间灵活调节。作者将这样的结构制作在铟镱共掺光纤中,得到了室温下稳定的双波长激光输出,这是由于根据带增益参数的耦合模式理论分析,这种结构实现了两个独立的谐振腔,因此两个激光波长的大部分能量分布在空间上是分离的,只有小部分重合,故而有效避免了模式间的竞争。

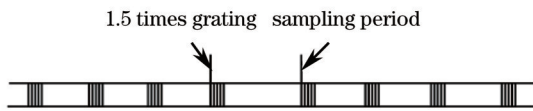


图 11 改变中心部分取样周期的 SFBG 设计思路

Fig.11 Schematic diagram of the SFBG with changed sampling period in the center

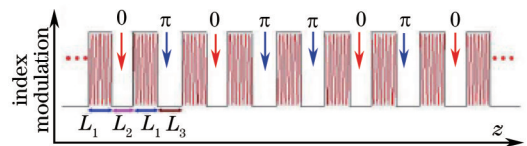


图 12 用于双波长 DFB 激光器的对称结构 SFBG 设计思路

Fig.12 Schematic diagram of the symmetrical structure SFBG for the dual-wavelength DFB fiber laser

另外, Liu 等^[26]还提出了一种基于 SFBG 的双波长 FBG,设计步骤分为两步,首先利用傅里叶理论设计 SFBG 的合适占空比及初始的非光栅部分长度,其次基于耦合模式理论对非光栅部分长度进行修正,最终得到两个强度与带宽完全相同的反射峰,但这种方法得到的两个反射峰带宽都在 0.1 nm 量级。为了得到更窄带宽的滤波器,作者又在这种结构的 SFBG 中心引入了 π 相移量(移动平台精度为 10 nm),由此在两个反射峰中产生了超窄传输带,其带宽可以达到皮米量级,并且两个传输带所在的波长间距可以通过设计 SFBG 的取样周期来进行调节^[27]。

总的来说,这类基于 SFBG 的滤波器和激光器制作起来较为复杂,并且要求精度较高。

2.4 基于多腔及复合腔结构的单纵模激光器

多腔或复合腔结构也是用来实现激光器中纵模控制的重要方式。多种复合腔结构早先成功应用于半

导体激光器中来实现单频操作^[28-29]。早在1993年,Chernikov等^[30]实验证明了由三个FBG构成的复合腔单频光纤激光器,具体结构如图13所示,作为增益介质的1 cm掺铒光纤熔接在靠近抽运源的两个FBG中间,第三个FBG与中间FBG形成一个无源外腔结构来辅助选择纵模,实验结果表明加入外腔结构的激光器单纵模操作更为稳定。

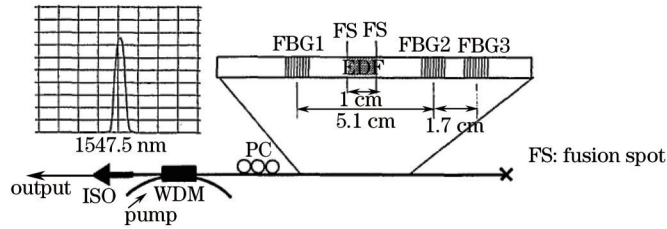


图13 具有复合腔结构的单纵模激光器

Fig.13 Single longitudinal mode fiber laser of coupled cavity structure

Feng等^[31]提出一种复合线形腔光纤激光器,如图14所示,由3个写在氢载掺铒单模光纤中的FBG和两个光纤耦合器组成非对称四腔结构,增益介质为1.5 m自制掺铒光纤,实现了稳定单纵模输出。在文献[32]中,作者又制作了基于4个FBG的非对称线形三腔结构,如图15所示,RTML表示折射率匹配液三腔的长度 L_1, L_2, L_3 分别为3、150、7 mm,实现了稳定单纵模激光输出,由于4个FBG都制作在光敏掺铒光纤中,激光腔内不存在熔接点。上面两种复合腔实现单纵模操作的原因,作者简单地归结为多个腔形成的Vernier效应。但是,具体的操作方法特别是结构中关于FBG及腔长的设计原则,以及这种结构的选频原理,并没有给出详细分析与讨论。实际上,这种多腔复合结构中的光在传输时,将形成相干叠加,再加上非对称腔的透射光谱相互叠加,可以增加滤波器的自由光谱范围,减少谱线宽度从而提高精细度,同时加强了对边带的抑制作用,达到更好的滤波效果。

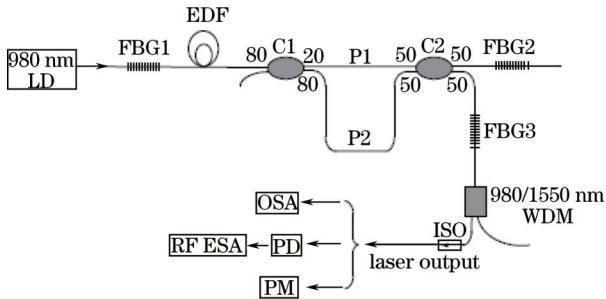


图14 一种复合线形腔结构激光器

Fig.14 Schematic diagram of linear coupled cavity fiber laser

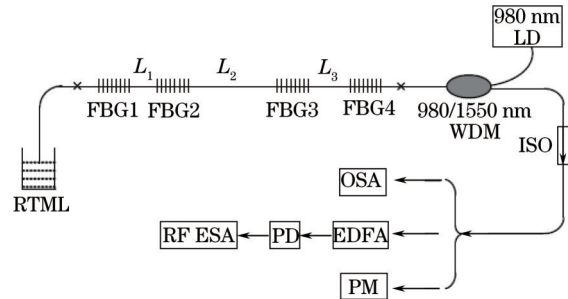


图15 基于4个FBG构成的多腔结构激光器

Fig.15 Multiple cavity fiber laser based on four FBGs

尽管多腔结构在精细光谱测量和窄带滤波方面有明显优势,但随着腔数的增加,光损耗和制作难度也随之增加,人们希望使用的腔数尽量少,但又能提高器件的滤波能力和实现窄带输出。Xu等^[33-34]提出了一种基于三个光纤光栅的双腔全光纤结构,详细分析了不同结构参数条件下的透射谱特点,总结产生单个或多个谐振峰的设计原则,并已基于此种非对称双腔结构实现了线宽约为5 kHz以下的单纵模激光器,激光器为全光纤结构且简单紧凑,具体如图16所示。焦明星等^[35]设计了一种复合环形腔双波长单纵模掺铒光纤激光器,以PM-FBG作为波长选择元件,并采用未抽运掺铒光纤饱和吸收体作为激光单纵模选择元件,从而实现正交线偏振1550 nm双波长单纵模激光稳定振荡输出。

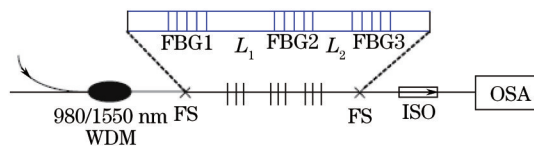


图16 非对称双腔结构线型激光器

Fig.16 Asymmetric two-cavity linear fiber laser

3 结 论

综述了近年来国内外提出的基于光纤光栅的单纵模或多波长光纤激光器的主要实现技术及结构。这些激光器各有其优缺点,可根据不同的应用需要选用不同的技术实现单纵模输出。虽然该领域的研究已经取得了长足进展,但仍有一些关键技术值得深入探索和研究。目前对于单纵模激光器的研究,主要集中在以下两方面:一是在单波长单纵模的基础上,设计双波长甚至是多波长单纵模同时稳定输出;二是在保证单纵模的条件下,提高能量转换效率和输出功率。而从所采用的技术手段上分析,主要包括研制特殊掺杂结构的增益光纤、设计新颖的激光器腔结构以及窄带宽单或多波长滤波器件。

参 考 文 献

- 1 G A Ball, W W Morey, W H Glenn. Standing-wave monomode erbium fiber laser[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1991, 3(7): 613-615.
- 2 M Sejka, P Varming, J Hubner, *et al.*. Distributed feedback Er³⁺-doped fibre laser[J]. Electron Lett, 1995, 31(17): 1445-1446.
- 3 X P Cheng, P Shum, C H Tse, *et al.*. Single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser based on high finesse fiber Bragg grating Fabry-Perot etalon[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(12): 976-978.
- 4 Xiaoying He, Xia Fang, Changrui Liao, *et al.*. A tunable and switchable single-longitudinal mode dual-wavelength fiber laser with a simple linear cavity[J]. Opt Express, 2009, 17(24): 21773-21781.
- 5 J Sun, X Yuan, X Zhang, *et al.*. Single-longitudinal-mode fiber ring laser using fiber grating-based Fabry-Perot filters and variable saturable absorbers[J]. Opt Commun, 2006, 267(1): 177-181.
- 6 D Chen, H Fu, W Liu, *et al.*. Dual-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fibre laser based on fibre Bragg grating pair and its application in microwave signal generation[J]. Electron Lett, 2008, 44(7): 459-460.
- 7 J L Wagener, P F Wysocki, M J F Digonnet, *et al.*. Effects of concentration and clusters in erbium-doped fiber lasers [J]. Opt Lett, 1993, 18(23): 2014-2016.
- 8 L Dong, W H Loh, J E Caplen, *et al.*. Efficient single-frequency fiber lasers with novel photosensitive Er/Yb optical fibers[J]. Opt Lett, 1997, 22(10): 694-697.
- 9 W H Loh, B N Samson, L Dong, *et al.*. High performance single frequency fiber grating-based erbium:ytterbium-codoped fiber lasers[J]. J Lightwave Technol, 1998, 16(1): 114-118.
- 10 C Spiegelberg, J Geng, Y Hu, *et al.*. Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm (June 2003)[J]. J Lightwave Technol, 2004, 22(1): 57-62.
- 11 Shupe Mo, Shanhu Xu, Xiang Huang, *et al.*. A 1014 nm linearly polarized low noise narrow linewidth single-frequency fiber laser[J]. Opt Express, 2013, 21(10): 12419-12423.
- 12 Zhan Biao, Xu Shanhu, Mo Shupe, *et al.*. Study on the relaxation oscillation suppression in a short-cavity single-frequency DBR fiber laser[J]. Laser & Optoelectronics Process, 2013, 50(9): 090602.
湛彪,徐善辉,莫树培,等.短腔单频DBR光纤激光器中弛豫振荡噪声抑制的研究[J].激光与光电子学进展,2013,50(9): 090602.
- 13 Yang Fei, Chen Dijun, Pan Zhengqing, *et al.*. Short linear cavity single-frequency fiber laser with active frequency stabilization by fiber Bragg grating[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0902005.
杨飞,陈迪俊,潘政清,等.光纤光栅主动稳频的短直线腔单频光纤激光器[J].中国激光,2012,39(9): 0902005.
- 14 L Li, A Schülzgen, X Zhu, *et al.*. 1 W tunable dual-wavelength emission from cascaded distributed feedback fiber lasers [J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(5): 051111.
- 15 Bai-Ou Guan, Yang Zhang, Li-Wei Zhang, *et al.*. Electrically tunable microwave generation using compact dual-polarization fiber laser[J]. IEEE Photonic Technol Lett, 2009, 21(11): 727-729.
- 16 Erlend Rønnekleiv, Sigurd W Løvseth, Jon T Kringlebotn. Er-doped fiber distributed feedback lasers-properties, applications and design considerations[C]. SPIE, 2003, 4943: 69-80.
- 17 V C Lauridsen, J H Povlsen, P Varming. Design of DFB fiber lasers[J]. Electron Lett, 1998, 34(21): 2028-2030.
- 18 Kuthan Yelen, Louise M B Hickey, Mikhail N. Zervas. A new design approach for fiber DFB lasers with improved efficiency[J]. IEEE J Quantum Electron, 2004, 40(6): 711-720.
- 19 Kuthan Yelen, Mikhail N Zervas, Louise M B Hickey. Fiber DFB lasers with ultimate efficiency[J]. J Lightwave Technol, 2005, 23(1): 32-43.

- 20 Xiangfei Chen, Jianping Yao, Zhichao Deng. Ultranarrow dual-transmission-band fiber Bragg grating filter and its application in a dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber ring laser[J]. Opt Lett, 2005, 30(16): 2068-2070.
- 21 Jie Sun, Yitang Dai, Yejin Zhang, *et al.*. Dual-wavelength DFB fiber laser based on unequalized phase shifts[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2006, 18(23): 2493-2495.
- 22 Y T Dai, X F Chen, J Sun, *et al.*. Dual-wavelength DFB fiber laser based on a chirped structure and the equivalent phase shift method[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2006, 18(18): 1964-1966.
- 23 Y Yao, X F Chen, Y T Dai, *et al.*. Dual-wavelength erbium-doped fiber laser with a simple linear cavity and its application in microwave generation[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2006, 18(1): 187-189.
- 24 Dianjie Jiang, Xiangfei Chen, Yitang Dai, *et al.*. A novel distributed feedback fiber laser based on equivalent phase shift [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2004, 16(12): 2598-2600.
- 25 Xueming Liu. A novel dual-wavelength DFB fiber laser based on symmetrical FBG structure[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19(9): 632-634.
- 26 Xueming Liu, Yongkang Gong, Leiran Wang, *et al.*. Identical dual-wavelength fiber Bragg gratings[J]. J Lightwave Technol, 2007, 25(9): 2706-2710.
- 27 Xueming Liu, Aoxiang Lin, Guoyong Sun, *et al.*. Identical-dual-bandpass sampled fiber Bragg grating and its application to ultranarrow filters[J]. Appl Opt, 2008, 47(30): 5637-5643.
- 28 J L Robert, Y Amnon, S Joseph. Laterally coupled-cavity semiconductor lasers[J]. IEEE J Quantum Electron, 1987, 23(4): 395-400.
- 29 K D Bijoy, R Raimund, Q Viktor, *et al.*. Distributed feedback - distributed Bragg reflector coupled cavity laser with a Ti:(Fe:Er):LiNbO₃ waveguide[J]. Opt Lett, 2004, 29(2): 165-167.
- 30 S V Chernikov, J R Taylor, R Kashyap. Coupled-cavity erbium fiber lasers incorporating fiber grating reflectors[J]. Opt Lett, 1993, 18(23): 2023-2025.
- 31 Feng Ting, Yan Fengping, Li Qi, *et al.*. Stable and high OSNR compound linear-cavity single-longitudinal-mode erbium-doped silica fiber laser based on an asymmetric four-cavity structure[J]. Chin Phys Lett, 2012, 29(10): 104205.
- 32 Feng Ting, Yan Fengping, Li Qi, *et al.*. Stable single longitudinal mode erbium-doped silica fiber laser based on an asymmetric linear three-cavity structure[J]. Chin Phys B, 2013, 22(1): 014208.
- 33 Ou Xu, Shaohua Lu, Suchun Feng, *et al.*. Proposal and analysis of two-cavity Fabry-Perot structures based on fiber Bragg gratings[J]. J Opt Soc Am A, 2009, 26(3): 639-649.
- 34 Ou Xu, Shaohua Lu, Suchun Feng, *et al.*. Single-longitudinal-mode erbium-doped fiber laser with the fiber-Bragg-grating-based asymmetric two-cavity structure[J]. Opt Commun, 2009, 282(5): 962-965.
- 35 Jiao Mingxing, Xing Junhong, Tong Congwei, *et al.*. Design and experimental study of two-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602013.
焦明星, 邢俊红, 同聪维, 等. 双波长单纵模掺铒光纤环形激光器设计及实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602013.

栏目编辑: 宋梅梅