

室温稳定多波长光纤激光器技术 的研究新进展

刘艳格¹, 冯新焕², 董孝义¹

(¹南开大学现代光学研究所光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)
²香港理工大学电机工程系光子研究中心, 香港)

摘要 室温稳定的多波长光纤激光器(MWFL)中最关键的技术是如何有效抑制掺杂光纤的均匀展宽效应。综述了国际上近年来提出的实现室温稳定多波长光纤激射的主要技术。介绍了近几年我们在该领域的一些创新性研究工作:提出了多种基于多谐振峰的光纤布拉格光栅(FBG),如多模光纤布拉格光栅、保偏光纤布拉格光栅、取样光纤布拉格光栅等的可开关多波长光纤激光器的新方法和新结构,实现了多种波长间隔小于2 nm,室温工作稳定性好、波长及波长间隔可调的可开关多波长光纤激光器;提出了基于非线性光纤环镜(NOLM)和非线性偏振旋转(NPR)效应的两种多波长掺铒光纤激光器(EDFL)实现技术,实现了室温稳定、功率谱分布平坦的宽带多波长激光输出,3 dB带宽内的波长个数可达50个,每个波长的功率波动在2 h内小于0.1 dB。

关键词 激光技术;掺铒光纤激光器;掺镱光纤激光器;多波长;可开关

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Progress in Room-Temperature Stable Multi-Wavelength Fiber Laser Technologies

LIU Yan-ge¹, FENG Xin-huan², DONG Xiao-yi¹

¹Key Laboratory of Opto-Electronic Information and Technology, Ministry of Education,
Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China

²Photonics Research Centre, Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China

Abstract The key technologies of achieving room-temperature stable multi-wavelength fiber lasers (MWFLs) are how to restrain the homogeneous broadening effect of the doped fiber at room temperature. We summarize the main technologies and methods reported recently to realize the room-temperature MWFLs, and introduce our innovative works in this field, including proposing several novel structures and operable technologies of switchable multi-wavelength fiber lasers using special fiber Bragg gratings (FBG) with several resonance peaks, such as FBG in multimode fiber, FBG in polarization maintaining fiber and sampled FBG. Switchable multi-wavelength fiber lasing oscillations with less than 2 nm wavelength spacing, tunable wavelength and spacing and excellent room-temperature stability were demonstrated and realized. Two other erbium-doped MWFL designs are proposed respectively by using nonlinear polarization rotation (NPR) effect and a nonlinear optical loop mirror (NOLM) to induce intensity-dependent loss. As a result, power-stable, broad bandwidth and uniform multiwavelength operations are obtained for both laser sources. Up to 50 wavelengths lasing oscillations with wavelength spacing of 0.8 nm within a 3 dB spectral range of 1562~1605 nm have been achieved. The measured power fluctuation of each wavelength is about 0.1 dB within a two-hour period.

Key words laser technique; erbium-doped fiber laser; ytterbium-doped fiber laser; multi-wavelength; switchable

收稿日期:2007-03-29;收到修改稿日期:2007-05-23

基金项目:国家973计划(2003CB314906),国家自然科学基金(10674074)和天津市自然科学基金重点项目(06YFJZJC00300)资助课题。

作者简介:刘艳格(1973—),女,河北人,博士,副教授,主要从事光纤光子有源和无源器件研究。

E-mail: ygliu@nankai.edu.cn

1 引 言

光纤激光器是现代光通信的产物,是随着光纤及通信技术的发展而崛起的一项崭新技术。自从1985年由英国南安普顿大学的研究人员采用改进的化学气相沉积(MCVD)方法成功研制出单模掺铒光纤^[1],并于1986年和1987年相继报道了第一台掺铒光纤激光器(EDFL)和放大器以来^[2,3],由于光纤激光器所表现出的低阈值、高效率、窄线宽、可调谐和高性价比等优点而备受人们的关注,近年来取得突飞猛进的发展,成为激光器领域发展最快的技术。波分复用(WDM)技术是目前大容量光纤通信网普遍采用的技术,为了进一步提高通信容量,波分复用通信系统正朝着信道数越来越多的方向发展。波分复用系统的光源最直接的方法就是采用多个单波长激光器,但是通过单纯的增加光源数量来满足信道数增加的需要,势必会增加系统的成本和复杂性,因此,性能稳定的多波长光纤激光器(MWFL)由于具有结构简单、与光纤系统兼容、波长选择容易等优点更为人们所看好,是近年来的研究热点^[4~8]。另外,多波长光纤激光器在光学测量、光学传感以及微波产生等领域也有着非常广泛的用途。国际上从1988年开始对多波长光纤激光器进行研究^[9],并于1992年由美国的N. Park等首次实现了基于单一增益介质的6个波长的掺铒光纤激光输出,波长间隔为4.8 nm^[10]。而我国从20世纪90年代中后期,由南开大学、北京邮电大学、清华大学等科研单位率先开始进行该方面的研究工作^[11~13],经过十几年的发展,尤其是在近几年,多波长光纤激光器方面的研究已经引起了广泛的关注,并已取得很大进展。

室温稳定的多波长光纤激光器中最关键的技术是如何有效抑制掺杂光纤的均匀增益展宽效应。常温下铝硅玻璃掺铒光纤的均匀展宽线宽约为11 nm,锗硅玻璃掺铒光纤的均匀展宽线宽约为3~4 nm^[14~16]。研究表明,当多波长激光器的输出波长间隔小于增益光纤的均匀展宽线宽时,不可避免地存在严重的模式竞争和模式跳变。要提高多波长光纤激光器的工作性能,获得稳定的多波长激光振荡,关键在于设法削弱增益光纤的均匀展宽效应,以及由此引起的交叉增益饱和效应。

本文在综述国际上多波长光纤激光器主要实现技术的基础上,主要介绍了我们近年来提出的几种可开关多波长光纤激光器实现原理、技术及结构。所提出的激光器具有结构简单、易于实现、室温工作

稳定等特点。

2 室温稳定多波长光纤激光器的实现技术

与其他大多数激光器一样,光纤激光器也是由抽运源、增益介质(即稀土离子掺杂的光纤)和谐振腔构成的。其基本工作原理简述为:抽运源激励光纤中的稀土离子跃迁到高能态,离子无辐射跃迁到亚稳态形成离子数反转,再跃迁回基态产生光子,光子在谐振腔中振荡放大后形成激光。掺铒光纤和掺镱光纤在特定抽运光的作用下可提供波长范围30nm以上的增益带宽,如果采用梳状滤波器进行多个波长选择,原理上在各波长处只要满足激光谐振条件,增益带宽内的任何一个波长都可能起振,从而实现多波长的激光振荡。但在常温下,掺杂光纤中均匀展宽效应占主导地位,因此,当多波长激光器的输出波长间隔小于增益光纤的均匀展宽线宽时,不可避免地存在严重的模式竞争和模式跳变,因此在不采取任何控制模式竞争技术的情况下,即使能实现少数几个波长的激光振荡,也非常不稳定。为了抑制这种模式竞争,目前国际上已经提出多种有效的技术来抑制掺杂光纤(尤其是掺铒光纤)中的均匀展宽效应,其中一类方法是上世纪90年代初提出的通过液氮对掺铒光纤进行冷却,使其均匀展宽降为1 nm左右从而实现稳定的多波长激光输出的方法^[4,17],尽管该方法可以实现几十个波长的稳定激光输出,但由于不能实现常温操作,很难得到实际应用;另外一大类方法就是通过在单掺杂增益光纤的谐振腔中引入特殊的物理机制,如频移反馈^[18~21]、四波混频辅助稳频效应^[6,22,23]、非均匀损耗机制^[7,24~26]、偏振及光谱烧孔效应^[8,27~36]等,实现室温稳定的多波长激光振荡,该类方法具有很强的潜在应用价值。

2.1 利用频移反馈的方法实现常温下稳定的掺铒光纤多波长激光输出

2000年,加拿大的A. Bellemare等^[18]提出在环形腔中引入一个频移器来获得常温下稳定的多波长掺铒光纤激光输出的方法,其采用的实验装置如图1所示。其中用于多波长选择的滤波器可以是各种梳状滤波器,频移器为声光调制器。其基本工作原理为:通过在环形腔内插入一个频移器,由于反馈的光强在腔内每循环一周都会有一定频率的移动,不会造成一个波长上因连续增益放大而饱和,使掺

铒光纤的均匀展宽被极大地抑制,从而可以获得常温下稳定的多波长光纤激光器。在他们的实验中实现了 14 个波长的激光振荡。之后,韩国的 S. K. Kim 等^[19]和加拿大的 J. Maran 等^[20]也分别利用相同的原理,通过改进环形腔内的梳状滤波器以及掺铒光纤的增益谱形状等方法,在 C 波段分别获得了 34 个和 17 个波长的同时激光振荡,且具有比较好的多波长功率均衡性。另外,2003 年, K. Zhou 等^[21]利用正弦相位调制器取代频移器,根据傅里叶变换可知,对光强的相位调制同样可使光场的频率发生移动,因而同样实现了多个波长的掺铒光纤激光输出。

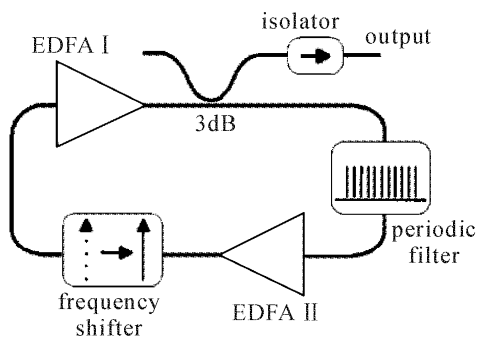


图 1 A. Bellemare 等提出的基于频移反馈的掺铒光纤激光器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of multiwavelength erbium-doped fiber laser with frequency shifted feedback proposed by A. Bellemare *et al.*

应用这种方法可以很方便地获得常温稳定工作的数十个波长的激光输出,但是由于利用该方法也同时很容易实现单个或几个波长的短脉冲操作,因此,为了保证多波长的连续激光输出,必须精细控制环形腔中的腔内损耗、功率水平以及掺铒光纤的饱和水平等。

2.2 利用四波混频效应获得常温下稳定的掺铒光纤多波长激光输出

理论和实验表明四波混频效应可以起到稳定多波长激光振荡的作用^[22]。基于四波混频效应的多波长光纤激光器的一般结构如图 2 所示。环形腔中通过一个具有较高功率水平的掺铒光纤放大器 (EDFA) 提供增益,梳状滤波器(如光纤光栅阵列^[6,22]、取样光纤光栅^[23]等各种梳状滤波器)进行多波长选择,一段具有合适色散条件的高非线性光纤,如色散位移光纤 (DSF)^[6]或光子晶体光纤 (PCF)^[22,23]等来产生不同波长之间的四波混频效应,偏振控制器用来调整腔内光的偏振状态,从而有

利于更好地满足相位匹配条件。其多波长稳频的基本工作原理为:不同波长之间的四波混频作用可以使各个波长之间的能量相互传递,功率重新分配,从而某时刻低功率激光可以通过很快的四波混频过程得以补充,高功率激光会通过四波混频过程很快地减小,通过这种很快的动态平衡过程,可以有效抑制由掺铒光纤均匀展宽所引起的模式竞争和模式跳变,从而实现稳定的多波长掺铒光纤激光输出。

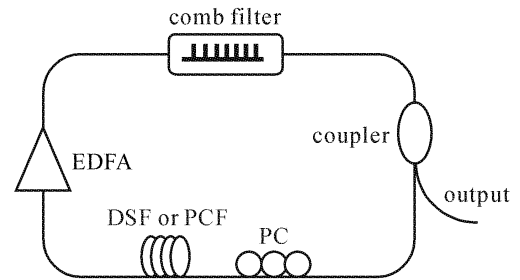


图 2 基于四波混频效应的多波长掺铒光纤激光器一般结构示意图

Fig. 2 Ordinary schematic diagram of multiwavelength erbium-doped fiber laser based on four-wave mixing effect

该方法的关键是要产生显著的四波混频效应,因此不仅对腔内引入的非线性光纤具有特殊的要求,而且要保证腔内具有较高的光功率水平。光子晶体光纤是最近几年出现的一种非常引人注目的新型光纤,由于其包层空气孔结构设计的灵活性,可以很容易地实现宽波长范围内色散平坦和色散可控的高非线性光纤特性,因此,用光子晶体光纤可以较容易地产生显著的四波混频效应,这使得基于四波混频效应的多波长光纤激光器具有较强的应用潜力。该方法的主要缺点在于为了很好地满足相位匹配条件,需要非常精细地调节腔内光的偏振状态,从而使该方法容易受外界环境的干扰,另外该方法的成本也比较高。

2.3 利用偏振烧孔效应实现常温下稳定的多波长光纤激光输出

在谐振腔中设法引入偏振依赖元件,使不同波长的激射分别来源于不同偏振态的上能级粒子数跃迁,即利用偏振烧孔效应,可以非常有效地压缩掺杂增益光纤的均匀展宽带宽,实现常温稳定的多波长光纤激光输出^[27~36]。偏振烧孔效应可以通过在光纤激光器中使用特殊的偏振相关器件来实现,如在腔内使用保偏布拉格光纤光栅^[27]、保偏长周期光纤光栅^[28]、少模或多模光纤光栅^[29,30]等。也可以通过在光纤激光腔中插入一段多模光纤,利用一种单模光纤(SMF)-多模光纤-单模光纤结构,引入空间模

式拍频效应,使多模光纤的不同偏振方向的反射模在波长上分离开,利用偏振烧孔效应实现常温下多波长的稳定输出^[31]。该方法的最大优点是实现多波长操作的同时还可实现波长之间的可开关操作,这对一些应用来说更加方便。其主要不足是单纯利用偏振烧孔效应实现的波长数目不多,只有几个波长。

3 我们在多波长光纤激光器方面的一些研究工作

3.1 基于多模或少模光纤光栅的可开关多波长光纤激光器

多模光纤可支持多个模式在其中传输,这些模式具有不同的传输速度和模场分布。它们在光纤中传输时彼此交换能量,直至到达多模光纤布拉格光栅(MM-FBGs)。到达光纤光栅后,一些满足相位匹配条件的模式被光栅反射,由于它们具有不同的传输常数,从而会产生多个反射峰。如果光栅的谐振波长稍低于光纤的截止波长,光纤中只有有限几个模式满足相位匹配条件,可称这种光栅为少模光纤光栅。

我们利用多模光纤光栅进行了两个多波长光纤激光器的实验。在第一个实验中,自行研制的多模光纤布拉格光栅的反射峰位于1060 nm波段,其反射谱如图 3(a)和(b)所示。该光栅有两个反射主峰,分别位于1054.1 nm和1055.0 nm,相应波长间隔为0.9 nm。该光栅的显著特点是两个谐振波长对输入光的偏振态敏感且两个波长的反射率相近,如果改变进入光栅光的偏振态,其两共振波长处的反射率会发生变化,长波长处的谐振峰值可以高于(图 3(a))或低于(图 3(b))短波长处的谐振峰值。然后将该光栅作为波长选频元件,形成如图 3(c)所示的线形腔掺镱光纤激光器(YDFL)结构,激光器参数详见文献[29]。

图 4 是通过调整偏振控制器(PC)得到的可开关单波长和双波长输出的实验结果。该激光器的工作原理为:通过调整偏振控制器状态,可实现对光栅反射峰值大小的调整,当一个波长对应的反射率大于另一个波长时,即此波长具有较小的腔内损耗时,激光器将产生此波长的稳定振荡。由此,可通过调整偏振控制器状态实现激光器两个波长之间的转换。特别是,当两个波长所对应的反射率近似相等时,由于光纤光栅强的偏振敏感特性,使多模光纤布

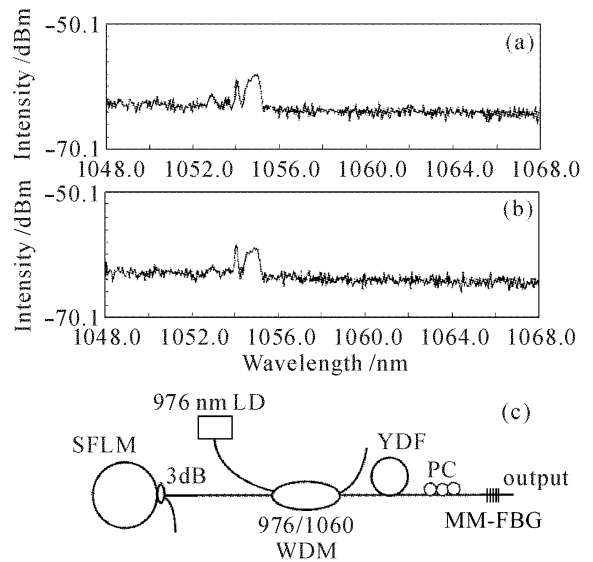


图 3

(a), (b) 不同偏振光入射时得到的多模光纤光栅的反射谱; (c) 提出的基于多模光纤光栅的双波长掺镱光纤激光器的结构示意图

Fig. 3

(a), (b) reflection spectra of the multimode fiber Bragg grating (MM-FBG) with different polarization light incidence; (c) proposed dual-wavelength YDFL configuration based on MM-FBG

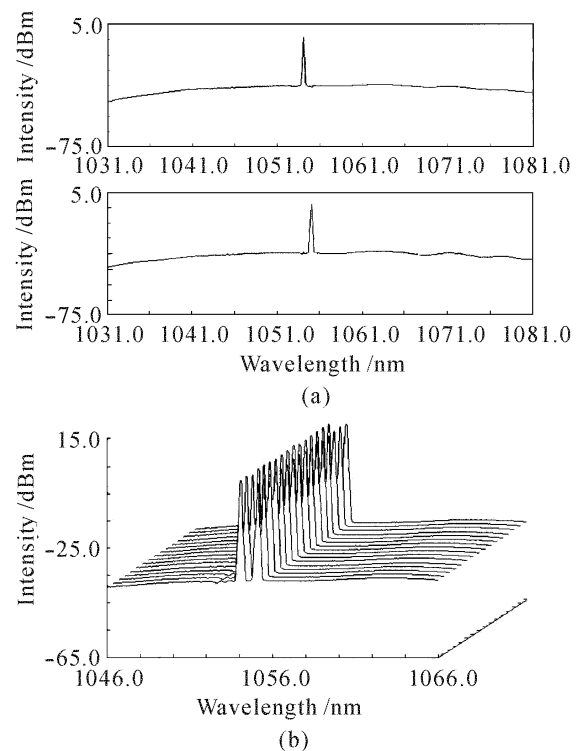


图 4 光纤激光器分别工作于(a)单波长和(b)双波长(16次重复扫描)时的输出光谱图

Fig. 4 Spectra of fiber laser with (a) single-wavelength and (b) dual-wavelength operation (scanning number 16)

拉格光栅的两个不同偏振方向的反射模在波长上分离开,能够利用偏振烧孔效应克服掺杂光纤均匀增益展宽引起的模式竞争,从而实现常温下双波长的

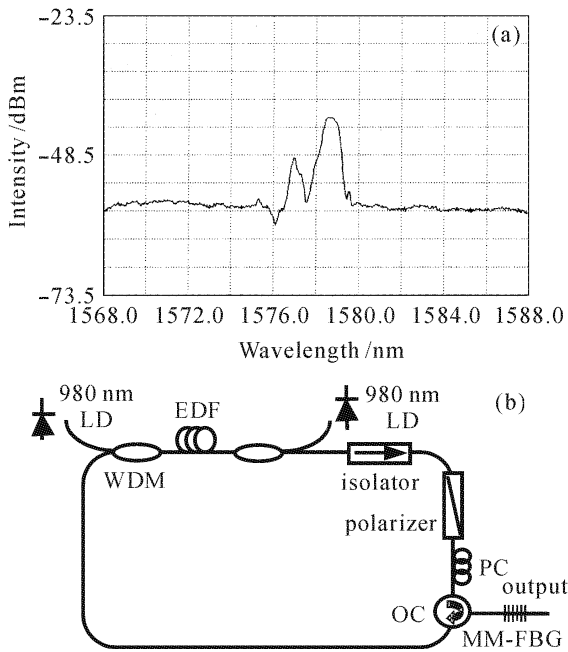


图 5

(a) L 波段多模光纤光栅的反射谱;

(b) 提出的 L 波段双波长掺铒光纤激光器的实验装置图

Fig. 5

(a) reflection spectra of the L-band MM-FBG; (b) proposed L-band dual-wavelength erbium-doped fiber laser configuration using the L-band MM-FBG

稳定输出。在另外一个实验中, 写制光栅所用的光纤是通过载氢增敏后的常规多模光纤, 图 5(a)是在该光纤上写制的 L 波段多模光纤光栅的反射谱, 它也有两个反射峰, 分别位于 1578.8 nm 和 1577.1 nm, 相应波长间隔为 1.7 nm。与多模光纤光栅相比较, 该光栅的长波方向的反射峰值与短波方向的反射峰值相差很大, 至少有 7 dB。该光栅也有一定的偏振依赖特性, 通过调整入射光的偏振状态, 两反射峰值均有变化, 且此消彼长, 但变化量很小, 均不超过 0.8 dB, 即长波方向的反射峰值总是远大于短波方向的反射峰值。如果再构造与前面一样的光纤线形腔结构, 由于两个波长的反射率相差太大, 不可能同时双波长起振。为此, 我们构造了如图 5(b) 所示的环形腔掺铒光纤激光器结构, 详细参数见文献[30]: 该结构的关键是腔内引入了一个起偏器和一个偏振控制器(PC), 起偏器和偏振控制器的联合作用可产生跟波长相关的损耗, 以补偿光纤光栅两反射峰值大小的差异, 同时也用于控制激光腔内光的偏振态, 调节 PC, 可实现单波长输出和双波长输出之间的转换。图 6 给出了从多模光栅后面测量的实验结果, 激光器在常温下双波长输出很稳定。输出的两波长之间的振幅差异较大, 这主要归结于用

光纤光栅作为输出端口, 光栅在两波长处的透射率差异较大造成的。

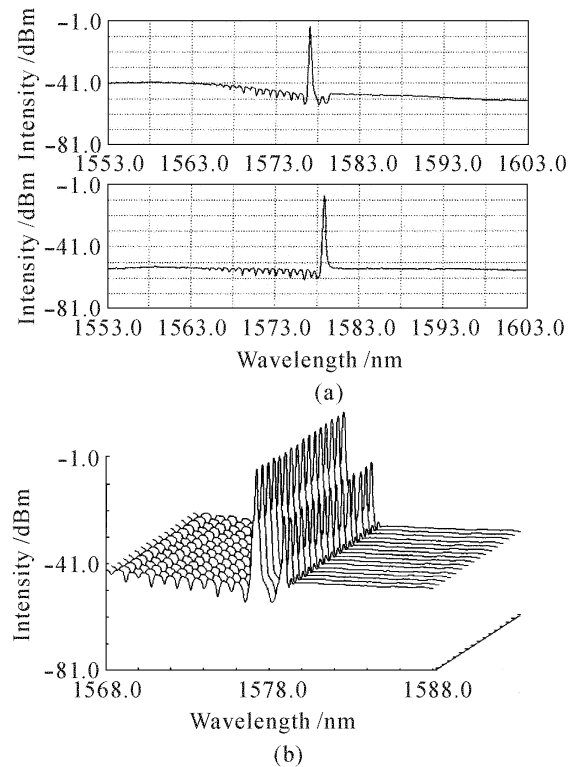


图 6 L 波段光纤激光器分别工作于(a)单波长和 (b)双波长(16 次重复扫描)时的输出光谱图

Fig. 6 Spectra of the L-band fiber laser with (a) single-wavelength and (b) dual-wavelength operation (scanning number 16)

在激光器中要获得稳定的双波长激光振荡, 不仅要平衡两波长所对应的腔损耗, 还要克服室温下两个波长模式之间的竞争。在上面所述的两种基于多模光纤光栅的光纤激光器中, 都是通过调整偏振控制器的状态从而改变腔内的偏振态, 使多模光纤中激发的 LP_{01} 和 LP_{11} 空间模式具有不同的偏振模分量, 也就是说, 两反射波长对应不同的偏振态。那么, 包括多模光纤光栅的那段多模光纤结构不仅选择了两个不同的激光波长, 而且也选择了激光的偏振态, 即引入了偏振烧孔效应, 这种偏振烧孔效应大大抑制了掺杂增益光纤中两个波长之间的模式竞争和交叉增益饱和效应, 从而得到了稳定的双波长激光输出。在此提出的采用多模光纤光栅的方案与在腔内插入一段多模光纤的方案^[31]相比具有可以精确控制激光波长的优点。

3.2 基于高双折射光纤光栅的可开关多波长掺铒光纤激光器

在普通的单模光纤中, 光纤是圆对称且折射率各向同性的波导, 此时传导模 LP_{01} 模在 x, y 偏振方

向是简并的,即 x, y 偏振方向的传播常数相等,因此在普通单模光纤上写制的布拉格光栅只有一个谐振峰。而对于保偏光纤(高双折射光纤)来说,其固有的双折射将导致 x, y 两个偏振方向具有不同的传播常数,因此,保偏或高双折射光纤布拉格光栅(PM-FBG 或 HB-FBG)具有两个波长的反射峰,根据耦合模理论,其波长间隔为: $\Delta\lambda = 2\Delta\lambda/L_B$, 其中, $\Delta\lambda$ 为光栅反射的两个布拉格波长之差, Λ 为光栅的周期, L_B 为保偏光纤的拍长, λ 为工作波长。

由于保偏光纤布拉格光栅的谐振波长不仅在波长上是分开的,而且在偏振方向上也是互相垂直的,因此,当被用作掺杂光纤激光器中的波长选择元件时,由于会引入较强的偏振烧孔效应,会得到非常稳定的可开关双波长光纤激光器^[32]。如果再设法将横向应力和纵向应力施加于高双折射光纤光栅上,通过施加不同大小和方向的横向应力可以增大或减小高双折射光纤的双折射大小,同时施加纵向应力可以改变光栅的周期,这样可以实现更加灵活的波长位置及波长间隔可调的可开关双波长光纤激光器^[33]。另外,也可以将横向应力和纵向应力作用于一个普通的布拉格光纤光栅,因引入双折射效应而实现波长分裂,同样可以实现波长位置及波长间隔可调的可开关双波长光纤激光器^[34]。

一个高双折射光纤光栅只有两个谐振波长,一般最多只能实现两个波长的激光振荡。为了实现更多波长且室温稳定的可开关多波长光纤激光器,我

们提出并实验研究了如图 7(b)所示的基于交叠腔和高双折射光纤布拉格光栅的多波长光纤激光器结构,图 7(a)为所用两个高双折射光纤布拉格光栅的透射谱,激光器结构参数及高双折射光纤布拉格光栅的写制方法详见文献[35]。光栅 1 的共振波长 λ_1 和 λ_2 以及光栅 2 的共振波长 λ_3 和 λ_4 之间的间隔都为 0.52 nm, λ_2 和 λ_3 之间的间隔为 0.36 nm。一个 Sagnac 光纤环镜作为宽带的高反射腔镜并分别与两个高双折射光纤布拉格光栅和两段掺铒光纤形成两个交叠的线形谐振腔,即:光纤环镜-EDF1-HB-FBG1 形成 λ_1 和 λ_2 两个波长的激射;光纤环镜-EDF1-EDF2-HB-FBG2 形成 λ_3 和 λ_4 两个波长的激射,两个谐振腔有共用的 EDF1,因此称为交叠腔。由激光原理可知,四个波长激光振荡应满足的条件分别为

$$\lambda_1 \rightarrow R_0 R_1 l_{11}^2 G_{11}^2 = 1, \quad (1)$$

$$\lambda_2 \rightarrow R_0 R_2 l_{21}^2 G_{21}^2 = 1, \quad (2)$$

$$\lambda_3 \rightarrow R_0 R_3 l_{31}^2 G_{31}^2 l_{32}^2 G_{32}^2 = 1, \quad (3)$$

$$\lambda_4 \rightarrow R_0 R_4 l_{41}^2 G_{41}^2 l_{42}^2 G_{42}^2 = 1, \quad (4)$$

式中 R_0, R_1, R_2, R_3 和 R_4 分别为光纤环镜, HB-FBG1 对 λ_1 和 λ_2 , HB-FBG2 对 λ_3 和 λ_4 的反射率; l_{11}, l_{21}, l_{31} 和 l_{41} 分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 和 λ_4 在光纤环镜与 HB-FBG1 之间的单程损耗; l_{32} 和 l_{42} 分别为 λ_3 和 λ_4 在 HB-FBG1 和 HB-FBG2 之间的单程损耗; G_{11}, G_{21}, G_{31} 和 G_{41} 分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 和 λ_4 从 EDF1 获得的单程增益; G_{32} 和 G_{42} 分别为 λ_3 和 λ_4 从 EDF2 获得的单程增益。

如果优化谐振腔参数并精细调整偏振控制器 PC1 和 PC2, 改变腔内的偏振和损耗状况, 可以使 (1)~(4) 式中的任意一个或多个条件同时满足, 从而实现可开关的单波长、双波长、三波长以及四波长的光纤激光振荡输出。另外, 由于 λ_1 和 λ_2 (λ_3 和 λ_4) 的偏振方向互相垂直, 在同一个谐振腔中由于偏振烧孔效应的引入而会大大减小两波长之间的模式竞争; λ_1, λ_2 与 λ_3, λ_4 之间的模式竞争会由于两段增益 EDF(从而两个不同的谐振腔)的使用而大大减弱。因此, 通过将交叠腔与高双折射光纤光栅特性相结合, 可实现可开关、且室温工作稳定的多波长光纤激光输出。

实验中, 通过调整抽运功率和精细调谐两个偏振控制器的状态, 在抽运功率为 38.4 mW 时, 得到了 4 种单波长输出、6 种双波长输出、4 种三波长以及四波长的激光输出, 其中部分的实验结果如图 8 所示。该激光器多波长工作稳定性较好, 在各波长

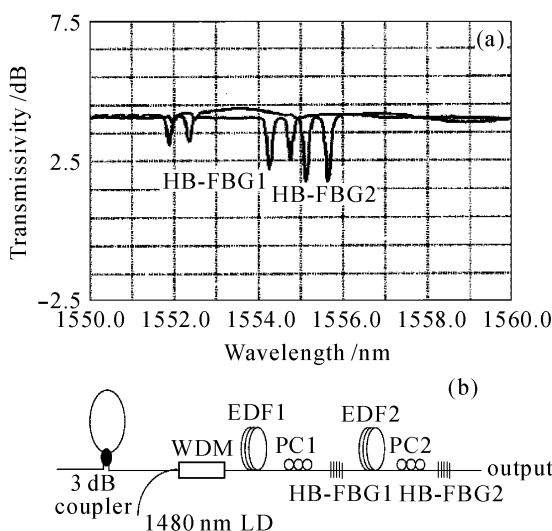


图 7

(a) 高双折射光纤布拉格光栅的透射谱; (b) 基于交叠腔和高双折射光纤光栅的多波长光纤激光器结构示意图

Fig. 7

(a) transmission spectra of the high birefringence fiber Bragg gratings (HB-FBGs); (b) proposed multi-wavelength fiber laser configuration based on overlapping cavities and HB-FBG

处的最大振幅波动小于0.4 dB,而波长位置在光谱仪的分辨率精度内没有发生变化。由此可见,该多波长激光器具有较好的室温工作稳定性。

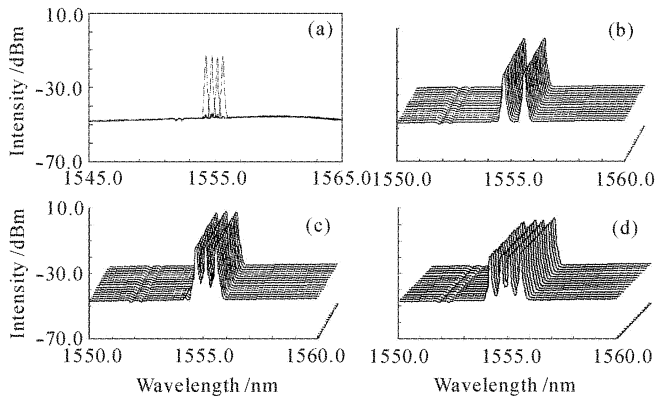


图8 激光器分别工作于(a)单波长,(b)双波长,(c)三波长和(d)四波长时的激光输出光谱图

Fig.8 Experimental results of (a) single-, (b) dual-, (c) three- and (d) four-wavelength operation spectra of the proposed laser

另外,该激光器结构还具有较好的可扩展性,如果采用 n 段的 EDF 和 n 个 HB-FBG,原理上可以实现 $2n$ 个波长之间的可转换多波长光纤激光输出,但相应的结构和操作也复杂化。

3.3 在普通环形腔结构中实现室温稳定、可开关和多波长的掺铒光纤激光振荡

掺铒光纤根据共掺物质的不同,其均匀展宽线宽会稍有不同,但在1550 nm附近其值至少要大于2 nm,因此通常认为在普通掺铒光纤激光器结构中很难实现室温稳定的、间隔小于该均匀线宽大小的双波长或多波长激光振荡。而我们通过大量的实验研究,发现通过精心设计和优化光纤环形腔结构及参数,在普通光纤环形腔结构中,实现波长间隔小于0.8 nm的双波长甚至多波长的室温稳定的掺铒光纤激光振荡是完全可能的^[36]。图9(a)是我们研究的光纤环形腔激光器结构示意图,参数详见文献[36]。环形腔中引入可变光衰减器(VOA)的目的是通过连续调整激光腔内的损耗,精细调节掺铒光纤的增益谱形状,从而实现可控的可开关多波长激光输出。

在实验中,首先精心选择掺铒光纤的长度,使其在取样光栅反射波长带宽内具有非常平坦的增益谱形状,从而可以较容易地实现同时多个波长的激光振荡。然后精细调节可变光衰减器,通过改变激光腔内的损耗大小,可以得到如图10所示的由取样光纤光栅5个主峰所决定的可调谐及可开关的单波

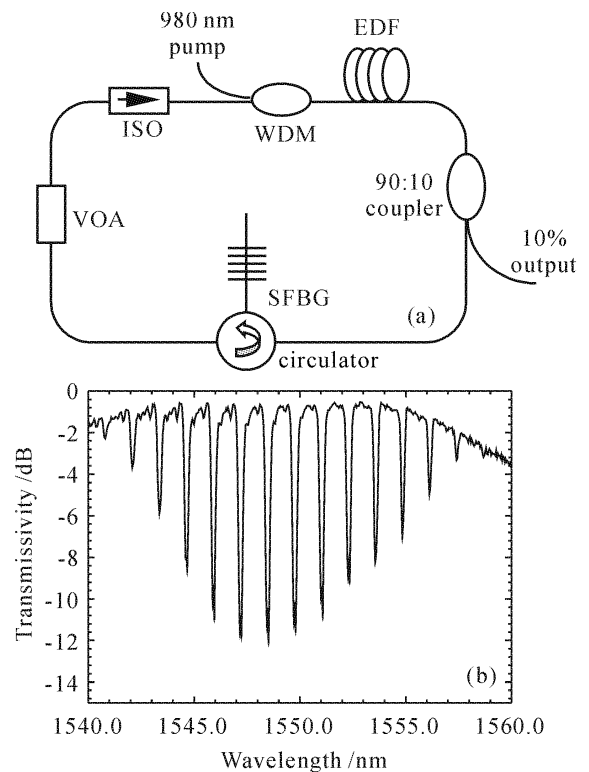


图9

(a) 研究的环形腔多波长光纤激光器;
(b) 取样光纤布拉格光栅的透射谱

Fig.9

(a) proposed ordinary ring cavity erbium-doped fiber laser;
(b) transmission spectrum of the sampled fiber Bragg grating

长、双波长、三波长甚至四波长的光纤激光输出。为了检验多波长激光输出室温工作的稳定性能,测量了激光器间隔为1.28 nm时的双波长和三波长激光输出时的峰值功率波动,如图11所示。对于双波长激光时,在半个小时的测量时间内,两个波长处的最大峰值功率波动都小于0.1 dB,对于三波长激光输出的峰值功率波动稍微大一些,但功率最大波动也小于0.8 dB。因此,该激光器具有非常好的室温工作稳定性。

为了深入洞察激光器能室温稳定工作的机制,进行了如下几个实验:

第一,将增益光纤换成另一种掺铒光纤以及也尝试了用一个饱和输出功率为16 dBm的商用掺铒光纤放大器代替半导体激光器抽运的掺铒光纤部分,保证这两种情况与前面所用掺铒光纤得到的自发辐射谱形状相似。最后都得到了与图11类似稳定性的多波长激光激射。这说明在相同的腔内信号功率饱和水平下,增益光纤的选择对多波长激光激射的稳定性影响不大。

第二,实验中发现,在环形腔内波分复用耦合器

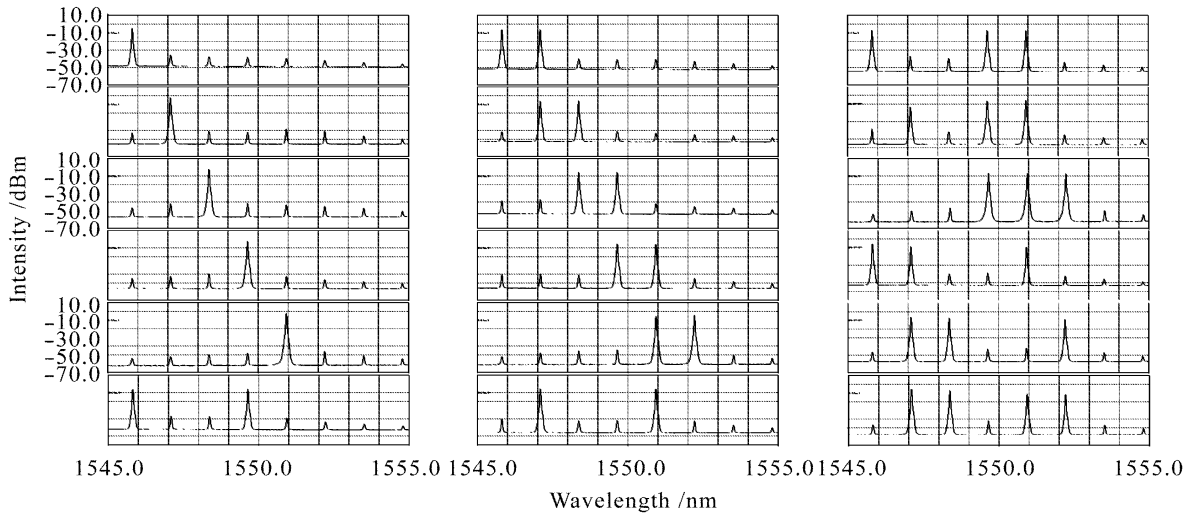


图 10 调节可变光衰减器得到各种可调谐及可开关多波长激光输出的光谱图

Fig. 10 Tunable and switchable wavelength output spectra of the laser via adjusting the variable optical attenuator (VOA)

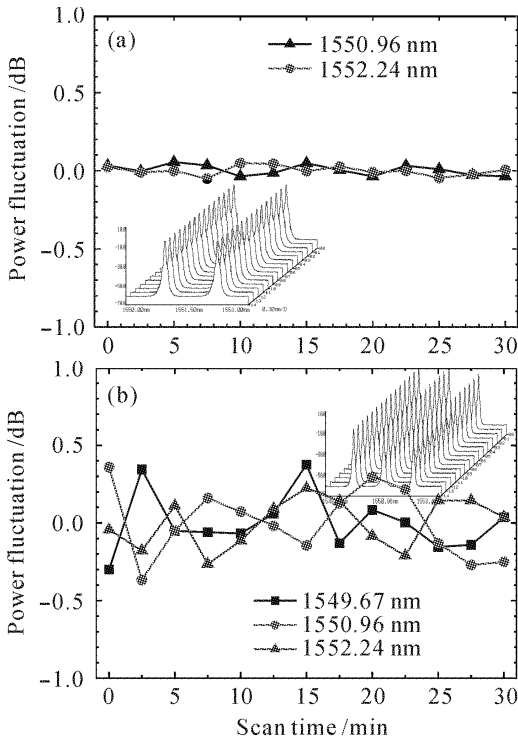


图 11 该环形腔激光器分别工作于(a)双波长和 (b)三波长激光振荡时的功率波动

Fig. 11 Power fluctuation of the fiber ring laser during scanning with (a) dual-wavelength and (b) three-wavelength lasing

前面隔离器(ISO)的使用对多波长激光的稳定激射起着非常重要的作用。从图 9(a)的实验装置来看,即使环路中没有该隔离器,由于环形器具有对反向光隔离的作用,也可以保证光沿顺时针单方向运转。图 12 是不加该隔离器时得到的与图 11(a)激射波长一样时双波长激光振荡的稳定性测量结果,室温工作稳定性能明显严重恶化。由此可见,环形腔中

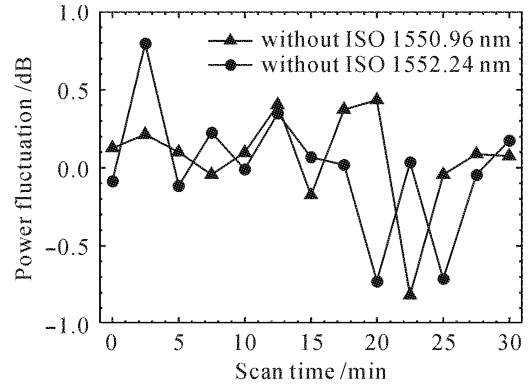


图 12 没有隔离器时得到的该环形腔光纤激光器双波长激光振荡时的功率波动

Fig. 12 Power fluctuation of the fiber ring laser during scanning without the isolator (ISO) for dual-wavelength lasing

反向传播的自发辐射光非常不利于多波长的稳定激射。

第三,用两个波长间隔为 0.76 nm 的普通的光纤布拉格光栅(SFBG)级联在一起代替取样光纤光栅作为波长选择元件进行实验,得到的双波长光谱和长时间稳定性测试结果如图 13(b)所示,在两个波长处的最大功率波动都小于 0.5 dB,稳定性也很好。这就意味着如果采用波长间隔为 0.8 nm 的取样光纤光栅,同样可以得到类似图 10 所示的室温稳定的可开关和可调谐多波长激光输出。

第四,同样用这两个布拉格光纤光栅作波长选择元件,在保持腔内其他条件不变,只改变抽运功率的大小时,实验发现随抽运功率增加,功率波动变小,图 13 给出了在两个抽运功率下的双波长稳定性测试结果。这说明掺铒光纤的功率饱和水平越高,

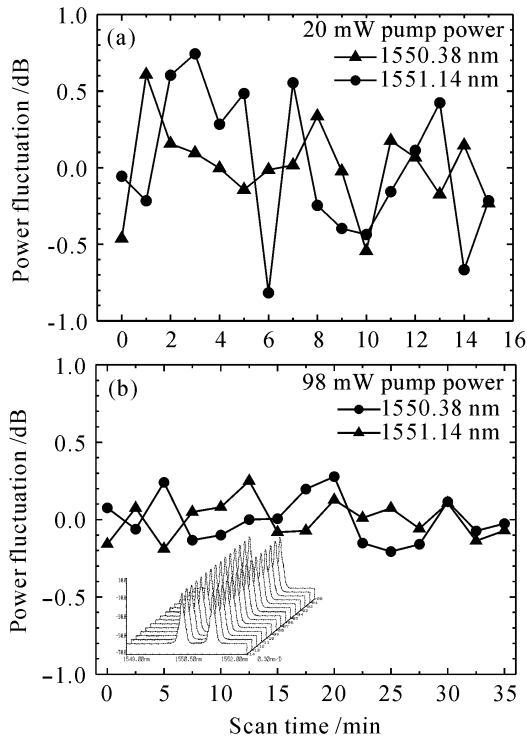


图 13 用两个光纤布拉格光栅时得到的不同抽运功率下的双波长激光峰值功率波动

Fig. 13 Power fluctuations of the dual-wavelength fiber ring laser using two FBGs with different pump power

越有助于得到稳定的多波长激光振荡。

从这些实验结果不难看出,在该光纤环形腔结构中既没有引入偏振烧孔效应,也没有引入非线性效应等有助于波长稳定的机制,但却得到了非常稳定的两个波长和三个波长的同时激光振荡。这主要归功于掺铒光纤深度饱和造成的非均匀展宽效应:通过优化环形腔参数,使掺铒光纤处于深度饱和状态,这增强了常温下的光谱烧孔效应,使非均匀展宽效应加强,从而有效地抑制了多个波长之间的模式竞争。也有证据表明,980 nm抽运的掺铒光纤具有较低的增益交叉饱和效应;另外,有效抑制反向传播光的影响也非常有利于多波长激光的稳定。

该多波长光纤激光器的优点是实现技术简单、能够同时实现波长可开关和可调谐的灵活性操作、具有较强的实用价值。缺点是实现的激光波长个数不多。

3.4 基于非线性光纤环境的多波长掺铒光纤激光器

非线性光纤环境(NOLM)曾用于被动锁模的激光器中作饱和吸收体及光脉冲的整形^[37,38]。这里,提出将它用在掺铒光纤激光器中获得稳定的多波长激光输出。图 14 是光纤环形腔激光器结构示意图,参数详见文献[24]。非线性光纤环境结构可有效引入依赖光强的损耗,这是实现此激光器稳定

多波长输出的关键机制。非线性光纤环境的透射率可以表示为^[37]

$$T = 1 - 2\alpha(1 - \alpha)\{1 + \cos[\theta + (1 - 2\alpha)\phi]\}, \quad (5)$$

式中 α 为构成非线性光纤环境所用耦合器的耦合比, θ 为由偏振控制器引入的环内两个方向传输的光的相位差, $\phi = 2\pi n_2 P_i L / \lambda A_{\text{eff}}$ 为非线性相移, n_2 为非线性系数, L 为环境内光纤长度, λ 为波长, A_{eff} 为光纤的有效模面积, P_i 为输入环境的光强。由(5)式可以看出,非线性光纤环境的透射率(也意味着其引入的损耗)随偏振控制器引入相位差的不同,可随入射于环境的光强的增加而增加或减小。当调整偏振控制器,使环境偏置在透射率随入射光强增加而增加的状态,也就是损耗随光强增加而减小,环境可起到饱和吸收体的作用,可用于被动锁模激光器产生超短脉冲^[37]。而相反,使环境偏置在透射率随入射光强增加而减小的状态,也就是损耗随光强增加而增加,环境可起到一种光强的均衡作用。这种均衡作用可有效抑制掺铒光纤的均匀展宽效应,从而使环境的均衡作用与均匀展宽引起的模式竞争效应之间达到一种平衡,最终获得室温下多波长激光输出,并保证波长之间功率的均衡分布。

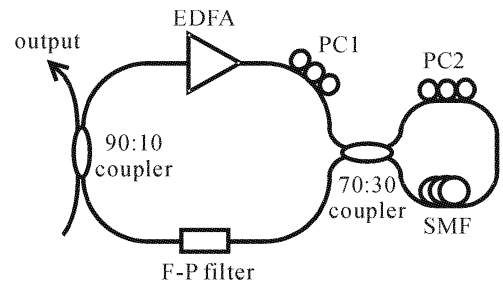


图 14 基于非线性光纤环境的多波长光纤激光器

Fig. 14 Schematic diagram of the proposed multi-wavelength fiber laser based on NOLM

实验中通过调整偏振控制器得到了 50 个波长的激光输出。图 15(a)给出了输出光谱,位于 1562 ~ 1605 nm 光谱范围内的 50 个波长的功率差异小于 3 dB。对其输出的稳定性也进行了研究,用滤波器滤出一个波长监测其功率波动,在 2 h 内功率波动仅约 0.1 dB,如图 15(b)所示。可见,此激光器在室温下可实现很稳定的多波长激光输出。

该多波长光纤激光实现技术的最大优点是可同时实现数十个波长的室温稳定激射、具有较强的实用价值。不足是需要激光腔内具有较高的功率水平,以使非线性光纤环境充分发挥作用。

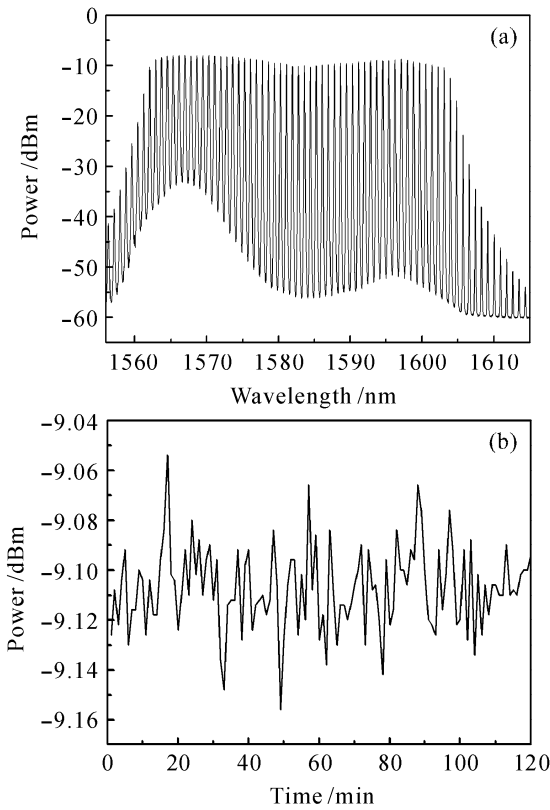


图 15 激光输出特性

(a) 输出光谱; (b) 单波长功率随时间波动特性

Fig. 15 Output characteristics of the laser output

(a) output spectrum;

(b) output power fluctuation versus time

3.5 基于非线性偏振旋转的多波长掺铒光纤激光器

非线性偏振旋转(NPR)效应曾用于被动锁模激光器中作为饱和吸收体来产生飞秒脉冲^[39]。也用于主动锁模的光纤激光器来抑制超模噪声,以及有理数谐波锁模脉冲的振幅均衡^[40,41]。这里,提出将它用于掺铒光纤激光器中获得稳定的多波长激光输出。图 16 是光纤环形腔激光器结构示意图,参数详见文献[25]。非线性偏振旋转效应能用于产生稳定多波长的工作原理与基于非线性光纤环境的多波长激光器原理类似,PC2-SMF-PC1-polarizer 结构同样可有效引入依赖光强的损耗,这是实现此激光器稳定多波长输出的关键。

实验中,用不同长度的单模光纤得到的多波长输出的个数也有所不同。当单模光纤的长度为 1.2 km 时,得到的最大波长输出的个数为 30,但波长间的功率差异较大,图 17(a)给出了一个 22 波长的输出光谱,22 个波长的功率差异小于 1.5 dB。当把 90:10 的输出耦合器换为 99:1 的输出耦合器以增加腔内的非线性效应时,波长的个数增加到了 28 个,如图 17(b)所示,波长间功率差异小于 2 dB。PC2-SMF-PC1-polarizer 结构还可引入依赖波长的

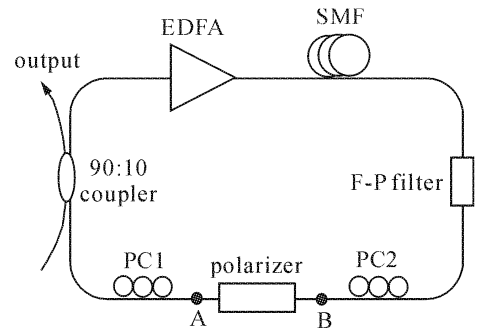


图 16 基于非线性偏振旋转效应的多波长光纤激光器

Fig. 16 Schematic diagram of the proposed multi-wavelength fiber laser based on NPR effect

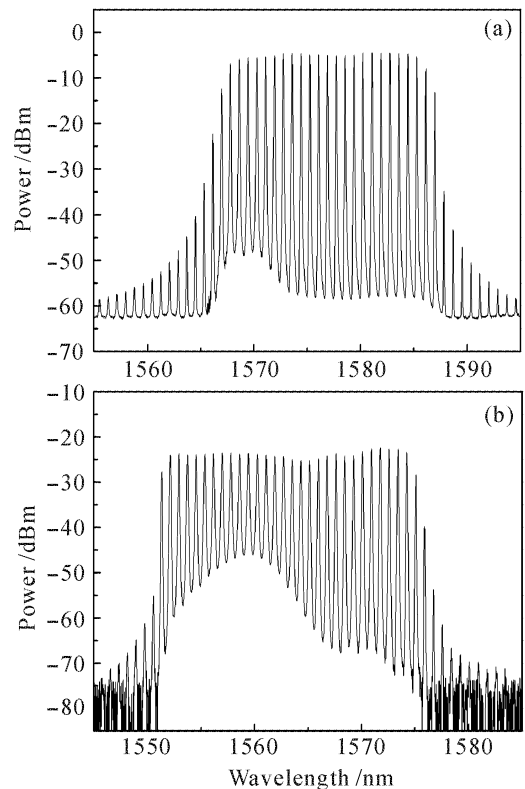


图 17 激光器在 90:10(a)和 99:1(b)的输出耦合器情况下的输出光谱

Fig. 17 Output spectra of the laser under (a) 22-wavelength operation with a 10% output coupler, and (b) 28-wavelength operation with a 1% output coupler

损耗,所以在调整偏振控制器过程中,输出波长数较少时,可以实现多波长的调谐。图 18 给出了两个代表性的光谱,波长分别位于 1550 nm 和 1600 nm,波长调谐可达 50 nm。

该实现技术的优点是可以同时实现数十个波长的室温稳定激射,并可实现多波长可调谐,具有较强的实用价值。不足是需要激光腔内具有较高的功率水平,激光腔的长度比较长。

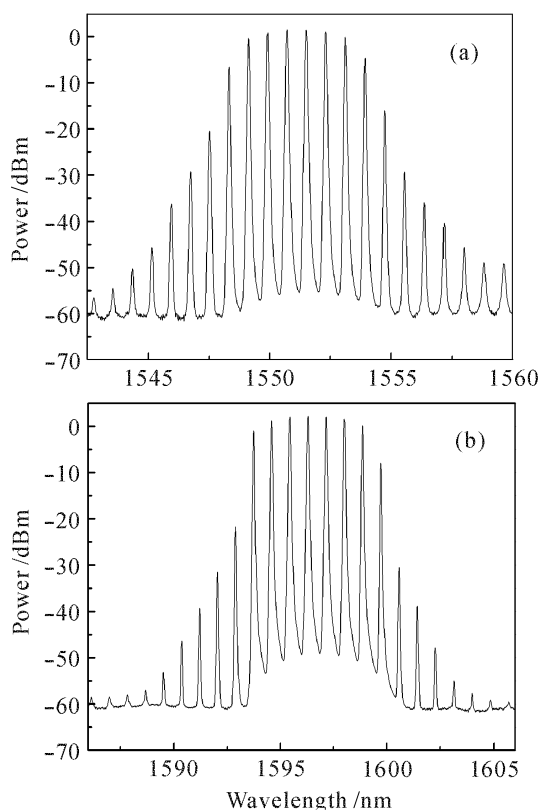


图 18 激光器在 1550 nm(a)和 1600 nm(b)波长的输出光谱

Fig. 18 Output spectra when the output wavelengths are near 1550 nm (a) and 1600 nm (b)

4 总结与展望

本文结合我们在多波长光纤激光器研究方面的一些工作综述了近年来国际上提出的室温稳定的多波长光纤激光器的主要实现原理、结构及技术。这些激光器各有优缺点,可根据不同的应用场合选用不同的实现技术。虽然该领域的研究已经取得了长足的发展,但仍有诸多关键技术值得深入探索和研究,目前该领域的主要研究趋势及方向有:1) 同时实现数十个室温稳定、且输出功率均衡的、结构简单、成本低廉的多波长光纤激光器技术;2) 波长可开关、波长位置及波长间隔可调谐、结构简单的多波长光纤激光器技术;3) 窄线宽或单频的多波长光纤激光器实现技术;4) 多波长光纤激光在光通信、光传感、光学测量及微波等领域的应用研究等。

参 考 文 献

- 1 S. B. Poole, D. N. Payne, M. E. Ferriann. Fabrication of low-loss optical fibers containing rare-earth ions [J]. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(17):737~738
- 2 R. J. Mears, L. Reekie, S. B. Poole *et al.*. Low-threshold tunable-CW and Q-switched fiber laser operating at 1.54 μm [J]. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(3):159~160
- 3 R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey *et al.*. Low-noise erbium-doped fiber amplifier operating at 1.54 μm [J]. *Electron. Lett.*, 1987, **23**(19):1026~1028
- 4 N. Park, P. F. Wysocki. 24-line multiwavelength operation of erbium-doped fiber-ring laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(11):1459~1461
- 5 A. Bellemare, M. Karasek, M. Rochette *et al.*. Room temperature multifrequency erbium-doped fiber lasers anchored on the ITU frequency grid [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(6):825~831
- 6 Y. -G. Han, T. V. A. Tran, S. B. Lee. Wavelength-spacing tunable multi wavelength erbium-doped fiber laser based on four-wave mixing of dispersion-shift fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(6):697~699
- 7 S. Pan, C. Lou, Y. Gao. Multiwavelength erbium-doped fiber laser based on inhomogeneous loss mechanism by use of a highly nonlinear fiber and a Fabry-Perot filter [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(3):1113~1118
- 8 J. Sun, J. Qiu, D. Huang. Multiwavelength erbium-doped fiber lasers exploiting polarization hole burning [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **182**(1-3):193~197
- 9 Y. Kimura, M. Nakazawa. Multiwavelength cw laser oscillation in a Nd^{3+} and Er^{3+} doubly doped fiber laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**(14):1251~1253
- 10 N. Park, J. W. Dawson, K. J. Vahala. Multiple wavelength operation of an erbium-doped fiber laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(6):540~541
- 11 Zhao Donghui, Yang Xiufeng, Ge Chunfeng *et al.*. A structure for multi-wavelength narrow-linewidth Er-doped fiber ring laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(5):459~461
- 赵东晖, 杨秀峰, 葛春风 等. 一种多波长窄线宽环形掺铒光纤激光器[J]. *光子学报*, 1998, **27**(5):459~461
- 12 J. J. Yu, K. J. Guan, B. J. Yang. Multiwavelength generation in an erbium-doped fiber laser using a Fabry-Perot filter [J]. *Microwave Optical Technol. Lett.*, 1998, **19**(1):51~54
- 13 Z. H. Li, C. Y. Lou, Y. Z. Gao. A multiwavelength erbium-doped fiber laser realized by controlling the polarization state [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1999, **20**(8):1487~1491
- 14 E. Desurvire, J. L. Zyskind, J. R. Simpson. Spectral gain hole-burning at 1.53 μm in erbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**(4):246~248
- 15 J. L. Zyskind, E. Desurvire, J. W. Sulhoff *et al.*. Determination of homogeneous linewidth by spectral gain hole-burning in an erbium-doped fiber amplifier with $\text{GeO}_2:\text{SiO}_2$ core [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**(12):869~871
- 16 J. W. Sulhoff, A. K. Srivastava, C. Wolf *et al.*. Spectral-hole burning in erbium-doped silica and fluoride fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(12):1578~1579
- 17 S. Yamashita, K. Hotate. Multiwavelength erbium-doped fiber laser using intracavity etalon and cooled by liquid nitrogen [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(14):1298~1299
- 18 A. Bellemare, M. Karásek, M. Rochette *et al.*. Room temperature multifrequency erbium-doped fiber lasers anchored on the ITU frequency grid [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(6):825~829
- 19 S. K. Kim, M. J. Chu, J. H. Lee. Wideband multiwavelength erbium-doped fiber ring laser with frequency shifted feedback [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **190**:291~302
- 20 J. Maran, S. LaRochelle, P. Besnard. C-band multi-wavelength frequency- shifted erbium-doped fiber laser [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **218**:81~86
- 21 K. Zhou, D. Zhou, F. Dong *et al.*. Room-temperature multiwavelength erbium-doped fiber ring laser employing

- sinusoidal phase-modulation feedback [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(11):893~895
- 22 X. Liu, X. Zhou, C. Lu. Four-wave mixing assisted stability enhancement: Theory, experiment, and application [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(17):2257~2259
- 23 X. Yang, X. Dong, S. Zhang *et al.*. Multiwavelength erbium-doped fiber laser with 0.8-nm spacing using sampled Bragg grating and photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(12):2538~2540
- 24 Xinhuan Feng, H. Tam, Heliang Liu *et al.*. Multiwavelength erbium-doped fiber laser employing a nonlinear optical loop mirror [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **268**:278~281
- 25 Xinhuan Feng, H. Tam, P. K. A. Wai. Stable and uniform multiwavelength erbium-doped fiber laser using nonlinear polarization rotation [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(18):8206~8210
- 26 Hu Song, Wei Shikang, Zhan Li *et al.*. 15-wavelength Brillouin erbium-doped fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2):212~215
胡松,尉仕康,詹黎等. 15波长输出的布里渊掺铒光纤激光器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2):212~215
- 27 J. Hernandez-Cordero, V. A. Kozlov, A. L. G. Carter *et al.*. Fiber laser polarization tuning using a Bragg grating in a Hi-Bi fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(7):941~943
- 28 Y. W. Lee, B. Lee. Wavelength-switchable Erbium-doped fiber ring laser using spectral polarization-dependent loss element [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(6):795~797
- 29 Xinhuan Feng, Yange Liu, Shenggui Fu *et al.*. Switchable dual-wavelength ytterbium-doped fiber laser based on a few-mode fiber grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(3):762~764
- 30 Xinhuan Feng, Yange Liu, Shuzhong Yuan *et al.*. L-band switchable dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on a multimode fiber Bragg grating [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(16):3834~3839
- 31 A. J. Poustie, N. Finlayson, P. Harper. Multiwavelength fiber laser using a spatial mode beating filter [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(10):716~718
- 32 Li Yao, Feng Xinhuan, Sun Lei *et al.*. Dual-wavelength fiber laser based on polarization hole-burning effect at room temperature [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2):173~175
李尧,冯新焕,孙磊等. 用偏振烧孔实现的室温双波长光纤激光器[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2):173~175
- 33 Feng Xinhuan, Sun Lei, Liu Yange *et al.*. Switchable and spacing-tunable dual-wavelength erbium-doped fiber laser using a PM fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):145~148
冯新焕,孙磊,刘艳格等. 基于保偏光纤光栅的双波长掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2):145~148
- 34 Lei Sun, Xinhuan Feng, Weigang Zhang *et al.*. Beating frequency tunable dual-wavelength erbium-doped fiber laser with one fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(6):1453~1455
- 35 Yange Liu, Xinhuan Feng, Shuzhong Yuan *et al.*. Simultaneous four-wavelength lasing oscillations in an erbium-doped fiber laser with two high birefringence fiber Bragg gratings [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(10):2056~2061
- 36 Yange Liu, Xinyong Dong, Ping Shum *et al.*. Stable room-temperature multi-wavelength lasing realization in ordinary erbium-doped fiber loop lasers [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(20):9293~9298
- 37 I. N. Duling, C.-J. Chen, P. K. A. Wai *et al.*. Operation of a nonlinear loop mirror in a laser cavity [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(1):194~199
- 38 K. Smith, N. J. Doran, P. G. J. Wigley. Pulse shaping, compression, and pedestal suppression employing a nonlinear-optical loop mirror [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(22):1294~1296
- 39 K. Tamura, H. A. Haus, E. P. Ippen. Self-starting additive pulse mode-locked erbium fiber ring laser [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(24):2226~2228
- 40 Yuhua Li, Caiyun Lou, Jian Wu *et al.*. Novel method to simultaneously compress pulses and suppress supermode noise in actively mode-locked fiber ring laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(9):1250~1252
- 41 Zhihong Li, Caiyun Lou, Kam *et al.*. Theoretical and experimental study of pulse-amplitude-equalization in a rational harmonic mode-locked fiber ring laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(1):33~37