

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2023.05.001

双波长锁模光纤激光器研究进展

刘梦媛^{1,2,3}, 齐瑶瑶^{1,2,3*}, 白振旭^{1,2,3}, 张雨^{1,2,3},
王静静^{1,2,3}, 丁洁^{1,2,3}, 王雨雷^{1,2,3}, 吕志伟^{1,2,3}

(1 河北工业大学先进激光技术研究中心, 天津 300401;

2 河北省先进激光技术与装备重点实验室, 天津 300401;

3 天津市电子材料与器件重点实验室, 天津 300401)

摘要: 随着超大容量光通信的发展, 密集波分复用技术被广泛采用。该技术需要稳定的高重复频率超快脉冲序列作为信号源, 若采用多个单一波长输出的锁模激光器作为激光光源, 系统的成本和复杂性将显著提高; 而双波长锁模激光器因具有双波长输出、脉冲持续时间短、光束质量好和可调谐范围宽等优点, 可有效满足超大容量光通信所需信号源的要求。此外, 该光源在光谱学、微波产生等领域也均有应用。双波长锁模光纤激光器可利用双谐振腔结构、二维材料的高非线性以及腔内滤波效应等设计实现, 其中腔内滤波效应可通过在激光谐振腔内插滤波器件、多模干涉和非线性效应如非线性偏振旋转三种方式引入。目前双波长锁模光纤激光器的输出波长主要在1 μm 和1.5 μm 波段的光谱区域, 输出功率为mW量级, 未来将向实现输出中红外或更长工作波段以及瓦级输出功率方向发展。

关键词: 激光技术; 光纤激光器; 锁模; 双波长

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2023)05-00615-20

Research progress of dual-wavelength mode-locked fiber laser

LIU Mengyuan^{1,2,3}, QI Yaoyao^{1,2,3*}, BAI Zhenxu^{1,2,3}, ZHANG Yu^{1,2,3},

WANG Jingjing^{1,2,3}, DING Jie^{1,2,3}, WANG Yulei^{1,2,3}, LYU Zhiwei^{1,2,3}

(1 Advanced Laser Technology Research Center, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2 Hebei Key Laboratory of Advanced Laser Technology and Equipment, Tianjin 300401, China;

3 Tianjin Key Laboratory of Electronic Materials and Devices, Tianjin 300401, China)

Abstract: With the development of ultra-high capacity optical communication technology, dense wavelength division multiplexing (DWDM) technology is widely used. For DWDM technology, a stable high repetition rate ultrafast pulse laser source is required. If multiple single-wavelength mode-locked lasers are used as signal sources, the cost and complexity of the system will be very high. While dual-wavelength mode-locked laser, due to its advantages of dual-wavelength output, short pulse duration, good beam quality, and wide tunable wavelength range, can overcome the disadvantage of multiple single-wavelength mode-locked lasers, and effectively meet the requirements for ultra-high capacity optical communication technology. In addition, this kind of light source is also widely used in the fields of

基金项目: 国家自然科学基金(62375075), 河北省自然科学基金(F2022202036)

作者简介: 刘梦媛(1998-), 女, 河北衡水人, 研究生, 主要从事光纤激光技术方面的研究。E-mail: meng13292259057@163.com

导师简介: 齐瑶瑶(1990-), 女, 天津人, 博士, 硕士生导师, 主要从事高功率激光技术与非线性光学方面的研究。E-mail: qiyao@hebut.edu.cn

收稿日期: 2021-05-18; 修改日期: 2021-09-09

*通信作者。

spectroscopy and microwave generation. Dual-wavelength mode-locked fiber lasers can be realized using dual-resonator structure, high nonlinearity of two-dimensional materials and intra-cavity filtering effect. Specifically, intracavity filtering effect can be introduced by inserting filter devices directly into the laser resonator, using multimode interference or using nonlinear effects such as nonlinear polarization rotation. At present, the output wavelength of dual-wavelength mode-locked fiber lasers is mainly concentrated in the spectral region of 1 μm and 1.5 μm band, and the output power is about milliwatt level. In the future, the laser will develop to achieve the output with mid-infrared or even longer wavelength, as well as the average power of watt-level.

Key words: laser techniques; fiber laser; mode locking; dual-wavelength

0 引言

自二十世纪六十年代光纤技术应用于激光器以来, 光纤激光器一直是国际激光领域的研究热点^[1], 在光纤传感^[2]、光通信^[3-5]等领域均有广泛应用。除了作为优质的脉冲光源, 光纤激光器还可作为非线性光学系统平台来研究各种孤子动力学行为。此外, 同时输出两种波长或多种波长的光纤激光器克服了多台单波长激光器结构复杂的缺点, 应用也极为广泛。通常光纤激光器的腔长较长, 纵模间隔较小, 多为多纵模工作, 这限制了它的应用和发展。而双波长单纵模运转的光纤激光器因具有频差大、调谐方便以及窄线宽的特点, 可获得足够长的相干长度, 以进行长距离测量, 因此被广泛应用于激光干涉测量、高速相干光通信等领域^[6]。

借助于锁模器件, 在光纤激光器中已获得了各种类型的孤子脉冲, 如耗散孤子^[7]、双波长锁模^[8]、可切换锁模^[9,10]、多脉冲锁模^[11]等。其中双波长锁模光纤激光器作为超快光纤激光器家族的一员, 由于具有输出波长数目多、光束质量高、转换效率高和结构紧凑等优点而成为研究热点^[12,13], 不仅在超大容量光通信系统中发挥作用, 还广泛应用于光谱学^[14]、相控阵天线^[15]和微波产生^[16]等领域, 逐渐成为国际关注的焦点。

到目前为止, 双波长锁模激光器主要包括基于双谐振腔结构的双波长锁模光纤激光器、基于二维(2D)材料的双波长锁模光纤激光器和基于腔内滤波效应的双波长锁模光纤激光器^[17]。基于双谐振腔结构的双波长锁模光纤激光器输出激光稳定性好, 但由于产生的激光沿不同支路传播, 使输出激光相干性较差。2D材料如拓扑绝缘体、碳纳米管和黑磷等由于具有工作波段宽、损伤阈值高等特点, 使得基于2D材料的双波长锁模光纤激光器发展迅速。当前, 基于腔内滤波效应的双波长锁模光纤激光器发展最快, 其滤波效应通常由一些光学器件或非线性效应诱导产生, 如光纤布拉格光栅(FBG)^[18]、保偏光纤(PMF)^[19]、马赫-曾德干涉仪(MZI)^[20]等, 相比于其它方式更具灵活性。本文简要回顾了双波长锁模光纤激光器的研究现状, 并对双波长锁模光纤激光器的原理、技术难点以及未来发展方向进行了分析和讨论。

1 研究进展

对于双波长输出的光纤激光器, 当相邻波长之间的间距小于增益光纤的线宽时, 存在于增益光纤均匀展宽中的模式竞争和模式跳变现象是不可避免的。增益光纤均匀展宽是抑制双波长输出的关键因素, 因此为了获得稳定的双波长输出, 需削弱增益光纤的均匀展宽效应, 以抑制模式竞争和模式跳变。为了解决这些问题, 研究人员用液氮冷却掺铒光纤^[21], 极大地抑制了均匀展宽效应。然而, 该方法在实际应用中存在成本高、结构复杂等缺点。

因此,为了满足光通信、光传感等领域对双波长锁模光纤激光器的需求,相关新技术研发迫在眉睫。双波长锁模脉冲的形成一般需两个条件:一是腔内存在锁模器件;二是腔内存在滤波器件,从而将连续激光转换成多个不同波长组成的激光脉冲^[22]。对于前者,主动锁模技术^[23-30]和被动锁模技术[如非线性光纤环形镜(NOLM)^[31-36]、非线性偏振旋转(NPR)^[37-44]、半导体可饱和吸收镜(SESAM)^[45-50]以及碳纳米管^[51,52]]被用来实现超快脉冲输出。与主动锁模相比,被动锁模不需要调制器且容易实现。对于腔内滤波效应可采用直接方法(如采样光栅^[24]和高双折射光纤^[29-31]),以及间接方法[如在高非线性光纤(HNLF)中产生四波混频效应或受激布里渊散射^[39]]来实现。基于上述方法,腔内功率在不同波长间重新分配,可有效抑制增益光纤均匀展宽引起的模式竞争、跳变,以实现稳定的多波长激光输出。例如,1991年, Schlager等^[23]首次采用双折射PMF在主动锁模掺铒光纤激光器中获得双波长脉冲。1992年, Matsas等^[53]基于NPR锁模设计了双波长孤子掺铒光纤激光器。1994年, Noske等^[31]首次利用NOLM技术在铒镜共掺光纤激光器中获得了双波长ps量级的孤子脉冲。2009年,南洋理工大学Zhang等^[45]利用SESAM实现了多波长耗散孤子光纤激光输出。2011年,北京航空航天大学Zhao等^[54]利用碳纳米管和腔内损耗机制实现了可切换的双波长孤子光纤激光输出。

基于以上介绍,可总结出室温下实现双波长锁模输出的几种光纤激光器:基于双谐振腔结构的双波长锁模光纤激光器、基于2D材料的双波长锁模光纤激光器和基于腔内滤波效应的双波长锁模光纤激光器。其中双谐振腔激光器可使用双增益光纤或共用单增益光纤,具有双增益光纤的双谐振腔光纤激光器可自然产生两种光束,具有宽的波长范围并且独立工作^[16];而使用单增益光纤的双谐振腔激光器较难产生重频一致的双波长脉冲,需精确调整腔长来实现双波长同步锁模运转。目前该类激光器已在时间分辨成像^[55]、拉曼散射光谱^[56]、中红外波产生^[57]等领域有所应用。基于2D材料的双波长锁模光纤激光器凭借2D材料所具有的工作波段宽、损伤阈值高等特点而得到了迅速发展。与以上两种方式相比,基于腔内滤波效应的双波长锁模光纤激光器的实现更具灵活性,其滤波效应通常由一些光学器件或非线性效应诱导产生,且滤波器的周期、中心波长等可通过改变器件相应参数进行调整。

1.1 基于双谐振腔结构的双波长锁模光纤激光器

基于双谐振腔结构的双波长锁模光纤激光器输出激光稳定性好,此类激光器一般共享增益介质,但产生的激光沿不同支路传播,因此激光相干性差。国内外对此类激光器进行了广泛研究。2000年,清华大学Li等^[58]报道了一种基于主动锁模双波长激光器,通过引入一对多路复用器/解复用器来实现双波长工作,在不改变射频条件下调整谐振腔中与该信道相关联的延迟线,可分别改变每个信道的重复频率,成功在1556.7 nm和1559.9 nm处获得带宽为0.18 nm和0.23 nm、重复频率分别为2.5 GHz和5 GHz、脉宽分别为17.7 ps和13 ps的脉冲输出。虽然主动锁模光纤激光器具有高重频的优点,但为了产生稳定的多波长脉冲输出,所有脉冲应同步通过调制器,即所有锁模波长的循环时间相同或者不同波长需锁定在不同阶次的谐波,然而腔内色散及滤波器在腔内不能级联,不同波长将经历不同的腔长,这需要精确调整腔长并引入反馈系统,从而使系统十分复杂^[59]。2012年,天津大学Bai等^[60]报道了基于SESAM锁模的双波长掺铒光纤激光器,通过分别调节两个谐振腔中的体布拉格光栅,得到了中心波长为1030 nm和1040 nm、带宽分别为0.34 nm和0.44 nm、重复频率分别为11.39 MHz和11.41 MHz、脉宽分别为3.3 ps和2.53 ps的脉冲输出,最大平均功率为9.1 mW,且通过调节体布拉格光栅角度,其中心波长可在1009.7~1057.6 nm和1011.6~1052.6 nm范围内变化。2016年,北京交通大学Dong等^[61]报道了采用两个不同中心波长的FBG设计的光纤激光器,在1549.95 nm和1552.04 nm

处同时获得了激光输出。同年,四川大学 Wang 等^[62]报道了一种基于双分支 NPR 技术的波长间距可调的双波长锁模光纤激光器,其中心波长分别为 1542 nm 和 1561 nm、光谱带宽均为 3 nm、脉冲宽度分别为 1.38 ps 和 1.7 ps,并且通过精确调节腔长可实现同步锁模运转,输出功率为 43.3 mW,这是首次使用双分支 NPR 技术在掺铒光纤激光器中实现同步锁模双波长输出。此外, Diaz^[63]报道了双谐振腔结构的掺铒光纤激光器,可同时在 1550 nm 和 1555 nm 处输出激光。近几年,基于石墨烯、黑磷等新型材料的可饱和吸收体 (SA) 实现锁模的技术逐渐成熟。2018 年, Lau 等^[64]报道了基于石墨烯锁模的双波长掺铒光纤激光器,采用共用增益介质的光纤分支和 SA 连接,输出的双波长脉冲中心波长分别为 1530 nm 和 1560 nm、脉宽分别为 900 fs 和 940 fs。2019 年,上海科技大学 Zeng 等^[65]利用双谐振腔结构设计了基于 NOLM 锁模的全保偏光纤激光器,同时获得了 1 μm 和 1.5 μm 波段的激光脉冲输出,中心波长分别为 1082.8 nm 和 1569.7 nm、光谱带宽分别为 0.2 nm 和 0.3 nm、脉冲宽度分别为 9.2 ps 和 12.8 ps,最大输出功率为 1.3 mW,并且为了使不同波长脉冲产生同步,引入准直器以精确调整激光腔长,脉冲重频为 17.3 MHz,实验装置如图 1 所示。

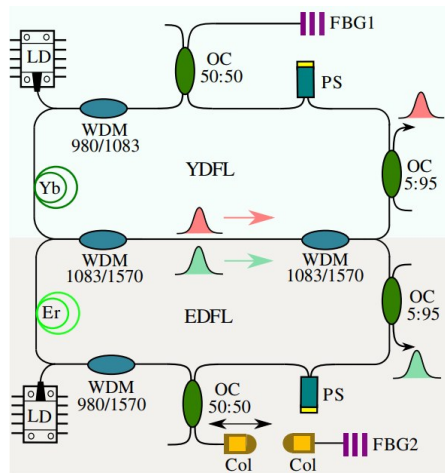


图 1 基于 NOLM 锁模的双波长光纤激光器^[65]

Fig. 1 Dual wavelength fiber laser based on NOLM mode locking technology^[65]

基于双谐振腔结构的双波长锁模光纤激光器一般共享增益介质,输出双波长间隔为几到几十纳米,但 Zeng 等^[65]提出的创新结构,在双谐振腔结构的基础上使用不同增益介质来同时获得不同波段的激光输出,输出波长间隔扩大至 486.9 nm。在该结构中,两个激光腔的萨尼亚克(Sagnac)型环路由一段普通单模光纤连接,使同向传播的脉冲引起非对易非线性相移差,利于两个双色光纤激光器之间被动同步,且具有长达 16.2 mm 的腔长失配容忍度。另外,上海理工大学 Jiang 等^[66]在此结构基础上通过优化主激光注入脉冲能量和激光器腔内滤波带宽等实验参数,获得了长达 26 mm 的腔长失配容忍度。到目前为止,同步光纤激光器已在多种被动锁模结构例如基于 NPR^[67-69]或 SA^[70-72]中实现。然而,目前报道的同步系统多数基于非保偏结构建立,因此不可避免地受环境对偏振态的扰动影响,导致激光器运行不稳定^[68]。此外,同步操作的启动通常需要精确调谐激光谐振腔内演化的偏振态^[69,72]。所以上述 Zeng 等人基于保偏结构被动同步双色锁模光纤激光器稳定性更高,这为基于双谐振腔结构的双波长锁模光纤激光器提供了新的设计思路,同时可以满足超短脉冲相干合成、非线性光参量变换、粒子同步加速等应用对超快光学脉冲的精确同步需求^[73]。

1.2 基于二维材料的双波长锁模光纤激光器

为进一步简化实验结构,出现了基于非线性效应的多波长锁模激光器。这里的非线性效应是指在高非

线性光纤或者特种光纤中产生四波混频或受激布里渊散射^[74,75], 基于这类非线性效应, 功率在不同波长间重新分配, 可有效抑制增益光纤均匀展宽引起的模式竞争、跳变, 从而实现多波长脉冲输出。近年来涌现的拓扑绝缘体和二维硫化物等新型 2D 材料具有工作波段宽、损伤阈值高、制备工艺简单等特点^[76], 已被广泛应用于光子器件领域, 并且得益于先进的半导体技术, 此类器件的参数(如恢复时间、调制深度和饱和通量)可被精确控制。该类材料具有特殊的“狄拉克锥”型能带结构^[77]。如图 2 所示, 当入射光能量较低时, 价带电子线性吸收光子能量跃迁到导带, 表现为线性吸收过程, 由于 2D 材料具有对称的能带结构, 从导带到禁带的电子激发, 动量守恒能够自动满足, 从而产生一个非常宽的光吸收谱。随着入射光能量逐渐增加, 价带和导带中所对应的光子能量带全部被电子和空穴占据, 阻止了对光子的进一步吸收, 这时 2D 材料达到饱和态, 光子无损耗通过。因此 2D 材料可以实现宽波长范围内的饱和吸收特性和高非线性特性^[78,79]。

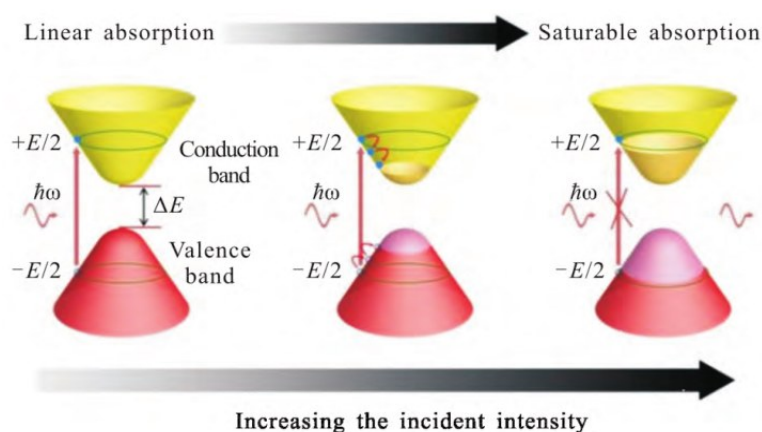


图 2 “狄拉克锥”型能带结构^[77]

Fig. 2 "Dirac Cone" band structure^[77]

由上述介绍可知, 新型 2D 材料在激光器腔内可以等效为一段高非线性光纤, 既可以利用其优良的饱和吸收特性实现锁模, 又可利用其显著的四波混频效应产生多波长。因此, 基于 2D 材料高非线性效应的多波长光纤激光器近年来得到了飞速发展。2009 年以来, 利用石墨烯饱和吸收特性陆续实现了 1~2 μm 波段的锁模^[80-85]和调 Q^[86]激光输出, 获得了传统孤子、暗脉冲以及耗散孤子等脉冲类型。研究人员进一步利用石墨烯和氧化石墨烯的高非线性, 在光纤激光器中, 还实现了多波长的调 Q^[87]和锁模^[88-90]脉冲。2011 年, Luo 等^[91]利用石墨烯在掺镜激光器中实现了多波长调 Q 操作, 因此石墨烯具有作为锁模器件和多波长发生器的潜在优势。华南师范大学 Zhao 等^[92]利用石墨烯锁模, 在掺镜光纤激光器中产生了双波长脉冲, 中心波长分别为 1061.8 nm 和 1068.8 nm, 带宽分别为 4.5 nm 和 2.16 nm, 重复频率为 1.78 MHz, 并且随着泵浦功率的增加, 脉冲持续时间可以在 1.41~4.23 ns 间变化, 最大输出功率为 3.05 mW。黑磷与石墨烯性质相似, 具有较强的饱和吸收和高非线性折射率特性, 南京邮电大学的 Yun^[93]在基于黑磷锁模的掺铒光纤激光器中实现双波长激光输出, 中心波长分别为 1533 nm 和 1558 nm, 带宽分别为 3.7 nm 和 6.9 nm, 重频差为 643 Hz。过渡金属二硫化物也具有超快光学非线性特性, Wang 等^[94]在相同实验条件下证明了二硫化钼(MoS_2)比石墨烯具有更好的饱和吸收性, 因此过渡金属二硫化物在双波长锁模光纤激光器发展中亦起着重要作用。哈尔滨工业大学的 Guo 等^[95]利用基于二硫化钨锁模的掺铒光纤激光器成功在 1558.54 nm 和 1565.99 nm 处获得双波长激光输出, 带宽分别为 4.2 nm 和 4.4 nm, 脉冲宽度分别为 585 fs 和 605 fs, 最大输出功率为 10.1 mW, 并且通过调节泵浦功

率和偏振控制器 (PC) 可以实现双波长和单波长激光的切换输出。另外, 基于单壁碳纳米管和拓扑绝缘体锁模的双波长光纤激光器也取得了很好发展。2003 年以来, 采用碳纳米管作为 SA 引起超快激光领域研究人员的广泛兴趣, 不仅实现了在 1~2 μm 波长的单波长锁模运转^[96-99], 还获得了多波长孤子脉冲^[17,54]。2011 年, 北京航空航天大学 Zhao 等^[54]报道了一种基于单壁碳纳米管的双波长锁模孤子光纤激光器, 通过腔内可调衰减器来改变腔内损耗, 从而控制掺铒光纤激光器的增益分布, 成功在 1532.2 nm 和 1557.3 nm 下同时产生了 0.99 ps 和 0.95 ps 的脉宽输出, 光谱带宽分别为 3.3 nm 和 3.8 nm, 重频差为 470 Hz, 最大输出功率约为 0.25 mW。2015 年, Guo 等^[100]报道了基于拓扑绝缘体的双波长矩形脉冲光纤激光器, 在 1561.6 nm 和 1562.1 nm 处得到了重复频率为 3.54 MHz, 光谱带宽为 0.25 nm, 脉冲宽度为 16.05 ns 的脉冲输出, 最大输出功率为 10 mW。

2D 材料结构简单、成本较低, 在多波长锁模光纤激光器中具有巨大优势。在这类激光器中, 2D 材料需同时具有饱和吸收和高非线性折射率这两种特性, 从而可以利用显著的非线性效应来有效缓解模式竞争现象, 目前基于 2D 材料的双波长锁模激光器输出脉宽最窄已达 600 fs, 但输出功率较低, 为 mW 量级。

1.3 基于腔内滤波效应的双波长锁模光纤激光器

由 1.1 节介绍可知, 双谐振腔结构虽然原理简单, 输出激光稳定性好, 但由于不同支路光纤长度、色散和折射率等条件不同, 使输出激光之间的相干性较差。本节将介绍的另一种获得双波长激光脉冲的有效方法是在腔内引入滤波效应, 光谱滤波效应可通过双折射效应、激光谐振腔内插入滤波器件、非线性效应如 NPR 以及多模干涉等技术引入, 滤波器周期、中心波长和调制深度可以通过改变器件长度和光纤双折射等相应参数方便地进行调整, 具有很好的灵活性。

1.3.1 双折射诱发滤波效应锁模光纤激光器

光谱滤波效应可由双折射诱导的梳状滤波器来引入, 即利用双折射介质引入相位延迟的梳状滤波器, 通常在谐振腔内使用利奥 (Lyot) 双折射滤波器来实现双波长激光输出。基于光纤的 Lyot 滤波器结构是在两个偏振控制器 (PC) 之间放置一段双折射光纤如 PMF, 其结构如图 3 所示。

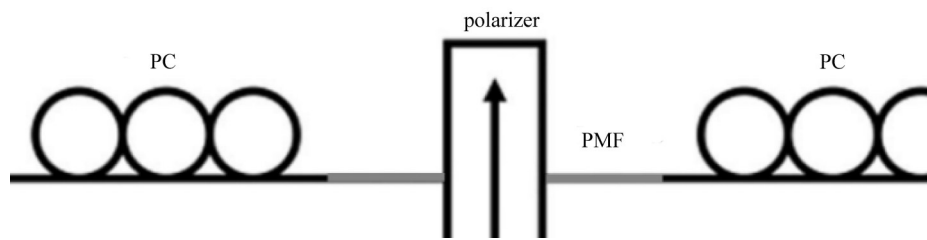


图3 Lyot 滤波器原理图

Fig. 3 Schematic diagram of Lyot filter

Lyot 滤波器的传输特性可以用琼斯矩阵函数^[101]表示为

$$T = \frac{1}{2} \cos^2 \left(\frac{\pi \Delta n}{\lambda} L_{\text{PMF}} \right) (1 + \sin 2\theta), \quad (1)$$

式中: $\Delta n = n_{\text{slow}} - n_{\text{fast}}$ 表示为 PMF 的慢轴与快轴间的折射率差; L_{PMF} 为 PMF 的长度; θ 为输入光偏振方向与 PMF 快轴的夹角, 可以通过调节 PC 来改变。Lyot 滤波器的自由光谱范围可表示为

$$\Delta\lambda = \lambda^2 / (\Delta n * L_{\text{PMF}}). \quad (2)$$

由(2)式可知, Lyot滤波器的自由光谱范围和PMF的双折射率与长度的乘积成反比, 因此为了实现锁模操作, 自由光谱范围要比锁模输出的光谱宽度更宽^[102]; 通过改变PMF长度, 可以调整滤波器的波长间隔; 另外通过调节PC, 可以调节光谱的透射幅值, 由(1)式可知 $(1 + \sin 2\theta)$ 表示该透射轮廓的幅值函数, 该幅值依赖于 θ , 因此这种效应可以用来平衡增益光纤增益谱中两个显著增益峰, 从而实现双波长锁模操作。

2006年, 南洋理工大学的Gong等^[37]提出在环形光纤激光器中插入两段PMF来增强双折射效应, 成功在1558 nm和1570 nm处得到带宽分别为2 nm和3 nm、脉冲宽度分别为2.4 ps和2.1 ps、重频为9.24 MHz的超短脉冲输出。2012年, Mao等^[103]实现单一谐振腔的双波长锁模输出, 并指出光纤锁模激光器增益介质的鞍状增益谱和光纤双折射引起的腔滤波效应充当带通滤波器, 在高泵浦功率条件下, 两个不同的波段被同时放大, 中间波段被抑制, 并且获得双波长连续波发射状态; 后在SA的作用下, 激光从噪声演化为锁模状态, 实现双波长激射。2019年, Zhao等^[104]提出了一种基于并联双Lyot滤波器的可切换多波长掺铒光纤激光器, 不仅成功在1552.7 nm和1560.7 nm处得到了脉冲输出, 通过调节PC来控制滤波器的光谱变化, 还进一步实现了波长间隔可调功能, 以及三波长脉冲激光输出, 实验装置如图4所示。

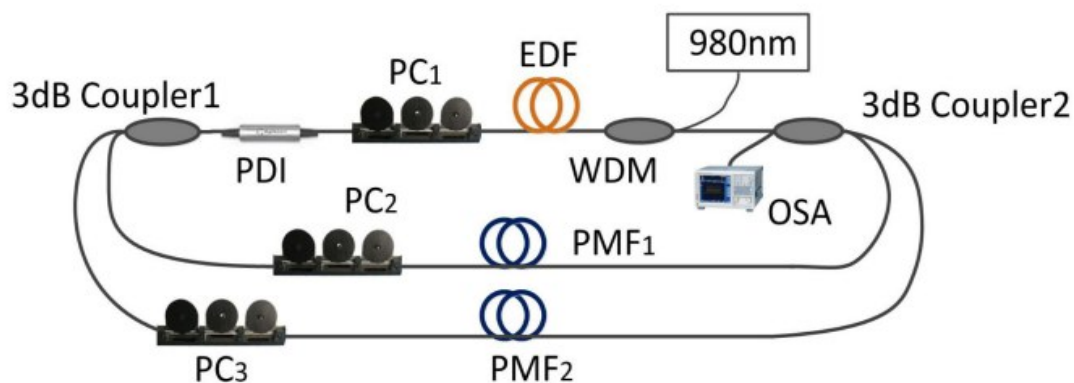


图4 基于Lyot滤波器的可切换双波长掺铒光纤激光器^[104]

Fig. 4 Switchable dual wavelength Er-doped fiber laser based on Lyot filter^[104]

2019年, 日本丰田技术研究所的Luo等^[105]基于SESAM锁模, 并结合PMF引起的偏振相关损耗诱发周期性Lyot滤波效应实现了双波长激光输出, 输出脉冲中心波长分别为1557.7 nm和1562.7 nm, 重复频率分别为18.802 MHz和18.801 MHz。2020年, Zhu等^[106]也在此基础上设计动态可调Lyot滤波器实现了双波长激光输出, 输出脉冲中心波长分别为1535 nm和1564 nm, 带宽分别为4 nm和3.6 nm, 脉冲宽度分别为853 fs和1000 fs, 重频差为340 Hz, 最大输出功率约为0.49 mW。

基于双折射诱发Lyot滤波效应的锁模光纤激光器具有低成本、低损耗的优势^[107], 且由于激光腔内色散影响, 两个不同中心波长的脉冲在时域上是异步的, 形成了频差为几百Hz的双梳系统, 但通过改变Lyot滤波器中PC状态, 可在一定范围内实现两个脉冲中心波长的可调操作。此外, 还可进一步实现不同状态的锁模输出, 例如, 可在具有可调中心波长的传统单波长锁模机制下工作, 也可实现双波长孤子锁模。这种紧凑全光纤双波长双梳锁模激光器可应用于各种需要双梳激光系统的场合, 有望简化双梳光谱系统。

1.3.2 谐振腔内插滤器件锁模光纤激光器

在谐振腔内引入相移长周期光纤光栅(PS-LPFG)、法布里-珀罗(F-P)滤波器和MZI等具有滤波作用的

结构,使得激光器在特定波长振荡也可实现双波长激光输出。2011年,苏州大学Liu等^[108]通过自行设计光栅在1020 nm和1033 nm处得到了双波长输出,但脉冲光谱的中心波长1033 nm与PS-LPFG滤波器的中心波长一致,而1020 nm处的输出与滤波器的中心波长略有偏离,这是因为掺铒光纤在1020 nm处的增益比1018 nm的增益强,虽然PS-LPFG在1018 nm处的透射率高于1020 nm,但在1020 nm处的整体增益优于腔内模式竞争,造成输出脉冲中心波长略有偏移。此外,该工作利用PS-LPFG的偏振和弯曲特性实现了波长可调谐操作,两波长可调谐范围分别为1020~1027 nm和1033~1038 nm。同年华南师范大学Luo等^[109]同时利用两个级联FBG,在1539.83 nm和1552.32 nm处获得波长间隔为12.49 nm的双波长脉冲输出,重复频率分别为5.92 MHz和5.15 MHz。2012年,Han^[110]同样利用两个级联FBG结构实现光谱滤波和波长可切换操作,利用NPR锁模机制成功在1545.2 nm和1548.3 nm处得到重复频率约为6.4 MHz和6.6 MHz、脉冲宽度分别为700 ps和572 ps的脉冲输出。2013年,Liu等^[8]在基于碳纳米管锁模基础上级联三个FBG,成功在1540、1550、1560 nm处同时获得锁模输出。迄今为止双波长锁模掺铒光纤激光器大多以MHz的重复频率工作,Tan等^[111]希望得到GHz量级的双波长脉冲输出,提出了一种基于简并四波混频(DFWM)锁模技术的可调谐、可切换双波长高重复率(HRR)超快光纤激光器,每个波段的脉冲均有高重复频率。此结构利用HNLFF充当非线性元件与F-P滤波器共同诱发DFWM效应,并且与基于NPR锁模的环形腔结合产生滤波效应,从而实现波长的可切换和可调谐操作。2018年北京信息科技大学He等^[112]报道了基于MZI和可调谐滤波器的双波长掺铒光纤激光器,MZI由两个2×2光纤耦合器组成,可调谐滤波器作为波长反射器,通过调节可调谐滤波器得到中心波长分别为1558.6 nm和1559.2 nm的稳定双波长激光脉冲输出。次年,Zhao等^[113]基于MZI基本原理,提出一种波长间隔可调的可切换双波长光纤激光器,利用由相移光纤布拉格光栅(PSFBG)和MZI组成的滤波器实现双波长输出,并且通过改变PSFBG上的应力大小调整波长间隔,最终可在1527 nm和1550 nm光谱位置处获得双波长激光输出,且波长间隔可从21.82~22.69 nm范围内连续调谐。之后该团队又在此结构上做了改进,加入Sagnac环,利用PSFBG与MZI和Sagnac环产生的复合干涉滤波效应,实现更精细的滤波。通过调节PC,可使双波长间距达到0.04 nm。与类似结构的光纤激光器相比,该系统提高了波长间距的精细度^[114],实验装置如图5所示。

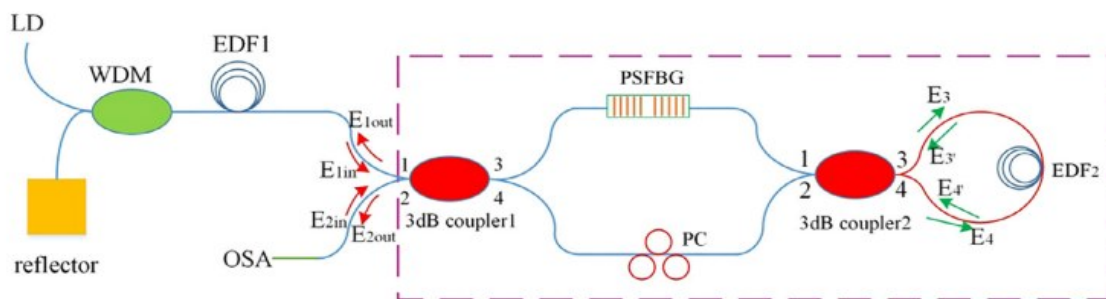


图5 基于PSFBG、MZI和Sagnac环的可切换双波长激光器^[114]

Fig. 5 Switchable dual wavelength laser based on PSFBG, MZI and Sagnac ring^[114]

虽然滤波器器件使双波长锁模光纤激光器得到了飞速发展,但滤波器器件的使用会增加系统复杂度,使光纤激光器缺乏灵活的操作性。对于光栅形滤波器器件,输出波长由光栅中心波长决定,波长的调谐范围受到光栅自身波长位置的限制。F-P滤波器虽能产生高精度多波长稳定输出,但是标准件的F-P滤波器插入损耗大,而微光纤F-P滤波器的制作工艺复杂不便于实际应用。MZI干涉平衡会因两臂间的相位差变化而被打破,导致易受环境干扰。

1.3.3 NPR 诱发滤波效应锁模光纤激光器

由 1.3.2 节介绍可知, 直接采用滤波器件来实现双波长锁模输出会增大激光器的复杂度, 因此采用 NPR 技术在腔内诱导梳状滤波效应实现多波长锁模成为新的研究热点。一方面基于 NPR 结构的光纤激光器, 需要在腔内两个 PC 之间放置偏振相关隔离器, 等效构成一个 Lyot 滤波器实现双波长滤波; 另一方面 NPR 结构还可作为锁模器件, 其诱导的强度相关损耗可以有效抑制增益光纤中的模式竞争, 能在常温条件下获得稳定的双波长锁模输出^[115-117]。Yan 等^[118]提出的工作原理如图 6 所示, 激光谐振腔被等效为一段两端带有 PC 的双折射光纤, 其传输函数表示为

$$T = \cos^2\theta_1 \cos^2\theta_2 + \sin^2\theta_1 \sin^2\theta_2 + \frac{1}{2} \sin(2\theta_1) \sin(2\theta_2) \cos(\Delta\varphi_L + \Delta\varphi_{NL}) \quad (3)$$

式中: θ_1 为光的偏振方向与双折射光纤快轴的夹角; θ_2 为偏振片方向与双折射光纤快轴的夹角; $\Delta\varphi_L$ 和 $\Delta\varphi_{NL}$ 为线性和非线性谐振腔相位延迟, 分别表示为

$$\Delta\varphi_L = 2\pi L(n_x - n_y) / \lambda \quad (4)$$

$$\Delta\varphi_{NL} = 2\pi n_2 PL \cos(2\theta_1) / \lambda A_{\text{eff}} \quad (5)$$

式中: L 为双折射光纤长度, $|n_x - n_y| = B_m$ 为光纤双折射, λ 为传输波长, n_2 为非线性折射率, P 为输入光功率, A_{eff} 为有效模场面积。

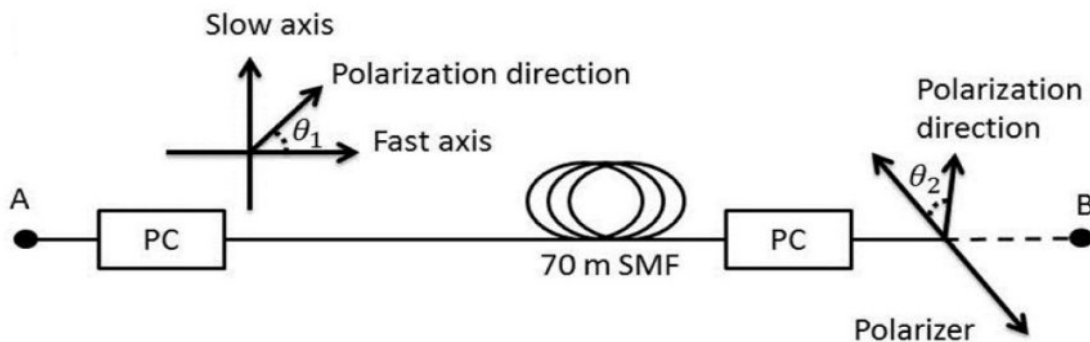


图 6 NPR 滤波效应原理图^[118]

Fig. 6 Schematic diagram of NPR filtering effect^[118]

由上可知, 传输函数 T 为正弦形式, 可起到梳状滤波器的作用, 并且会随着 PC 引入的相位延迟和光强而变化。NPR 可以起到人工 SA 的作用, 实现锁模操作, 透射率会随着光强的增加而增加, 但若通过调整 PC 使透射率处于随光强增加而降低的状态, 该装置便可以起到一种光强平衡的作用, 从而有效地抑制增益光纤的均匀展宽效应, 改善模式竞争和跳变现象, 最终实现多波长锁模激光输出。

以上理论模型以及 Tang 等^[116]利用非线性薛定谔方程 (NLSE) 推出的 NPR 锁模中的脉冲演化过程, 为基于 NPR 的双波长锁模激光器的研究奠定了理论基础。1992 年, Matsas 等^[53]首次利用 NPR 实现了双波长孤子锁模光纤激光器。2009 年, Song 等^[119]提出一种基于 NPR 效应的可切换可调谐双波长锁模掺铒光纤激光器, 输出脉冲中心波长分别为 1559.04 nm 和 1602.44 nm, 带宽均为 0.42 nm, 对应的脉冲宽度分别约为 8.06 ps 和 8.21 ps, 重频为 10.23 MHz, 并且通过调整 PC 可以调整波峰间隔。2011 年, Zhu 等^[120]通过非线性偏振演化 (NPE) 在全正色散区设计了稳定且波长可切换双波长锁模激光器, 中心波长分别为 1046.6 nm 和 1033.6 nm, 重复频率约为 2.5 MHz, 脉冲宽度为 560 ps, 但在脉冲中间出现了一个“凹陷”, 这是由于两个锁模波长在激光

腔中具有不同的色散,导致时域上不同的时间延迟。通过调整泵浦功率和PC,此激光器的最大输出功率为65 mW,这是迄今为止报道的在全正色散状态下工作的双波长被动锁模光纤激光器的最高功率。同年华南师范大学Dong等^[121]利用腔内双折射引起的固有光谱滤波器结合PC实现了双波长激光输出,成功在1555 nm和1568 nm处获得了重复频率为85.8 kHz的脉冲输出。2012年,Mao等^[103]利用Ginzburg-Landau方程数值模拟了基于NPR诱发滤波效应的锁模光纤激光器中的双波长孤子的演化过程,结果表明增益光纤鞍状增益谱、双折射滤波效应和SA的复合效应决定了双波长孤子的形成。此后Zhang等^[122]报道了基于NPR锁模技术的双波长保偏掺铥光纤激光器,保偏光纤增强了双折射效应,它不仅允许多个波长同时振荡,而且可以对脉冲进行光谱调制,此外通过调整PC可以实现激光输出的可切换与可调谐运转。2013年,深圳大学的Lin等^[123]人在此基础上报道了在全正色散条件下基于NPR锁模技术的掺铥双波长光纤激光器,在1038 nm和1057 nm处获得双波长耗散孤子输出,带宽分别为15.4 nm和10.8 nm,脉宽为15.4 ps,且波长间距可以在19~23 nm之间变化,最大输出功率为17.4 mW,这是首次获得具有可变波长间隔双波长耗散孤子。除双波长以外,基于NPR的三波长锁模光纤激光器也得到了很好的发展。2013年,江西师范大学Xu等^[124]通过数值和实验证明了全正色散多波长耗散孤子掺铥锁模光纤激光器,在相邻间距固定为16.4 nm的条件下,获得了稳定的三波长脉冲激光输出。2015年Yan等^[118]借助NPR结构演示了掺铥锁模光纤激光器中的三波长工作状态,通过微调PCs的位置,获得了三种可切换三波长锁模操作。

由于腔内NPR诱导的梳状滤波效应,使用该技术的激光器在实验中无需任何波长选择元件即可实现双波长和波长可切换操作,可以通过旋转PC来调节腔内双折射诱导的梳状滤波器的谱间距和透射峰位置,同时此系统不需要调制器。该技术相比于在谐振腔内直接引入辅助性滤波器件具有明显优势,降低了激光器的成本和复杂性。然而,这项技术的锁模条件非常严格,需要仔细调整腔内参数,如腔内损耗和偏振态等。此外,由于其可饱和吸收效应源于整个光纤激光器,因此任何器件偏振态的变化都可能影响输出稳定性,如环境温度变化、光纤应力变化等,这限制了NPR锁模光纤激光器的商业化。上述不足亟需超快激光领域的研究人员寻找新的锁模机制。

1.3.4 由多模干涉诱发滤波效应的锁模光纤激光器

多模干涉效应也可产生滤波效果,近年来兴起的锥形光纤就是例证,其结构如图7所示, a 、 L 、 d 分别代表过渡区长度、锥腰长度以及锥腰直径^[125]。

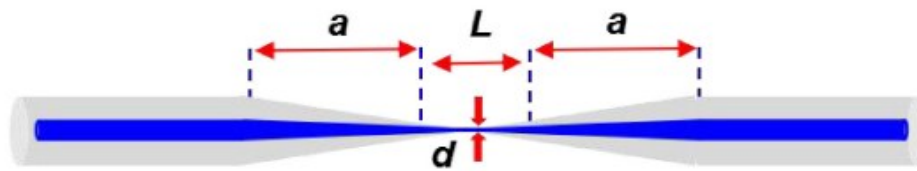


图7 锥形光纤示意图^[125]

Fig. 7 Schematic diagram of tapered fiber^[125]

锥形光纤滤波特性原理是:信号光以基模形式在纤芯中传播,由于纤芯半径逐渐变小,使纤芯中传播模式减少,部分基模耦合到包层中以高阶模式传输,纤芯和包层中传播的光由于所处的环境(折射率、边界条件)不同使得两路光产生相位差,进而在非锥形区耦合时产生干涉滤波效应,其传输函数表示为^[126,127]

$$T(\lambda) = I_{co}(\lambda) + I_{cl}(\lambda) + 2\sqrt{I_{co}(\lambda)I_{cl}} \cos \varphi, \quad (6)$$

式中, I_{co} 和 I_{cl} 分别代表纤芯模和包层模的光强度, 由于 $T(\lambda)$ 是正弦函数, 所以锥形光纤可以用作梳状滤波器。进一步研究表明, 其自由光谱范围可表示为^[128,129]

$$\Delta(\lambda) = \frac{\lambda^2}{\Delta n_{\text{eff}} L}, \quad (7)$$

式中: λ 为光波长, Δn_{eff} 为基芯模与高阶模的有效折射率差。由(7)式可知, 只需改变锥腰长度即可改变传输函数的自由光谱范围。

由以上介绍可知, 利用锥形光纤的干涉滤波特性可以产生稳定的双波长激光输出。2017年, Zulkhairi 等^[130]利用此原理报道了可切换双波长掺镱光纤激光器, 在 1034.78 nm 和 1039.02 nm 获得了激光脉冲输出, 同时随着泵浦功率的提高, 还可获得三波长锁模激光输出。2019年, 北京交通大学 Zhou 等^[131]在激光谐振腔内加入一段锥形光纤, 在 1565.02 nm 和 1580.07 nm 处实现了双波长脉冲输出, 并且具有 6.23 nm 的可调谐范围。2020年河北师范大学 Xin 等^[125]也利用锥形光纤产生的滤波效应设计了可调谐双波长掺镱光纤激光器, 输出脉冲中心波长分别为 1046.8 nm 和 1050.3 nm, 并且在泵浦功率固定条件下, 通过调整 PC, 两个波长的可调谐范围分别为 1039.8~1054.0 nm 和 1043.3~1057.2 nm。而且由于锥形光纤的滤波作用, 3.5 nm 的双波长间隔几乎没有变化, 实验装置如图 8 所示。

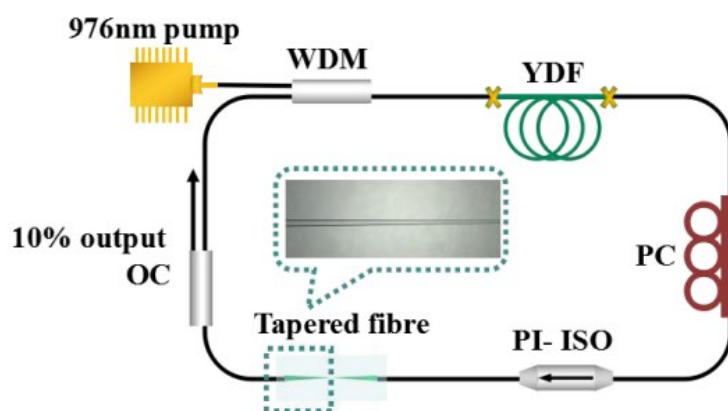


图8 基于 PSFBG、MZI 和 Sagnac 环的可切换双波长激光器^[125]

Fig. 8 Switchable dual-wavelength laser based on PSFBG, MZI and Sagnac ring^[125]

基于腔内滤波效应的双波长锁模光纤激光器发展较快。目前, 所获得的双波长激光输出重复频率已经突破了 GHz 量级, 双波长间距精细到了 0.04 nm。但此类方法要通过改变器件长度等一些相应参数来控制滤波器的周期、中心波长和调制深度, 虽具有灵活性但不易精确调整, 这也是未来研究要突破的难题。

综上, 双波长锁模激光器包括基于双谐振腔结构的双波长锁模光纤激光器、基于 2D 材料的双波长锁模光纤激光器和基于腔内滤波效应的双波长锁模光纤激光器, 其中腔内滤波效应可以通过双折射效应、谐振腔内插滤波器件、多模干涉和其它非线性效应如非线性偏振旋转等技术来引入。

表 1 展示了部分双波长锁模激光输出的基本性能情况。由表 1 可知, 双波长锁模光纤激光器重复频率已突破 GHz 量级, 但波长间距较窄, 一般为几到几十 nm, 对此提出的创新结构是采用双腔双增益介质的锁模光纤激光器将波长间距扩大到了 586.9 nm; 双波长锁模光纤激光器的输出功率为 mW 量级, 但相比于其它双波长锁模激光器, 基于双谐振腔结构的双波长锁模光纤激光器输出功率较大, 可以达到 43.3 mW。基于二维材料的双波长锁模光纤激光器的输出脉宽较窄, 已达到 fs 量级, 最窄脉宽约为 600 fs。

表1 双波长锁模光纤激光器总结

Table 1 Summary of dual-wavelength mode-locked fiber lasers

| Method | Central wave-length /nm | Repetition rate /MHz | Spectral band-width /nm | Pulse duration/ps | Wavelength spacing /nm | Output power /mW | Ref. |
|------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------|------------------------|------------------|-------|
| Dual-cavity | 1556.7, 1559.9 | 2500, 5000 | 0.18, 0.23 | 17.7, 13.0 | 3.2 | - | [58] |
| | 1030, 1040 | 11.4, 11.4 | 0.34, 0.44 | 3.3, 2.5 | 34.8 | 9.1 | [60] |
| | 1542, 1561 | 39.1, 39.1 | 3, 3 | 1.4, 1.7 | 5.6 | 43.3 | [62] |
| | 1082.8, 1569.7 | 17.3, 17.3 | 0.3, 0.3 | 12.8, 9.2 | 586.9 | 1.3 | [65] |
| 2D Materials | 1061.8, 1068.8 | 1.78 | 4.5, 2.16 | 1.41 | 7 | 3.05 | [92] |
| | 1533, 1558 | 20.8 | 3.7, 6.9 | 0.7 | 25.0 | - | [93] |
| | 1558.5, 1565.9 | 8.83 | 4.2, 4.4 | 0.6 | 7.4 | 10.1 | [95] |
| | 1532.2, 1557.3 | 9.09, 9.08 | 3.3, 3.8 | 0.99, 0.95 | 25.1 | 0.25 | [54] |
| Filtering effect | 1561.6, 1562.1 | 3.54 | 0.25, 0.25 | 16.05 | 0.5 | 10 | [100] |
| | 1558, 1570 | 9.24, 9.24 | 2, 3 | 2.4, 2.1 | 12 | - | [37] |
| | 1557.7, 1562.7 | 18.8 | - | - | 5.0 | - | [105] |
| | 1535, 1564 | 6.4, 6.4 | 4, 3.6 | 0.9, 1.0 | 29 | 0.49 | [106] |
| | 1539.8, 1552.3 | 5.92, 5.15 | - | - | - | - | [109] |
| | 1545.2, 1548.3 | 6.4, 6.6 | - | 700, 572 | 3.0 | - | [110] |
| | 1559.0, 1602.4 | 10.23, 10.23 | 0.42, 0.42 | 8.1, 8.2 | 43.4 | - | [119] |
| | 1033.6, 1046.6 | 2.5 | - | 560 | 13 | 65 | [120] |
| 1038, 1057 | 24 | 15.4, 10.8 | 15.4 | 17 | 17.4 | [123] | |

此外, 为了实现双波长光纤激光器的同步锁模, 光纤激光器的腔长一般较长, 纵模间隔较小。在激光器的谐振腔中大多数纵模的增益比损耗大, 再加上空间烧孔效应, 输出为多纵模振荡, 而光谱仪的分辨率较低, 难以观察到多纵模。事实上每个波长含有多个纵模, 但多纵模的拍频噪声大, 相干性和单色性也比较差, 限制了它的应用和发展。而单纵模激光器除了具有光束质量高、振荡阈值低、转换效率高、温度稳定性好等光纤激光器的传统优点之外, 还具有频差大、调谐方便等优势, 可广泛应用于激光干涉测量、光纤传感、高速相干光通信和激光雷达探测等领域^[132,133]。尤其作为合成波绝对距离干涉测量系统的光源, 为了实现长距离测量, 必须保证双频激光具有足够窄的谱线宽度以获得足够长的相干长度。因此, 开展双波长单纵模窄线宽光纤激光技术研究具有重要意义。

设增益谱带宽和泵浦源阈值大小确定的谐振腔内激光振荡的频率范围为 $\Delta\nu$ 、激光谐振腔可以起振的临近的两个纵模振荡频率间隔为 $\delta\nu$, 则实际起振的纵模数为 $\Delta\nu/\delta\nu$ 。若想降低谐振腔内的纵模数量, 实现方法可分为两个^[134]: 一是使用频率选择性器件使激光器的增益带宽 $\Delta\nu$ 减小, 抑制其它模式的纵模, 实现单纵模运转; 二是增大纵模间隔实现单纵模运转。目前常用的选模技术有光纤光栅 F-P 标准具选模^[135]、相移光栅与普通光栅共同选模^[136]、SA 选模^[137-139]以及复合环形腔选模^[140]等都是以此为理论依据, 并取得迅速发展。2009年, Moore等^[141]以串联固定波长 FBG 和可调波长 FBG, 结合微泵浦的掺铒光纤作为 SA 锁模实现双波长单纵模激光振荡, 线宽均为 6.7 MHz, 信噪比超过 40 dB。2010年, Sun等^[142]利用双 π 相移啁啾布拉格光栅, 作为双通道窄带滤波器, 设计波长间隔 8 nm、振荡波长为 1545.24 nm 和 1553.20 nm 的可开关双波长单纵模掺铒光纤激光器。2014年, Md Ali等^[143]报道了基于锥形掺铒光纤的 M-Z 干涉仪结构的双波长环形腔光纤激光器, 获得 1528.778 nm 和 1533.877nm 的双波长激光, 线宽分别为 0.090 nm 和 0.094 nm。2018年, Hou等^[144]利

用低反射率双波长FBG输出激光,成功研制双频分布式布拉格反射掺镱光纤激光器,分别获得单纵模1063.09 nm和1063.21 nm激光振荡,并取得32.014 GHz的拍频信号。同年,Fu等^[145]报道了可开关双波长单纵模窄线宽掺镱光纤激光器,利用FBGs组件及NOLM吸收滤波特性和平衡纵模增益特性获得1064.65 nm和1065.45 nm双波长单纵模激光同时振荡,并通过调节PC实现了激光器开关特性,测得对应波长的激光线宽分别为853 Hz和932 Hz。

综上,双波长单纵模光纤激光器,以其多波长、高光谱纯度、高相干度等特性可应用于多种领域,如:超长距离干涉测量、传感与波分复用通信系统、激光雷达等。因此,国内外研究者正不遗余力地设计各种双波长激光器以实现线宽较窄的单纵模振荡,未来具有双波长锁模输出的光纤激光器的研究重点也将侧重于单纵模输出特性上,以此来更好地满足发展需要。

2 结 论

本文综述了面向大容量波分复用通信领域的双波长锁模光纤激光技术的研究进展,包括基于双谐振腔结构的双波长锁模光纤激光器、二维材料的双波长锁模光纤激光器、腔内滤波效应的双波长锁模光纤激光器。基于双谐振腔结构单增益介质的双波长输出波长间隔较窄,通常为几到几十纳米。而双腔双增益介质结构可使双波长间隔扩大至几百纳米,但该类激光器结构较复杂且输出激光沿不同支路传播,双波长激光间的相干性较差。基于二维材料的双波长锁模光纤激光器具有简单紧凑、成本较低的优点,采用的二维材料需同时具有饱和吸收和高非线性折射率两种特性,从而利用显著的非线性效应有效缓解模式竞争现象,目前基于二维材料的双波长锁模光纤激光器的输出脉宽已达到飞秒量级,最窄脉宽约为600 fs,但输出功率较低,为mW量级。基于腔内滤波效应的双波长锁模光纤激光器有多种实现方式,输出脉冲宽度最短为百飞秒量级,光谱滤波效应可以利用多模干涉和非线性效应等技术诱导产生,滤波器的周期、中心波长和调制深度等可以通过改变器件长度和光纤双折射等相应参数进行调整,具有很好的灵活性,并且容易实现全光纤结构,应用也最为广泛。

双波长锁模光纤激光器还面临如下挑战:激光器输出波长主要集中在1 μm 和1.5 μm 光谱区域,波长间隔窄且输出功率为毫瓦量级,并且由于相邻波长间隔和波长的个数对谐振腔内的偏振状态和外部环境非常敏感,多波长锁模状态很容易打破,导致输出激光的不稳定性,因此未来研究期待在输出激光脉冲波长数目、波长间隔、输出功率和工作稳定性方面有更大突破。同时,鉴于双波长单纵模光纤激光器可有效提高激光测量与传感、激光检测等精度,因此对双波长单纵模激光器的研究具有重要意义。随着智能时代的到来,基于机器学习和深度学习的自动锁模光纤激光器也已出现相关理论研究,将该技术应用于双波长锁模光纤激光器来智能控制输出波长的数量和输出波长的峰值位置具有很好的应用前景,有望在光纤传感器、光谱学、激光测距和微波产生等领域发挥更大的作用。

参考文献:

- [1] Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 831-838.
- [2] Han Y G, Tran T V A, Kim S H, *et al.* Multiwavelength Raman-fiber-laser-based long-distance remote sensor for simultaneous measurement of strain and temperature [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(11): 1282-1284.

- [3] Hu M L, Cai Y. Research progress on mid-infrared ultrafast fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500009.
胡明列, 蔡宇. 中红外波段超快光纤激光器研究进展 [J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500009.
- [4] Zhao Z X. *Research on WDM-PON System and Its Application Based on Multiple-Wavelength Lasers* [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.
赵子昕. 基于多波长激光器的 WDM-PON 系统研究及其应用 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- [5] Lyu X G. *Four-wave Mixing Multiwavelength Fiber Laser with Highly Erbium Fiber* [D]. Hefei: Anhui University, 2019.
吕晓光. 采用高掺杂铒纤的四波混频型多波长光纤激光器 [D]. 合肥: 安徽大学, 2019.
- [6] Wang J. *Research on Technologies of Two-wavelength Single-longitudinal-mode Fiber Laser with Narrow line-width* [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
王静. 双波长单纵模窄线宽光纤激光技术研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [7] Wang S K, Ning Q Y, Luo A P, *et al.* Dissipative soliton resonance in a passively mode-locked figure-eight fiber laser [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 2402-2407.
- [8] Huang H C, Yang T, Yuan X Z, *et al.* An easily switchable dual-wavelength passively mode-locked erbium fiber laser [J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, 31(1): 014204.
- [9] Kong Y C, Yang H R, Li W L, *et al.* Switchable dual-wavelength all-fiber laser mode-locked by carbon nanotubes [J]. *Laser Physics*, 2015, 25(1): 015101.
- [10] Wang Y Z, Li J F, Zhai B, *et al.* Tunable and switchable dual-wavelength mode-locked Tm³⁺-doped fiber laser based on a fiber taper [J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): 15299-15306.
- [11] Feng Q, Chen Y, Zhao C J, *et al.* Experimental study on the multisoliton pattern formation in an erbium-doped fiber laser passively mode-locked by graphene saturable absorber [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(4): 044201.
- [12] Wushouer X, Yu H J, Yan P, *et al.* Investigation on mode matching including thermal effects in LD end-pumped passively mode-locked Nd:YVO₄ laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(10): 1004-1007.
- [13] Li F Q, Zong N, Wang Z C, *et al.* Passively mode-locked grown-together composite YVO₄/Nd:YVO₄ crystal laser with a semiconductor saturable absorber mirror under 880-nm direct pumping [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(4): 041405.
- [14] Marshall J, Stewart G, Whitenett G. Design of a tunable L-band multi-wavelength laser system for application to gas spectroscopy [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(5): 1023-1031.
- [15] Jeon H B, Lee H. Photonic true-time delay for phased-array antenna system using dispersion compensating module and a multiwavelength fiber laser [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2014, 18(4): 406-413.
- [16] Fu J, Chen D, Sun B, *et al.* A novel-configuration multi-wavelength Brillouin erbium fiber laser and its application in switchable high-frequency microwave generation [J]. *Laser Physics*, 2010, 20(10): 1907-1912.
- [17] Chen H L, Jiang X T, Xu S X, *et al.* Recent progress in multi-wavelength fiber lasers: Principles, status, and challenges [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(4): 041405.
- [18] Liu X M, Han D D, Sun Z P, *et al.* Versatile multi-wavelength ultrafast fiber laser mode-locked by carbon nanotubes [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2718.
- [19] Luo Z C, Luo A P, Xu W C. Tunable and switchable multiwavelength passively mode-locked fiber laser based on SESAM and inline birefringence comb filter [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, 3(1): 64-70.
- [20] Ding X D, He W, Yan G, *et al.* Tunable fiber laser based on Mach-Zehnder filter [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(9): 1068-1072.
丁香栋, 何巍, 闫光, 等. 基于 Mach-Zehnder 滤波的可调谐光纤激光器 [J]. *激光与红外*, 2016, 46(9): 1068-1072.
- [21] Yamashita S, Hotate K. Multiwavelength erbium-doped fibre laser using intracavity etalon and cooled by liquid nitrogen [J]. *Electronics Letters*, 1996, 32(14): 1298-1299.
- [22] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics* [M]. Nonlinear Science at the Dawn of the 21st Century. Berlin: Springer, 2000: 195-211.
- [23] Schlager J B, Kawanishi S, Saruwatari M. Dual wavelength pulse generation using mode-locked erbium-doped fibre ring laser [J]. *Electronics Letters*, 1991, 27(22): 2072-2073.
- [24] Li S P, Chan K T. Electrical wavelength tunable and multiwavelength actively mode-locked fiber ring laser [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 72(16): 1954-1956.

- [25] Zhao Y, Shu C. A fiber laser for effective generation of tunable single- and dual-wavelength mode-locked optical pulses [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 72(13): 1556-1558.
- [26] Bakhshi B, Andrekson P A. Dual-wavelength 10-GHz actively mode-locked erbium fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(11): 1387-1389.
- [27] Deparis O, Kiyari R, Salik E, *et al.* Round-trip time and dispersion optimization in a dual-wavelength actively mode-locked Er-doped fiber laser including nonchirped fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(10): 1238-1240.
- [28] Town G E, Chen L, Smith P W E. Dual wavelength modelocked fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(11): 1459-1461.
- [29] Pudo D, Chen L R. Actively modelocked, quadruple-wavelength fibre laser with pump-controlled wavelength switching [J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(3): 272-274.
- [30] Yao J, Yao J P, Deng Z C. Multiwavelength actively mode-locked fiber ring laser with suppressed homogeneous line broadening and reduced supermode noise [J]. *Optics Express*, 2004, 12(19): 4529-4534.
- [31] Noske D U, Guy M J, Rottwitz K, *et al.* Dual-wavelength operation of a passively mode-locked "figure-of-eight" ytterbium-erbium fibre soliton laser [J]. *Optics Communications*, 1994, 108(4-6): 297-301.
- [32] Yun L, Liu X M, Mao D. Observation of dual-wavelength dissipative solitons in a figure-eight erbium-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 20992-20997.
- [33] Ning Q Y, Wang S K, Luo A P, *et al.* Bright-dark pulse pair in a figure-eight dispersion-managed passively mode-locked fiber laser [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(5): 1647-1652.
- [34] Jin X X, Wang X, Wang X L, *et al.* Tunable multiwavelength mode-locked Tm/Ho-doped fiber laser based on a nonlinear amplified loop mirror [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(28): 8260-8264.
- [35] Shao Z H, Qiao X G, Rong Q Z, *et al.* Generation of dual-wavelength square pulse in a figure-eight erbium-doped fiber laser with ultra-large net-anomalous dispersion [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(22): 6711-6716.
- [36] Posada-Ramírez B, Durán-Sánchez M, Álvarez-Tamayo R I, *et al.* Study of a Hi-Bi FOLM for tunable and dual-wavelength operation of a thulium-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2560-2568.
- [37] Gong Y D, Tian X L, Tang M, *et al.* Generation of dual wavelength ultrashort pulse outputs from a passive mode locked fiber ring laser [J]. *Optics Communications*, 2006, 265(2): 628-631.
- [38] Zhang Z X, Zhan L, Xu K, *et al.* Multiwavelength fiber laser with fine adjustment, based on nonlinear polarization rotation and birefringence fiber filter [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(4): 324-326.
- [39] Chen W C, Luo Z C, Xu W C. The interaction of dual wavelength solitons in fiber laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2009, 6(11): 816-820.
- [40] Luo Z C, Luo A P, Xu W C, *et al.* Modulation instability induced by cross-phase modulation in a dual-wavelength dispersion-managed soliton fiber ring laser [J]. *Applied Physics B*, 2010, 100(4): 811-820.
- [41] Yun L, Han D D. Evolution of dual-wavelength fiber laser from continuous wave to soliton pulses [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(24): 5406-5409.
- [42] Wang X, Zhu Y D, Zhou P, *et al.* Tunable, multiwavelength Tm-doped fiber laser based on polarization rotation and four-wave-mixing effect [J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 25977-25984.
- [43] Zhang Z X, Mou C B, Yan Z J, *et al.* Switchable dual-wavelength Q-switched and mode-locked fiber lasers using a large-angle tilted fiber grating [J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1353-1360.
- [44] Feehan J S, Ilday F Ö, Brocklesby W S, *et al.* Simulations and experiments showing the origin of multiwavelength mode locking in femtosecond, Yb-fiber lasers [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, 33(8): 1668-1676.
- [45] Zhang H, Tang D Y, Wu X, *et al.* Multi-wavelength dissipative soliton operation of an erbium-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2009, 17(15): 12692-12697.
- [46] Li J F, Luo H Y, Wang L L, *et al.* Mid-infrared passively switched pulsed dual wavelength Ho³⁺-doped fluoride fiber laser at 3 μm and 2 μm [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10770.

- [47] Rigaud P, Kermene V, Simos C, *et al.* Dual-wavelength synchronous ultrashort pulses from a mode-locked Yb-doped multicore fiber laser with spatially dispersed gain [J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 25308-25315.
- [48] Wu Z C, Fu S N, Chen C X, *et al.* Dual-state dissipative solitons from an all-normal-dispersion erbium-doped fiber laser: Continuous wavelength tuning and multi-wavelength emission [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(12): 2684-2687.
- [49] Zhang Y F, Yang C S, Feng Z M, *et al.* Dual-wavelength passively q-switched single-frequency fiber laser [J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): 16149-16155.
- [50] Wang Y Z, Li J F, Zhang E T, *et al.* Coexistence of noise-like pulse and high repetition rate harmonic mode-locking in a dual-wavelength mode-locked Tm-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 17192-17200.
- [51] Zhao X, Zheng Z, Liu L, *et al.* Fast, long-scan-range pump-probe measurement based on asynchronous sampling using a dual-wavelength mode-locked fiber laser [J]. *Optics Express*, 2012, 20(23): 25584-25589.
- [52] Jiang K, Wu Z C, Fu S N, *et al.* Switchable dual-wavelength mode-locking of thulium-doped fiber laser based on SWNTs [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(19): 2019-2022.
- [53] Matsas V J, Newson T P, Richardson D J, *et al.* Selfstarting passively mode-locked fibre ring soliton laser exploiting nonlinear polarisation rotation [J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(15): 1391-1393.
- [54] Zhao X, Zheng Z, Liu L, *et al.* Switchable, dual-wavelength passively mode-locked ultrafast fiber laser based on a single-wall carbon nanotube modelocker and intracavity loss tuning [J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 1168-1173.
- [55] Fischer M C, Wilson J W, Robles F E, *et al.* Invited review article: pump-probe microscopy [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(3): 031101.
- [56] Freudiger C W, Yang W L, Holtom G R, *et al.* Stimulated Raman scattering microscopy with a robust fibre laser source [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(2): 153-159.
- [57] Murray R T, Runcorn T H, Kelleher E J R, *et al.* Highly efficient mid-infrared difference-frequency generation using synchronously pulsed fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2446-2449.
- [58] Li Z H, Lou C Y, Gao Y Z, *et al.* A dual-wavelength and dual-repetition-rate actively mode-locked fiber ring laser [J]. *Optics Communications*, 2000, 185(4-6): 381-385.
- [59] Guo B. *Study on Multi-wavelength Mode-locked Fiber Laser Based on Nonlinear Effects of Two-dimensional Materials* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
郭波. 基于二维材料非线性效应的多波长锁模光纤激光器研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [60] Bai Y B, Xiang W H, Zu P, *et al.* Tunable dual-wavelength passively mode-locked Yb-doped fiber laser using SESAM [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(11): 111405.
- [61] Dong L L, Xie F, Ma S, *et al.* Simple tunable dual-wavelength fiber laser and multiple self-mixing interferometry to large step height measurement [J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 21880-21885.
- [62] Wang S, Zhao Z G, Kobayashi Y. Wavelength-spacing controllable, dual-wavelength synchronously mode locked Er:Fiber laser oscillator based on dual-branch nonlinear polarization rotation technique [J]. *Optics Express*, 2016, 24(25): 28228-28238.
- [63] Diaz S. Stable dual-wavelength erbium fiber ring laser with optical feedback for remote sensing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(19): 4591-4595.
- [64] Lau K Y, Abu Bakar M H, Muhammad F D, *et al.* Dual-wavelength, mode-locked erbium-doped fiber laser employing a graphene/polymethyl-methacrylate saturable absorber [J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 12790-12800.
- [65] Zeng J, Li B W, Hao Q, *et al.* Passively synchronized dual-color mode-locked fiber lasers based on nonlinear amplifying loop mirrors [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(20): 5061-5064.
- [66] Jiang Y F, Wu J M, Hao Q, *et al.* Experimental study on all-polarization-maintaining passive synchronization for dual-color mode-locked fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(9): 0936001.
江云峰, 武佳美, 郝强, 等. 全保偏被动同步的双色锁模光纤激光器的实验研究 [J]. 光学学报, 2020, 40(9): 0936001.
- [67] Yoshitomi D, Kobayashi Y, Kakehata M, *et al.* Ultralow-jitter passive timing stabilization of a mode-locked Er-doped fiber laser by injection of an optical pulse train [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(22): 3243-3245.

- [68] Huang K, Gu X R, Pan H F, *et al.* Synchronized fiber lasers for efficient coincidence single-photon frequency upconversion [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2012, 18(2): 562-566.
- [69] Tsai B W, Wu S Y, Hu C, *et al.* Subfemtosecond hybrid synchronization between ultrafast Yb and Er fiber laser systems by controlling the relative injection timing [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(17): 3456-3459.
- [70] Rusu M, Herda R, Okhotnikov O G. Passively synchronized erbium (1550-nm) and ytterbium (1040-nm) mode-locked fiber lasers sharing a cavity [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(19): 2246-2248.
- [71] Zhang M, Kelleher E J R, Pozharov A S, *et al.* Passive synchronization of all-fiber lasers through a common saturable absorber [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(20): 3984-3986.
- [72] Sotor J, Sobon G, Tarka J, *et al.* Passive synchronization of erbium and thulium doped fiber mode-locked lasers enhanced by common graphene saturable absorber [J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5536-5543.
- [73] Kim J, Kärtner F X. Attosecond-precision ultrafast photonics [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2010, 4(3): 432-456.
- [74] Luo Z Q, Zhou M, Weng J, *et al.* Graphene-based passively Q-switched dual-wavelength erbium-doped fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(21): 3709-3711.
- [75] Luo Z Q, Zhou M, Cai Z P, *et al.* Graphene-assisted multiwavelength erbium-doped fiber ring laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(8): 501-503.
- [76] Gong S, Tian J R, Li K X, *et al.* Advances in new two-dimensional materials and its application in solid-state lasers [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(1): 18-30.
公爽, 田金荣, 李克轩, 等. 新型二维材料在固体激光器中的应用研究进展 [J]. *中国光学*, 2018, 11(1): 18-30.
- [77] Guo B. Recent advances in multi-wavelength ultrafast lasers based on nonlinear effects of 2D materials [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0103002.
郭波. 基于二维材料非线性效应的多波长超快激光器研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(1): 0103002.
- [78] Lu S B, Zhao C J, Zou Y H, *et al.* Third order nonlinear optical property of Bi₂Se₃ [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 2072-2082.
- [79] Wang G Z, Zhang S F, Zhang X Y, *et al.* Tunable nonlinear refractive index of two-dimensional MoS₂, WS₂, and MoSe₂ nanosheet dispersions [J]. *Photonics Research*, 2015, 3(2): A51-A55.
- [80] Sun Z P, Hasan T, Torrisi F, *et al.* Graphene mode-locked ultrafast laser [J]. *ACS Nano*, 2010, 4(2): 803-810.
- [81] Song Y W, Jang S Y, Han W S, *et al.* Graphene mode-lockers for fiber lasers functioned with evanescent field interaction [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(5): 051122.
- [82] Popa D, Sun Z, Torrisi F, *et al.* Sub 200 fs pulse generation from a graphene mode-locked fiber laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(20): 203106.
- [83] Martinez A, Fuse K, Xu B, *et al.* Optical deposition of graphene and carbon nanotubes in a fiber ferrule for passive mode-locked lasing [J]. *Optics Express*, 2010, 18(22): 23054-23061.
- [84] Sobon G, Sotor J, Jagiello J, *et al.* Graphene oxide vs. reduced graphene oxide as saturable absorbers for Er-doped passively mode-locked fiber laser [J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 19463-19473.
- [85] Zhang M, Kelleher E J R, Torrisi F, *et al.* Tm-doped fiber laser mode-locked by graphene-polymer composite [J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 25077-25084.
- [86] Luo Z Q, Wang J Z, Zhou M, *et al.* Multiwavelength mode-locked erbium-doped fiber laser based on the interaction of graphene and fiber-taper evanescent field [J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(3): 229-233.
- [87] Huang S S, Wang Y G, Yan P G, *et al.* Tunable and switchable multi-wavelength dissipative soliton generation in a graphene oxide mode-locked Yb-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 11417-11426.
- [88] Fu L, Kane C L, Mele E J. Topological insulators in three dimensions [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(10): 106803.
- [89] Zhou J J, Luo A P, Luo Z C, *et al.* Dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber laser with switchable wavelength spacing based on a graphene saturable absorber [J]. *Photonics Research*, 2015, 3(2): A21-A24.
- [90] Wang Q H, Kalantar-Zadeh K, Kis A, *et al.* Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides [J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(11): 699-712.

- [91] Luo Z Q, Zhou M, Wu D D, *et al.* Graphene-induced nonlinear four-wave-mixing and its application to multiwavelength Q-switched rare-earth-doped fiber lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(18): 2732-2739.
- [92] Zhao N, Liu M, Liu H, *et al.* Dual-wavelength rectangular pulse Yb-doped fiber laser using a microfiber-based graphene saturable absorber [J]. *Optics Express*, 2014, 22(9): 10906-10913.
- [93] Yun L. Black phosphorus saturable absorber for dual-wavelength polarization-locked vector soliton generation [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32380-32385.
- [94] Wang K P, Wang J, Fan J T, *et al.* Ultrafast saturable absorption of two-dimensional MoS₂ nanosheets [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(10): 9260-9267.
- [95] Guo B, Yao Y, Yan P G, *et al.* Dual-wavelength soliton mode-locked fiber laser with a WS₂-based fiber taper [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(3): 323-326.
- [96] Kieu K, Wise F W. Soliton thulium-doped fiber laser with carbon nanotube saturable absorber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(3): 128-130.
- [97] Schmidt A, Rivier S, Cho W B, *et al.* Sub-100 fs single-walled carbon nanotube saturable absorber mode-locked Yb-laser operation near 1 μm [J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 20109-20116.
- [98] Kelleher E J R, Travers J C, Sun Z, *et al.* Nanosecond-pulse fiber lasers mode-locked with nanotubes [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(11): 111108.
- [99] Im J H, Choi S Y, Rotermund F, *et al.* All-fiber Er-doped dissipative soliton laser based on evanescent field interaction with carbon nanotube saturable absorber [J]. *Optics Express*, 2010, 18(21): 22141-22146.
- [100] Guo B, Yao Y, Yang Y F, *et al.* Dual-wavelength rectangular pulse erbium-doped fiber laser based on topological insulator saturable absorber [J]. *Photonics Research*, 2015, 3(3): 94-99.
- [101] Man W S, Tam H Y, Demokan M S, *et al.* Mechanism of intrinsic wavelength tuning and sideband asymmetry in a passively mode-locked soliton fiber ring laser [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2000, 17(1): 28-33.
- [102] Zhu Y J, Xiang F L, Jin L, *et al.* All-fiber dual-wavelength mode-locked laser using a bend-induced-birefringence Lyot-filter as gain-tilt equalizer [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 1504807.
- [103] Mao D, Lu H. Formation and evolution of passively mode-locked fiber soliton lasers operating in a dual-wavelength regime [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2012, 29(10): 2819-2826.
- [104] Zhao Q, Pei L, Zheng J J, *et al.* Switchable multi-wavelength erbium-doped fiber laser with adjustable wavelength interval [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(15): 3784-3790.
- [105] Luo X, Tuan T H, Saini T S, *et al.* Tunable and switchable all-fiber dual-wavelength mode locked laser based on Lyot filtering effect [J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 14635-14647.
- [106] Zhu Y J, Cui Z K, Sun X N, *et al.* Fiber-based dynamically tunable Lyot filter for dual-wavelength and tunable single-wavelength mode-locking of fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2020, 28(19): 27250-27257.
- [107] Li Y. *Study on Tunable Multiwavelength Erbium-doped Fiber Laser Based on Birefringent Filter Effect* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
李苑. 基于双折射滤波效应的可调谐多波长掺铒光纤激光器的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [108] Liu S X, Zhu X J, Wang C. Switchable and tunable dual-wavelength Yb-doped fiber lasers with asymmetric exposure phase-shifted long-period fiber gratings [C]. *International Conference on Electronics and Optoelectronics*. Dalian, China, IEEE, 2011: V2-99-V2-101.
- [109] Luo A P, Luo Z C, Xu W C. Switchable dual-wavelength passively mode-locked fiber ring laser using SESAM and cascaded fiber Bragg gratings [J]. *Laser Physics*, 2011, 21(2): 395-398.
- [110] Han D D. Switchable mode-locking fiber laser with fiber Bragg gratings [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(11): 114202.
- [111] Tan X M, Chen H J, Cui H, *et al.* Tunable and switchable dual-waveband ultrafast fiber laser with 100 GHz repetition-rate [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16291-16299.
- [112] He W, Zhu L Q, Dong M L, *et al.* Wavelength-switchable and stable-ring-cavity, erbium-doped fiber laser based on Mach-Zehnder interferometer and tunable filter [J]. *Laser Physics*, 2018, 28(4): 045104.

- [113] Zhao X L, Dong M L, Zhang Y M, *et al.* Switchable multi-wavelength and tunable wavelength spacing erbium-doped fiber laser based on a phase-shifted fiber Bragg grating combined with a Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 112: 500-507.
- [114] Zhao X L, Dong M L, Zhang Y M, *et al.* Switchable dual-wavelength fiber laser based on a phase-shifted fiber Bragg grating combined with Mach-Zehnder interferometer and Sagnac loop [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 48: 104-109.
- [115] Zheng W J, Ruan S C, Zhang M, *et al.* Switchable multi-wavelength erbium-doped photonic crystal fiber laser based on nonlinear polarization rotation [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 50: 145-149.
- [116] Tang D Y, Zhao L M, Zhao B, *et al.* Mechanism of multisoliton formation and soliton energy quantization in passively mode-locked fiber lasers [J]. *Physical Review A*, 2005, 72(4): 043816.
- [117] Sun M Q, Wang X D, Yang S M, *et al.* Switchable dual-wavelength femtosecond mode-locked fiber laser [J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(1): 46-51.
孙梦秋, 汪徐德, 杨思敏, 等. 双波长可切换飞秒锁模光纤激光器 [J]. *激光与红外*, 2021, 51(1): 46-51.
- [118] Yan Z Y, Li X H, Tang Y L, *et al.* Tunable and switchable dual-wavelength Tm-doped mode-locked fiber laser by nonlinear polarization evolution [J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4369-4376.
- [119] Song C X, Xu W C, Luo Z C, *et al.* Switchable and tunable dual-wavelength ultrashort pulse generation in a passively mode-locked erbium-doped fiber ring laser [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(22): 4408-4412.
- [120] Zhu X J, Wang C H, Liu S X, *et al.* Switchable dual-wavelength and passively mode-locked all-normal-dispersion Yb-doped fiber lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(14): 956-958.
- [121] Dong J L, Xu W C, Luo Z C, *et al.* Tunable and switchable dual-wavelength passively mode-locked fiber ring laser with high-energy pulses at a sub-100 kHz repetition rate [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(24): 5719-5722.
- [122] Zhang Z X, Xu Z W, Zhang L. Tunable and switchable dual-wavelength dissipative soliton generation in an all-normal-dispersion Yb-doped fiber laser with birefringence fiber filter [J]. *Optics Express*, 2012, 20(24): 26736-26742.
- [123] Lin H Q, Guo C Y, Ruan S C, *et al.* Tunable and switchable dual-wavelength dissipative soliton operation of a weak-birefringence all-normal-dispersion Yb-doped fiber laser [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(5): 1501807.
- [124] Xu Z W, Zhang Z X. All-normal-dispersion multi-wavelength dissipative soliton Yb-doped fiber laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(8): 085105.
- [125] Xin Y X, Shen H B, Zhang S M, *et al.* Tunable multi-wavelength bright-dark and dark-bright pulse pairs fiber lasers [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(6): 7103209.
- [126] Wu X M, Dong X F, Jiang L, *et al.* Properties and application of tapered fiber [J]. *Journal of Suzhou University of Science and Technology (Natural Science)*, 2015, 32(2): 52-55.
吴雪梅, 董兴法, 姜莉, 等. 锥形光纤的特性与应用 [J]. *苏州科技学院学报(自然科学版)*, 2015, 32(2): 52-55.
- [127] Coviello G, Finazzi V, Villatoro J, *et al.* Thermally stabilized PCF-based sensor for temperature measurements up to 1000 °C [J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 21551-21559.
- [128] Musa B, Mustapha Kamil Y, Abu Bakar M H, *et al.* Effects of taper parameters on free spectral range of non-adiabatic tapered optical fibers for sensing applications [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2016, 58(4): 798-803.
- [129] Yadav T K, Mustapa M A, Abu Bakar M H, *et al.* Study of single mode tapered fiber-optic interferometer of different waist diameters and its application as a temperature sensor [J]. *Journal of the European Optical Society: Rapid Publications*, 2014, 9: 14024.
- [130] Zulkhairi A S, Azzuhri S R, Shaharuddin R A, *et al.* Switchable multiwavelength ytterbium-doped fiber laser using a non-adiabatic microfiber interferometer [J]. *Laser Physics*, 2017, 27(5): 055104.
- [131] Zhou Y X, Lou S Q, Tang Z J, *et al.* Tunable and switchable C-band and L-band multi-wavelength erbium-doped fiber laser employing a large-core fiber filter [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 111: 262-270.
- [132] Jiao M X, Xing J H, Tong C W, *et al.* Design and experimental study of two-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser [J]. *Chinese Journal of 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.

- [133] Xi M. *Design and Experimental Study of Two-wavelength Single-longitudinal-mode Ytterbium-erbium Co-doped Fiber Laser* [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
席蒙. 双波长单纵模铒镱共掺光纤激光器设计及实验研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [134] Wang X. *Study on Single Longitudinal Mode and Multi-wavelength Thulium-doped Fiber Laser* [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
王雪. 单纵模多波长掺铥光纤激光器研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [135] Cheng X P, Shum P, Tse C H, *et al.* Single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser based on high finesse fiber Bragg grating fabry - Pérot etalon [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(12): 976-978.
- [136] Chen X F, Yao J P, Zeng F, *et al.* Single-longitudinal-mode fiber ring laser employing an equivalent phase-shifted fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(7): 1390-1392.
- [137] He X Y, Fang X, Liao C R, *et al.* A tunable and switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength fiber laser with a simple linear cavity [J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 21773-21781.
- [138] Pan S L, Yao J P. A wavelength-switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength erbium-doped fiber laser for switchable microwave generation [J]. *Optics Express*, 2009, 17(7): 5414-5419.
- [139] Zhang K, Kang J U. C-band wavelength-swept single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser [J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 14173-14179.
- [140] Zhang Y, Chen W, Ren M, *et al.* Stable, tunable single-longitudinal-mode erbium-doped fiber laser with multiple ring cavities [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(3): 507-511.
张艳, 陈伟, 仁民, 等. 稳定可调谐的单纵模多环形腔掺铒光纤激光器. 光学学报, 2008, 28(3): 507-511.
- [141] Moore P J, Chaboyer Z J, Das G. Tunable dual-wavelength fiber laser [J]. *Optical Fiber Technology*, 2009, 15(4): 377-379.
- [142] Sun J Q, Chen J L, Huang Y X, *et al.* Wavelength switchable single-longitudinal-mode fiber laser with two π phase-shifted chirped fiber Bragg grating as a narrow linewidth filter [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(9): 091007.
- [143] Md Ali M I, Ibrahim S A, Abu Bakar M H, *et al.* Tapered-EDF-based Mach-Zehnder interferometer for dual-wavelength fiber laser [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(5): 5501209.
- [144] Hou Y B, Zhang Q, Qi S X, *et al.* Dual-frequency Yb³⁺-doped DBR fiber laser with 32 GHz frequency difference [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1005005.
侯玉斌, 张倩, 齐恕贤, 等. 具有 32 GHz 频差的掺 Yb³⁺ 双频 DBR 光纤激光器 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 1005005.
- [145] Fu P, Feng X Q, Lu B L, *et al.* Switchable dual-wavelength SLM narrow linewidth fiber laser based on nonlinear amplifying loop mirror [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 98: 56-60.