

引用格式: Yao Zefeng, Zhang YaoHui, Xia Handing, et al. Design, characterization, and application in single-longitudinal-mode laser generation of DBR grating[J]. Acta Photonica Sinica, 2026, 55(8):0814002

姚泽锋,张耀辉,夏汉定,等. DBR光栅对设计、表征及单纵模激光产生应用研究[J]. 光子学报, 2026, 55(8):0814002

DBR 光栅对设计、表征及单纵模激光产生应用研究

姚泽锋^{1,2}, 张耀辉¹, 夏汉定¹, 李博闻², 郑钧文¹, 李剑彬¹, 田小程¹, 张帆¹,
张锐¹, 陈林¹, 李平¹

(1 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

(2 电子科技大学 信息与通信工程学院, 成都 611731)

摘 要: 分布布拉格反射式(Distributed Bragg Reflector, DBR)单纵模光纤激光器因具有灵活的波长调谐特性、不易跳模和制作成本低等优点, 已被广泛应用于相干光通信、激光雷达及引力波探测等研究领域。通常, DBR单纵模光纤激光器谐振腔镜由一对布拉格光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)构成, FBG特性决定了激光的输出特性。本文开展了DBR谐振腔光纤光栅设计、表征及单纵模激光产生应用的研究。首先, 基于传输矩阵法, 仿真了光栅结构参数对FBG反射率、反射带宽以及有效光栅长度的影响规律, 获得了可实现1053 nm单纵模激光运转的一对FBG参数; 其次, 根据仿真参数刻写了一对FBG, 提出了一种基于高精度光波长计的FBG参数测量方法, 实现了精度为0.7 pm的FBG反射率与反射带宽测试结果, 测得了FBG边模旁瓣的精细结构。最后, 采用上述FBG搭建了DBR单纵模光纤激光器, 实现了线宽1.12 kHz、功率41.7 mW的稳定单纵模激光输出。该激光器有望在众多光传感领域中发挥重要作用。

关键词: 光纤布拉格光栅; 单纵模; 光栅测试; 分布布拉格反射式谐振腔; 光纤激光器

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20265508.0814002

0 引言

单纵模光纤激光器具有线宽窄、相干性好、信噪比高等特点, 广泛应用于相干光通信、高灵敏度光传感、相干合成高功率激光系统和激光雷达等领域。分布布拉格反射式(Distributed Bragg Reflector, DBR)单纵模光纤激光器, 因具有波长调谐特性、不易跳模和制作成本低等优点已获得了广泛关注。用作DBR单纵模光纤激光器谐振腔镜的光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG), 通常包括一个高反射率FBG(High Reflectivity Fiber Bragg Grating, HR-FBG)和一个低反射率FBG(Low Reflectivity Fiber Bragg Grating, LR-FBG), 其反射谱特性(中心波长、反射带宽及反射率)直接决定了激光器的输出功率、单纵模稳定性及噪声等关键性能。因此, FBG参数的数值仿真和实验表征, 是研制高性能DBR单纵模光纤激光器的关键内容^[1-3]。目前, 针对FBG参数的仿真与测试已经进行了广泛研究; 例如, 研究人员常采用耦合模理论^[4]及传输矩阵法^[5]等方法, 对FBG及其变体(如啁啾光栅^[5]与倾斜光栅^[6])的光谱响应及反透射特性等进行仿真模拟与优化; 同时, 亦有报道专注于FBG制备工艺对其插入损耗等实际性能的影响^[7]。现有研究大多集中于FBG的光谱响应及滤波特性等分析, FBG应用则主要侧重于光纤传感及光纤通信等领域^[8-10]。然而, 针对用于搭建DBR谐振腔的FBG参数设计、高精度表征及其在单纵模激光产生中的应用验证等研究内容仍有

基金项目: 国家自然科学基金(U2441250, U24A20311), 国家重点研发计划(2023YFF0715803)

第一作者: 姚泽锋(2001—), 男, 学生, 硕士, 主要研究方向为DBR单频光纤激光器。

通讯作者: 夏汉定(1987—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为飞秒激光技术、单频激光技术。Email: hdxia2008@sina.com

收稿日期: 2026-04-03; **录用日期:** 2026-06-15

<http://www.photon.ac.cn>

待进一步探索。

本文开展了FBG仿真设计、参数精密表征以及单纵模激光产生应用的实验研究。首先,采用传输矩阵法数值仿真分析了FBG折射率调制深度与FBG长度对FBG参数特性的影响,并获得了1053 nm单纵模光纤激光谐振腔所需的FBG参数范围;其次,为提升FBG反射带宽与反射率的测量精度,提出并验证了一种基于高精度光波长计的FBG参数测量方法,较传统方法,该方法可以精细地测量出FBG反射带宽、反射率及边模旁瓣结构;最后,将上述FBG用于搭建DBR单纵模光纤激光器谐振腔,获得了线宽1.12 kHz、功率41.7 mW的稳定单纵模激光输出,并测量了单纵模激光的功率稳定性、相对强度噪声及频率噪声等关键指标。本文通过上述FBG的“设计-表征-验证”的关联研究,掌握了FBG的设计、表征及单纵模激光产生应用关键技术,为面向高性能DBR单纵模光纤激光器研制提供了技术参考。

1 FBG参数及单纵模激光条件分析

FBG是一种通过紫外曝光等工艺在光纤纤芯内写入周期性折射率调制结构的光纤器件。其工作原理描述如下:当宽带光入射至FBG时,每个折射率调制周期都会对光产生微弱的反射,若入射光波长满足布拉格条件,则来自所有调制周期的反射光将在入射端发生相干相长干涉,从而在该特定波长处产生强烈反射,而不满足此条件的波长则几乎无损耗地透射。因此,FBG本质上是一个波长选反射镜。

1.1 FBG特性分析

满足布拉格反射条件的表达式如下^[11],折射率变化一个周期的长度设为 Λ , n_{eff} 为在布拉格波长 λ_B 处的有效折射率:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1.1)$$

设光栅内以 Λ 为周期、以 z 为轴向分布的折射率为:

$$n(z) = n_{eff} + \Delta n(z) \quad (1.2)$$

$$\Delta n(z) = n_{DC}(z) + n_{AC}(z) \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}z + \varphi\right) \quad (1.3)$$

式(1.3)中直流折射率调制 n_{DC} 表示折射率起伏中的低频部分;交流折射率调制 n_{AC} 表示折射率起伏变化分布的系数; φ 表示其折射率变化的起始相位,折射率分布的具体含义^[12]如图1(a)所示:

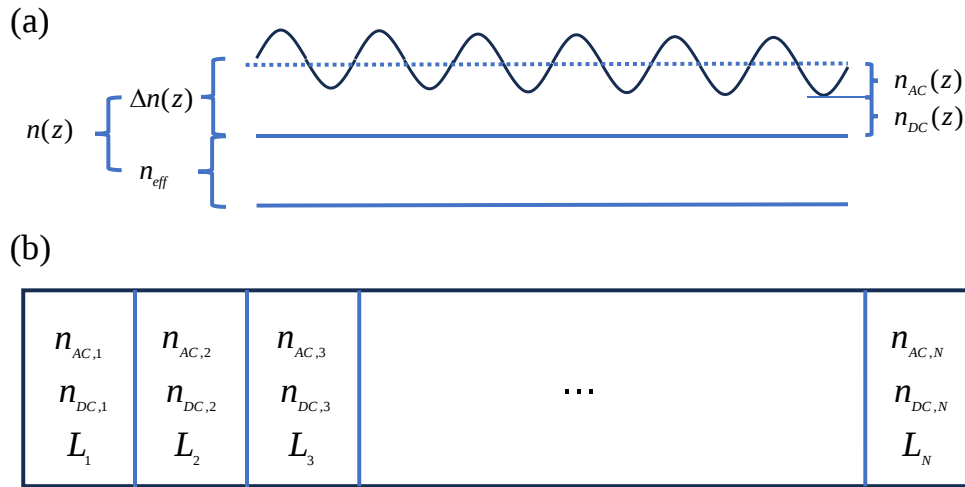


图1 光栅折射率分布及传输矩阵法原理图。(a) FBG折射率变化参数分布;(b) 传输矩阵法系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of grating refractive index profile and transfer matrix method. (a) Distribution of FBG refractive index change parameters; (b) Schematic diagram of the transfer matrix method principle

采用传输矩阵法对FBG的特性进行仿真^[13],仿真原理如图1(b)所示:首先,将整个FBG离散化为 N 段,当 N 足够大,每段离散光栅都可认为是参数分布均匀的。每段光栅都使用3个独立参数来对其传输矩阵进行求解:光栅长度 L 、交流折射率调制 n_{AC} 以及直流折射率调制 n_{DC} 。其中 T_N 表示第 N 段离散光栅的传输矩

阵,初始矩阵 $T_1 = [1, 0; 0, 1]$ 。最后,整个FBG的输出矩阵即为^[13]:

$$T_o = T_N \times T_{N-1} \times \cdots \times T_1 \quad (1.4)$$

其中

$$T_N = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_B \Delta z) - i \frac{\sigma}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) & -i \frac{\kappa}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) \\ i \frac{\kappa}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) & \cosh(\gamma_B \Delta z) + i \frac{\sigma}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

$$\sigma = 2\pi n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) + \frac{2\pi n_{DC}}{\lambda} \quad (1.6)$$

$$\kappa = \frac{\pi n_{AC}}{\lambda} \quad (1.7)$$

$$\gamma_B = \sqrt{\kappa^2 - \sigma^2} \quad (1.8)$$

式中 Δz 为分段后每小段的长度, σ 为直流耦合系数,用来表示FBG中传播的同向光电场的耦合关系, κ 为交流耦合系数,用来表示FBG中传播的反向光电场的耦合关系, λ 为光的波长, γ_B 为计算中间参数。仿真时,由式(1.5)计算出每一段离散光栅的传输矩阵 T_i ,并将其相乘,如式(1.4)所示,最终得到反射光的输出矩阵 T_o ,并由此计算获得FBG反射光谱的强度数据。

其中,FBG参数中的反射率 R 、反射带宽 $\Delta\lambda$ 以及有效长度 L_{eff} 可通过式(1.9)-(1.12)^{[11][13]} 计算得到:

$$T_o = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

$$R = \left| \frac{t_{21}}{t_{22}} \right|^2 \quad (1.10)$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{n_{eff} L} \sqrt{1 + \left| \frac{\kappa L}{\pi} \right|^2} \quad (1.11)$$

$$L_{eff} = \frac{\lambda_B}{2\pi n_{AC}} \tanh\left(\frac{\pi n_{AC}}{\lambda_B} L\right) \quad (1.12)$$

实际工程中,FBG更常采用反射率 R 和物理长度 L 作为指标,为了方便实验计算,式(1.12)可改写如下^[13]:

$$L_{eff} = L \frac{\sqrt{R}}{2 \cdot \operatorname{atanh}(\sqrt{R})} \quad (1.13)$$

图2揭示了FBG反射带宽、反射率及有效长度随FBG长度与折射率调制深度 n_{AC} 的变化规律,为DBR谐振腔设计提供了理论依据。图2(a)中给出了FBG反射带宽与FBG长度和 n_{AC} 的关系曲线,结果表明,反射带宽随 n_{AC} 增大而单调展宽,而增大光栅长度则会压缩反射带宽。图2(b)中给出了FBG反射率与FBG长度和 n_{AC} 的关系曲线,与带宽变化规律不同,反射率随 n_{AC} 增大呈先快速上升后趋于稳定的特征,而增大光栅长度有助于提升反射率。图2(c)给出了不同长度的FBG与 n_{AC} 对FBG有效长度的影响曲线,FBG有效长度随 n_{AC} 增大而显著缩短,增大栅区长度则使得FBG有效长度增加。综上可知,FBG的参数设计受到多个因素共同制约,在实际应用中需根据需求进行优化。

1.2 单纵模激光产生条件分析

DBR单纵模光纤激光器保证稳定的单纵模激光输出极为重要。单纵模激光输出是指:在LR-FBG的选模带宽(通常为反射带宽)内,多个纵模中仅有一个纵模既能满足阈值条件,又能获得净增益,从而形成稳定的单纵模激光振荡。从图3(a)中可以看出,为稳定DBR单纵模光纤激光器的单纵模激光输出,必须满足以下关键设计准则: $\Delta\lambda_{纵} \geq \frac{\Delta\lambda}{2}$, 其中 $\Delta\lambda_{纵}$ 为DBR谐振腔的纵模间距, $\Delta\lambda$ 为LR-FBG的反射带宽^[14]。该条件的物理意义在于:缩短腔长使得纵模间隔增大,使得在LR-FBG的反射带宽内,只有一个纵模能够获得足够的光反馈从而起振,实现单纵模激光输出。

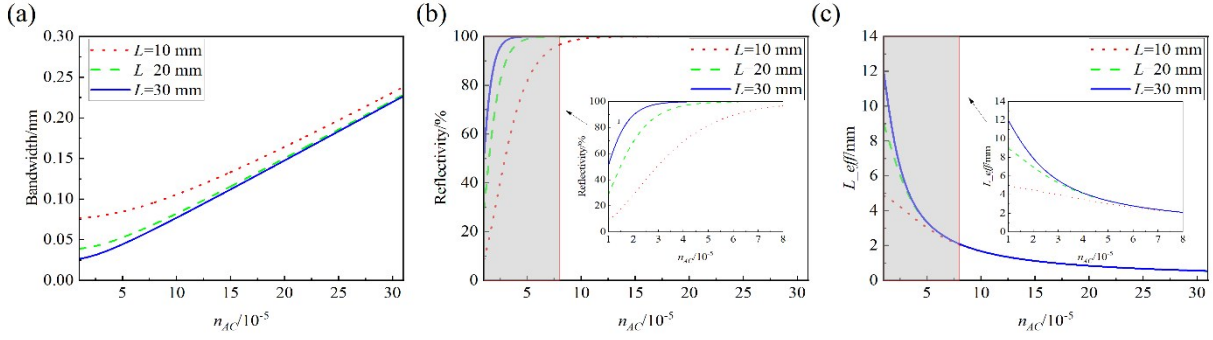


图2 FBG参数变化与栅区长度和 n_{AC} 的关系曲线图。(a)反射带宽;(b)反射率;(c)有效长度

Fig.2 Relationship between FBG parameters and grating length and n_{AC} . (a) Reflection bandwidth; (b) Reflectivity; (c) Effective length

通常,用于DBR单纵模光纤激光器的LR-FBG的反射带宽在0.030 nm至0.120 nm之间^[15-17],该数值决定了最小纵模间距;同时,最小纵模间距决定了谐振腔的最大有效腔长,其关系如式(1.14)所示^[11]:

$$L_{cavitylength, eff} = \frac{\lambda_B^2}{\Delta\lambda_{eff} n_{eff}} \quad (1.14)$$

式(1.14)给出了实现单纵模运转所允许的最大有效腔长,谐振腔有效腔长由高增益掺镱光纤(Ytterbium-doped Fiber, YDF)长度、HR-FBG以及LR-FBG的有效长度共同组成,YDF长度一般取3.0 mm至10.0 mm^[15-17],在本文计算中,采用7.0 mm的YDF作为示例。针对单纵模工作条件对谐振腔有效腔长的约束,谐振腔有效腔长必须小于等于由纵模间距确定的最大有效腔长,通过式(1.14)计算确定FBG有效长度总约束如下:

$$L_{eff, LR} + L_{eff, HR} + L_{YDF} \leq \frac{\lambda_B^2}{\Delta\lambda_{eff} n_{eff}} \quad (1.15)$$

其中 $L_{eff, LR}$ 与 $L_{eff, HR}$ 分别为LR-FBG和HR-FBG的有效长度, L_{YDF} 为YDF长度。基于图2的仿真,HR-FBG与LR-FBG的参数分别设定为 $L = 10.0$ mm、 $n_{AC} = 3.00 \times 10^{-4}$ 和 $L = 20.0$ mm、 $n_{AC} = 2.35 \times 10^{-5}$ 。图3(b)和(c)给出了基于上述参数的FBG反射谱仿真结果:HR-FBG反射率为99.94%,3 dB带宽为0.231 nm;LR-FBG反射率为78.47%,3 dB带宽为0.041 nm。根据仿真结果,通过式(1.12)计算得到HR-FBG与LR-FBG的理论有效长度分别为1.1 mm和6.3 mm,与YDF长度相加得到谐振腔有效腔长为14.4 mm,小于式(1.14)右侧计算出的最大有效腔长37.2 mm,计算结果表明,所得FBG参数满足单纵模激光输出条件^[18],为后续DBR单纵模光纤激光器的搭建提供了关键依据。

2 FBG性能测试

基于1.2节的仿真结果,本文委托制备了一对FBG^[19-20],该FBG参数严格满足1.2节的单纵模激光输出条件。之后,这一对实际制成的FBG将作为后续实验的基准测试对象,用于FBG参数测量方法的比较。

2.1 FBG参数测量方法

FBG参数的精确表征是研制高性能DBR单纵模光纤激光器的关键环节,其测量结果直接决定了谐振腔的设计与搭建,因此在搭建谐振腔之前需要通过实验对FBG进行参数测量。图4(a)展示了传统的FBG参数测试方法,该方法基于宽谱飞秒光源与光谱分析仪(分辨率0.02 nm),测试原理如下:宽谱飞秒光源(中心波长1053 nm,3 dB带宽13.9 nm)输出的宽光谱光脉冲由保偏环形器的第一端口入射,待测FBG连接至保偏环形器的第二端口,反射光由第三端口处接入的光谱分析仪测量,通过反射光谱可获取FBG的中心波长与3 dB带宽。反射率则通过FBG透射端测量到的透射光谱计算获得。

图5展示了基于宽谱飞秒光源与光谱分析仪的传统方法对FBG参数的测量结果。HR-FBG的测量结果显示:HR-FBG中心波长为1053.011 nm、3 dB带宽0.246 nm、反射率99.88%,与理论值基本吻合;而LR-FBG的测量结果显示:LR-FBG中心波长1053.015 nm、3 dB带宽0.049 nm,反射率73.76%,与理论值存在明显偏差。

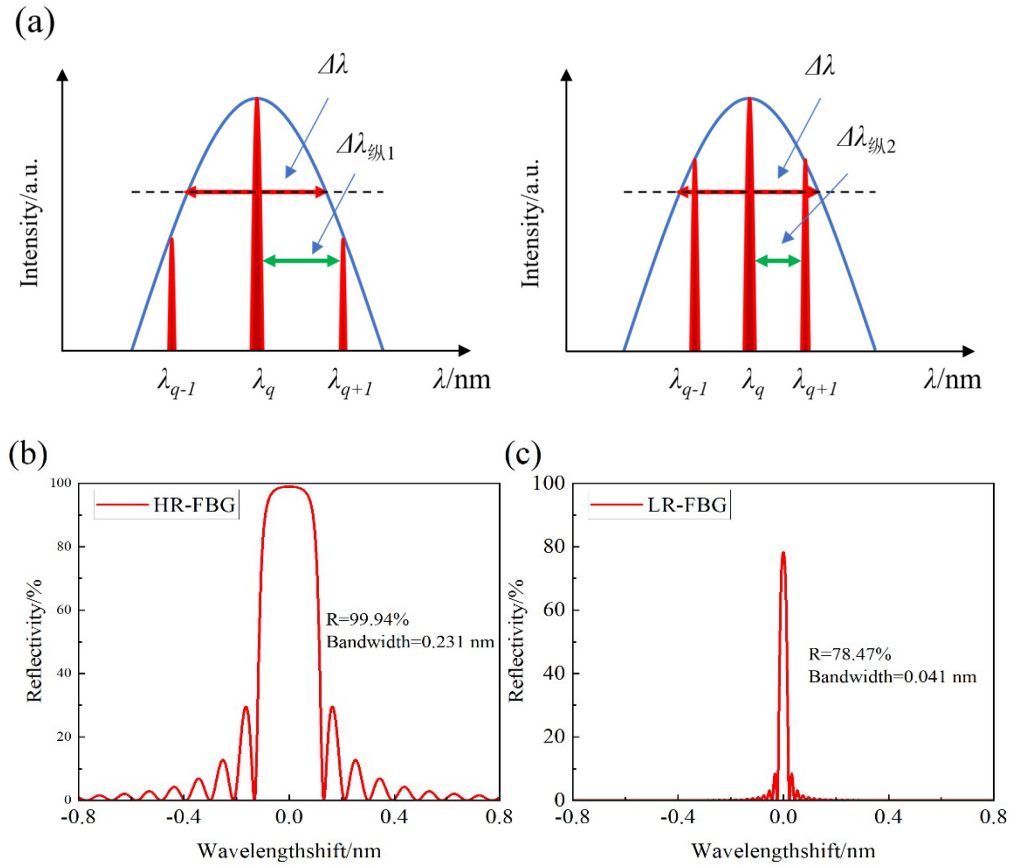


图3 单纵模选择及FBG反射光谱仿真结果图。(a)单纵模选模原理图;(b)HR-FBG反射谱;(c)LR-FBG反射谱
Fig.3 Simulated reflection spectrum of FBG and single-longitudinal-mode selection. (a) Schematic of single longitudinal mode selection principle; (b) High-reflectivity spectrum; (c) Low-reflectivity spectrum

这表明,对于宽带宽的HR-FBG,该传统方法的测量误差不大,尚可适用。但对于超窄带宽的LR-FBG,由于光谱分析仪的分辨率有限,难以解析其精细光谱结构,导致带宽与反射率的测量误差显著增大。因此,该方法难以满足DBR单纵模光纤激光器所需LR-FBG的表征精度需求。

鉴于光谱分析仪的分辨率有限,为降低LR-FBG参数测量误差,需采用精度更高的测量方法进行FBG参数的表征。本文提出并搭建了一套基于可调谐窄线宽激光器与高精度光波长计的FBG参数测量系统,实验装置如图4(b)所示:该方法采用可调谐窄线宽单纵模光纤激光器(中心波长1053 nm,调谐范围0.7 nm)作为扫描光源,并利用高精度光波长计替代光谱分析仪进行波长与功率的同步精密测量。具体而言,调谐激光经保偏环形器注入待测FBG,其反射光与透射光分别接入高精度光波长计进行测量,记录完整的波长-功率曲线,得到FBG的原始反射光谱与透射光谱。数据处理时,需要扣除激光器波长调谐过程中的功率波动背景,从而获得FBG的实际反射光谱与透射光谱。基于此高精度光谱数据,可精确计算出FBG的反射率、中心波长及3 dB带宽参数。

为评估基于高精度光波长计的FBG参数测量方法的效果,本文采用该方法重新测量了同一LR-FBG样品。高精度光波长计在1053 nm波段的波长测量精度为0.7 pm。图6(a)给出了基于高精度光波长计的LR-FBG反射谱测试结果,显示该LR-FBG的中心波长为1053.01044 nm,3 dB带宽为0.03895 nm;图6(b)给出了LR-FBG透射谱测试结果,基线相对于中心波长处的透射光强度差为6.14 dB,由此计算得LR-FBG反射率为75.67%。由于HR-FBG带宽较大,光谱分析仪测量精度可以满足HR-FBG参数测量需求,因此未复测HR-FBG参数。

由图6(a)反射谱可知,得益于光波长计的高精度,该方法不仅测出了LR-FBG主反射峰,还清晰分辨出了LR-FBG的边模旁瓣结构,实验验证了图3(c)的仿真结果。该方法克服了传统光谱分析仪仅能测量主反

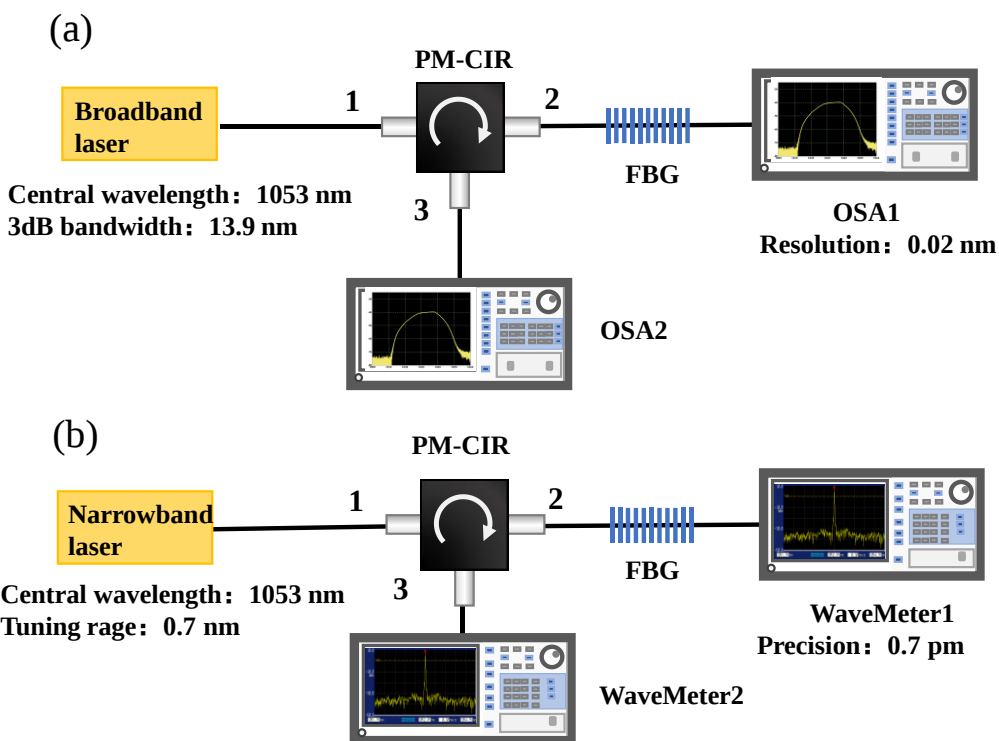


图4 FBG参数测量实验结构。(a)基于宽谱飞秒光源和光谱分析仪;(b)基于窄带光纤激光器和高精度光波长计
Fig.4 Experimental setup for FBG parameter measurement. (a) Based on broadband femtosecond source and Optical Spectrum Analyzer; (b) Based on narrow-linewidth fiber laser and high-precision Optical WaveMeter

射峰且带宽分辨率不足的限制,为超窄带宽FBG参数的精确测量提供了有效解决方案。

2.2 FBG参数测量结果对比

为定量评估高精度光波长计FBG测量方法的优势,表1给出了基于光谱分析仪的传统方法与基于高精度光波长计的FBG参数测量方法的测量对比结果。偏差定义为测量结果较理论设计值的误差占理论设计值的百分比,通过与FBG参数的理论设计值对比可知,新方法测得的3 dB带宽和反射率偏差均更小。例如,较于设计值,新方法测得的3 dB带宽偏差比光谱分析仪测得的3 dB带宽偏差减小了约14.51%,仅为5.00%,测量精度显著提高。

为了对比分析本文所报道的FBG测量方法,将本文测量结果与近年来报道的典型FBG参数测量结果进行了横向对比。2025年,中国海洋大学郑胜男等人^[21]基于飞秒激光与光谱分析仪对飞秒激光直接刻写的双凹面型FBG反射谱特性进行了理论与实验研究,其反射率理论值和实测值分别为81.7%和78.65%,对应反射率偏差为3.73%;3 dB带宽理论值和实测值分别为2.78 nm和1.43 nm,对应带宽偏差为48.56%,文中分析认为偏差原因在于飞秒刻写激光能量的选择:能量过大,会导致散射损耗增加从而降低光栅反射谱强度;过小则使光栅折射率调制区双凹面的圆弧曲率估计值产生误差,从而使实际折射率调制区域、模场耦合强度及散射损耗与仿真模型不一致。对比发现,得益于光波长计的高精度(0.7 pm),本文实验测得的FBG反射率与3 dB带宽偏差都能控制在较低水平,能够满足DBR单纵模光纤激光器研制过程中对FBG关键参数测量的需求。因此,针对超窄带FBG参数测量中传统光谱分析仪方案精度不足、难以识别边模旁瓣的限制,高精度光波长计结合窄线宽可调谐激光的扫描测量方法,能够实现更高精度的光学参数测量,有效解决了上述超窄带FBG的测量难题。

3 FBG在DBR单纵模激光产生的应用研究

3.1 DBR单纵模光纤激光器搭建

图7展示了1053 nm DBR单纵模光纤激光器的结构示意图,DBR激光器谐振腔结构如图7左侧所示,采用高掺杂YDF作为增益介质,长度为7.0 mm,其数值孔径、纤芯直径和吸收系数分别为0.16、4 μm 和

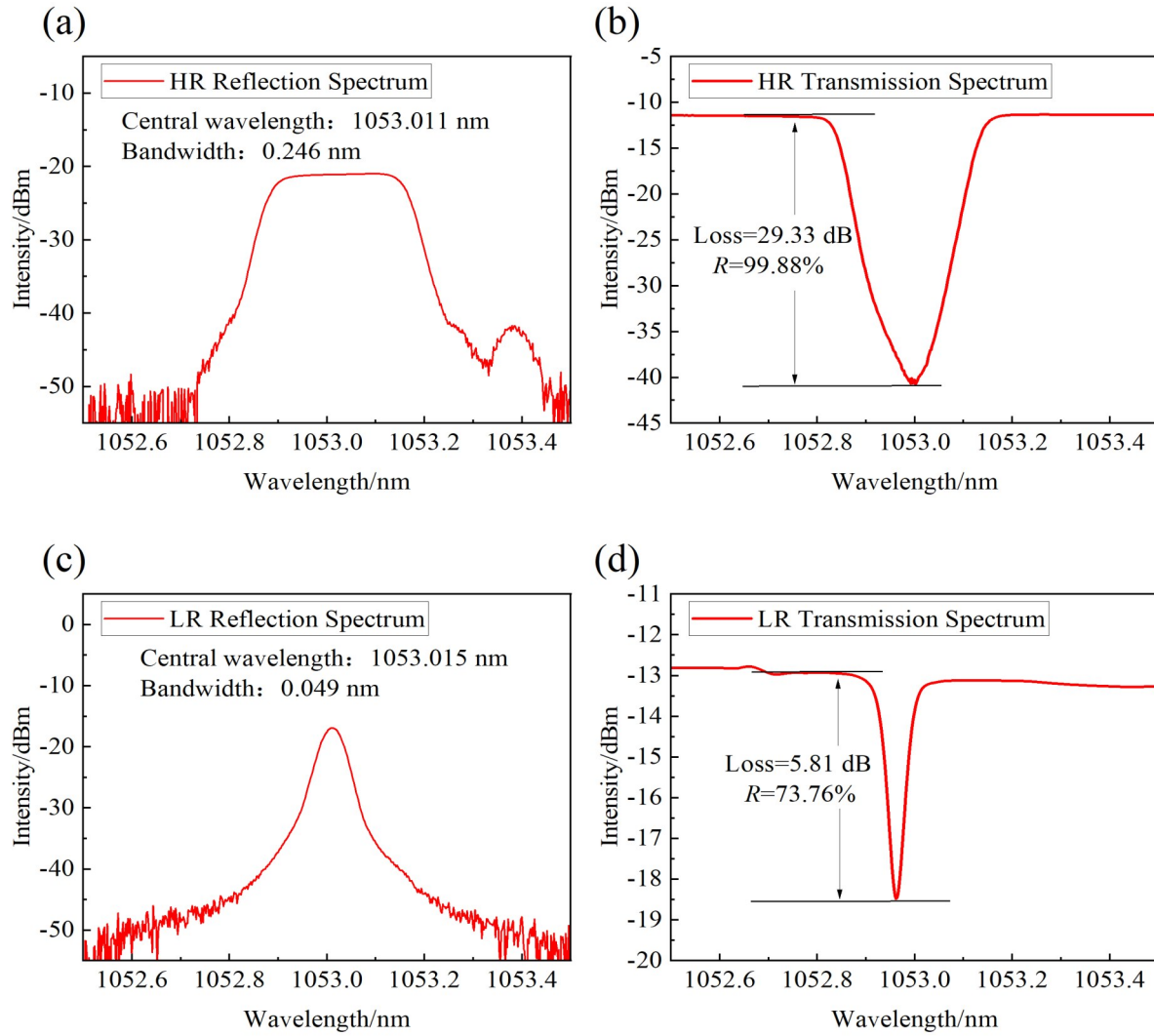


图5 基于宽谱飞秒光源及光谱分析仪的FBG参数测试方法。(a) HR-FBG反射谱;(b) HR-FBG透射谱;(c) LR-FBG反射谱;(d) LR-FBG透射谱

Fig.5 FBG Parameter measurement method based on broadband femtosecond source and optical spectrum analyzer. (a) HR reflection spectrum; (b) HR transmission spectrum; (c) LR reflection spectrum; (d) LR transmission spectrum

2400 dB/m@975 nm。该YDF两端与具有不同反射特性的一对FBG相熔接,构成DBR型光纤谐振腔。其中,HR-FBG刻写在HI1060光纤上,长度为10.0 mm,反射率为99.80%,3 dB带宽为0.246 nm;LR-FBG刻写在PM980光纤上,长度为20.0 mm,反射率为75.67%,3 dB带宽为0.03895 nm。在HR-FBG的尾端,其光纤端面以约8°的角切割,以消除端面反射,防止残余光反馈回谐振腔,从而确保单纵模输出的稳定性。为确保谐振腔的低损耗与高稳定性,搭建谐振腔时优化了熔接机的放电参数(包括主/次放电功率、放电时间及重叠量等),将FBG与YDF之间两个熔接点的插入损耗优化至0.2 dB以下。谐振腔熔接完成后,将DBR腔置于带沟槽的铝制散热基板上,并用导热硅胶固定,便于后续温控与测试。

泵浦光采用反向注入方式:由一台976 nm单模半导体激光器输出,经一个保偏波分复用器(Polarization Maintaining Wavelength Division Multiplexer, PM-WDM)反向注入谐振腔。采用此反向泵浦结构旨在优化腔内增益分布并抑制放大的自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)噪声。谐振腔内产生的激光经由PM-WDM的pass端口输出。为确保有效抑制由端面或熔接点反射引起的寄生振荡及弛豫振荡,在输出光路中熔接了隔离度优于30 dB的保偏隔离器(Polarization Maintaining Isolator, PM-ISO)。最终,激光经PM-ISO后,由一个光纤耦合器进行分路输出,分别用于后续的表征与监测^[22]。

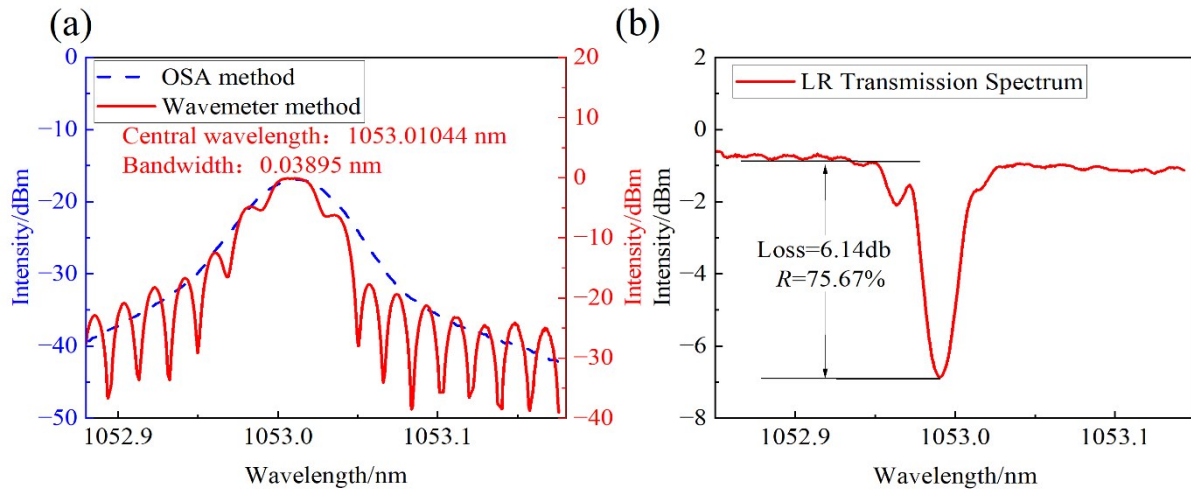


图6 基于窄线宽光纤激光器及高精度光波长计的FBG参数测试方法。(a) LR-FBG反射谱;(b) LR-FBG透射谱
Fig.6 Parameter measurement method based on narrow-linewidth fiber laser and high-precision optical wavemeter. (a) LR reflection spectrum;(b) LR transmission spectrum

表1 FBG参数测试结果对比表
Table.1 Comparison table of test results

	LR-FBG		HR-FBG	
	Bandwidth(nm)	Reflectivity (%)	Bandwidth(nm)	Reflectivity(%)
Design Value	0.041	78.84	0.231	99.94
OSA Method	0.049	73.76	0.246	99.80
OSA Method Deviation	19.51%	6.44%	6.49%	0.14%
Wavemeter Method	0.03895	75.67	/	/
Wavemeter Method Deviation	5.00%	4.02%	/	/

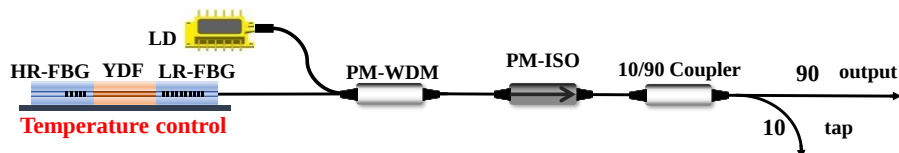


图7 DBR单纵模光纤激光器实验结构图
Fig.7 Experimental setup of the DBR single-longitudinal fiber laser

3.2 单纵模激光产生实验结果

在激光器搭建过程中,通过优化熔接参数有效降低了熔接点损耗,腔损耗也随之减小,使得激光器的启振泵浦阈值低至约1 mW。调节温控使谐振腔温度稳定在25℃,当增大泵浦功率至120 mW时,获得了稳定的单纵模激光输出,图8(a)所示为该条件下的单纵模激光光谱,其中心波长为1052.992 nm,信噪比大于75 dB。采用自由光谱范围为1.5 GHz的法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)扫描干涉仪测量了此时输出激光的单纵模特性,图8(b)为F-P干涉仪测试结果图,结果显示在一个扫描周期内仅有两个干涉峰,表明此时激光器工作在单纵模运转状态下。图8(c)给出了泵浦功率调节至250 mW时激光器在4小时内输出功率稳定性统计结果,平均功率为16.72 mW,由于激光器采用了精密温控以及全光纤熔接构成的低损耗谐振腔结构,输出功率波动的均方根(Root Mean Square, RMS)值约为0.227%,表现出了良好的长期功率稳定性。同时,如图8(d)所示,温控模块设置温度由3℃升高至55℃的过程中,输出激光中心波长可从1052.8726 nm以6.7 pm/℃的温度调谐率无跳模地调谐至1053.2243 nm,总调谐量达到0.348 nm。

图9给出了所研制DBR单纵模光纤激光器的噪声特性测试结果。其中,图9(a)为泵浦源(红色曲线)和

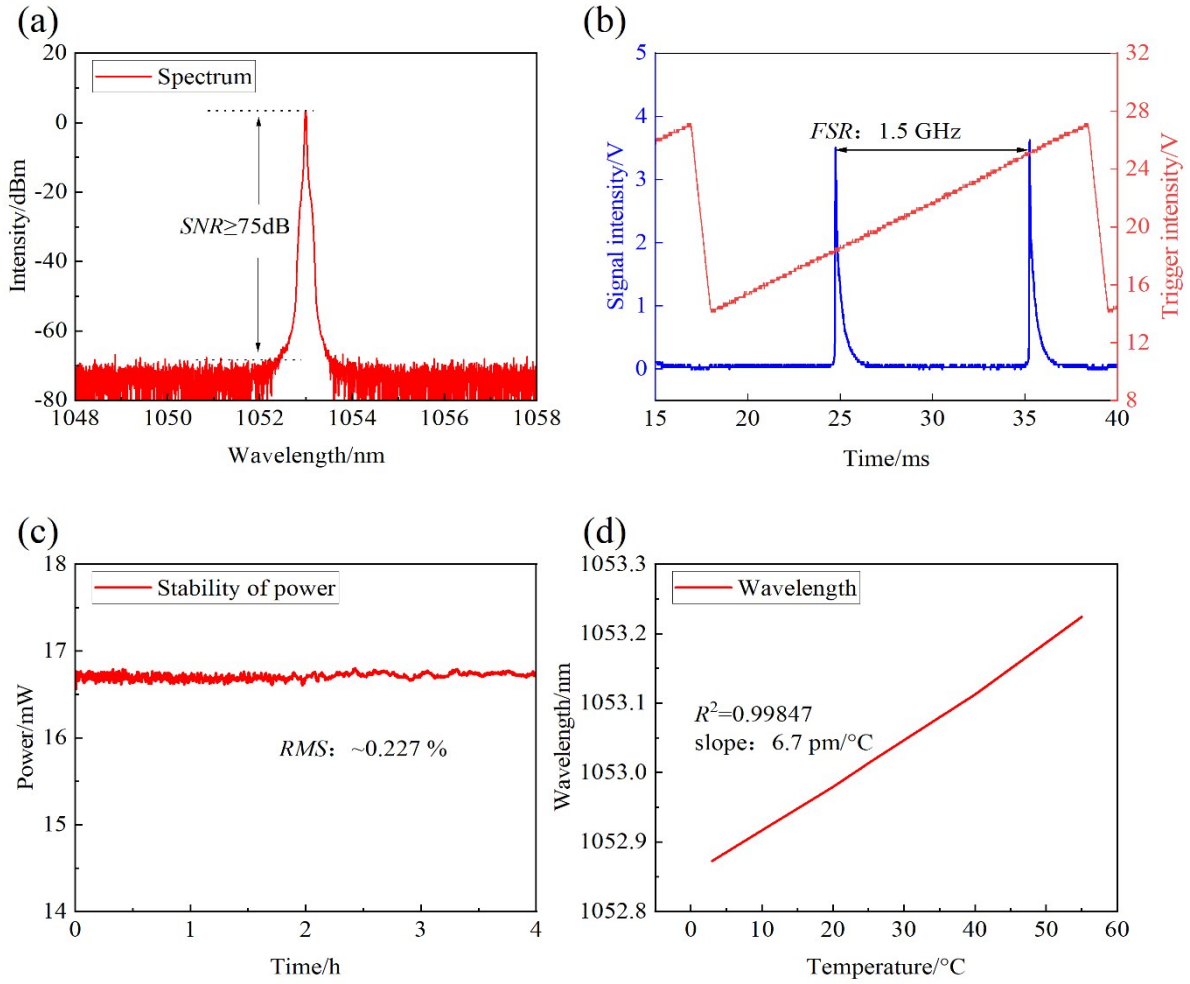


图8 DBR单纵模光纤激光器输出特性。(a) 光谱;(b) 单纵模特性;(c) 功率稳定性;(d) 波长调谐

Fig.8 Output characteristics of the DBR single-longitudinal fiber laser. (a) Spectrum;(b) Single longitudinal mode;(c) Stability of power;(d) Wavelength tuning

激光器输出单纵模激光(蓝色曲线)的相对强度噪声谱,测得DBR单纵模光纤激光器弛豫振荡峰频率在1.42 MHz附近,峰值强度为-105 dBc/Hz。在大部分频率范围内,激光器相对强度噪声接近泵浦本底噪声,表明其具有较低的相对强度噪声。进一步采用商用激光线宽分析仪对激光器的频率噪声特性进行了测试,测量得到激光器频率噪声谱如图9(b)所示,结果显示,在100 μs 积分时间下,激光器的积分线宽为1.12 kHz,表明激光器具有较好的相干性。

为了对比分析本文研制的DBR单纵模光纤激光器技术指标水平,本文将该激光器的主要参数与近年来类似激光器进行了横向对比。2017年,西北大学的黄金报道了1064 nm波段的DBR光纤激光器,实现了平均功率13 mW、线宽4.8 kHz的单纵模激光输出^[23];2025年,安徽光学精密机械研究所的Liu等人报道了1053 nm波段的DBR单纵模光纤激光器,实现了输出信噪比65 dB、线宽1.5 kHz、光谱调谐范围1.3 nm的单纵模激光输出^[17];本文研制的1053 nm波段单纵模光纤激光器实现了输出功率16.6 mW、光谱信噪比75 dB、线宽1.12 kHz以及光谱调谐范围0.348 nm。对比发现,本文报道的激光器,在功率、线宽及光谱信噪比方面,与上述研究结果处于同一水平甚至部分指标更优,可以满足相干合成高功率激光系统、激光雷达等领域的应用需求^[1-3];但是,在波长调谐范围方面还有较大差距。未来,通过增大TEC温控范围、优化DBR谐振腔的封装方式及夹持件材质,有望进一步提升该激光器的波长可调谐范围。

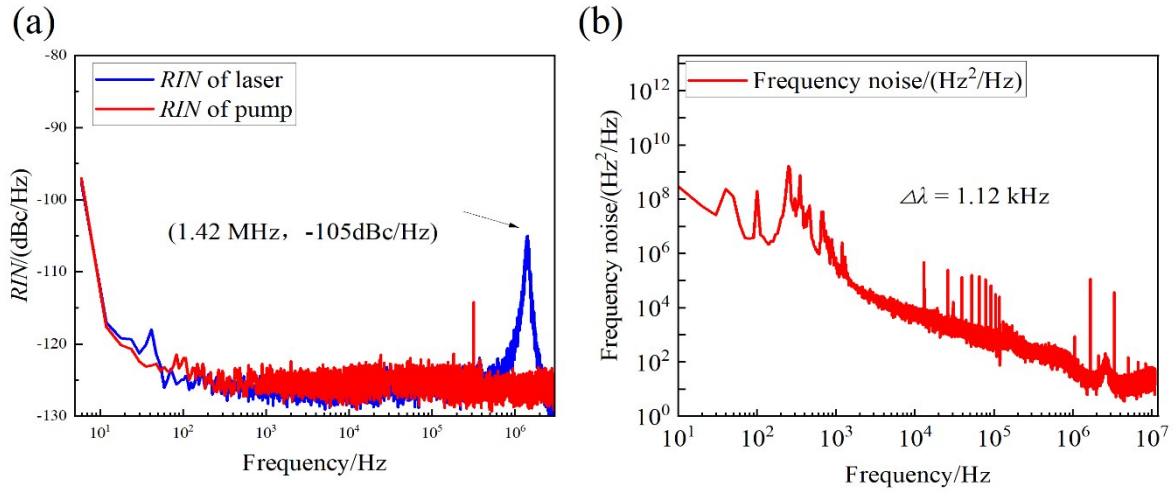


图9 激光器噪声特性。(a) 相对强度噪声;(b) 频率噪声
Fig.9 Laser noise characteristics. (a) RIN;(b) Frequency noise

4 结论

实现高性能DBR单纵模光纤激光器的关键在于对其核心元件——FBG的参数设计与表征。为此,本文围绕DBR单纵模光纤激光器的研制,实现了从设计、表征到激光产生应用的关联研究。首先,通过传输矩阵法仿真,分析了FBG光栅折射率调制深度与光栅长度对FBG参数特性的影响,确定了1053 nm单纵模运转所需的FBG参数范围;其次,通过所提出的基于高精度光波长计的FBG参数测量方法(精度达0.7 pm)完成了对FBG参数的测量与验证;最后,搭建的DBR单纵模光纤激光器实现了中心波长1052.992 nm、线宽1.12 kHz、输出功率41.7 mW的稳定单纵模激光输出,其边模抑制比优于75 dB,结果验证了从理论设计到激光器实现的可行性。

本文通过FBG设计、表征及激光产生应用的关联研究,掌握了1053 nm单纵模光纤激光器设计与研制能力,同时,也为其他波段的高性能DBR单纵模光纤激光器研制提供了参考。本工作的局限性主要在于目前集中于FBG在静态、常温条件下的特性研究。未来工作可进一步拓展至宽温域、动态应力等复杂环境下的FBG参数演变规律,研制高环境适应性DBR单纵模光纤激光器及并探索其在复杂工况的相干探测、高精度传感以及相干合成高功率激光系统等场景的应用。

参考文献

- [1] ZHAO Rong, LU Xinda, GAO Chenhui, et al. Highly localized FBG fabricated by femtosecond laser single-pulse filaments [J]. Optics & Laser Technology, 2025, 187: 112810.
- [2] KOUSTAV D, OGBOLE C, ZHU Chen, et al. Core-cladding parallel FBG with enhanced SNR via direct femtosecond laser inscription[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 192: 114019.
- [3] GUO Yu, SHEN Yanxia, TONG Xingxing, et al. Simultaneous measurement of vibration and temperature based on FBG and DBR fiber laser beat frequency digital sensing system[J]. Optical Fiber Technology, 2023, 75: 103155.
- [4] CHEN Ru. MATLAB simulation of transmission spectrum of long-period fiber grating[J]. Computer Simulation, 2007, (04): 301-303+321
陈儒. 长周期光纤光栅传输谱的MATLAB仿真[J]. 计算机仿真, 2007, (04): 301-303. 321.
- [5] CAI Hong, WEI Zhifeng. Spectral simulation of linearly chirped fiber Bragg grating based on transfer matrix theory [J]. Journal of Shanxi University, 2011, 34(02): 237-240.
蔡虹, 魏志峰. 基于传输矩阵理论线性啁啾光纤光栅光谱仿真研究[J]. 山西大学学报, 2011, 34(02): 237-240.
- [6] FAZZI L, KLYUKIN D, GROVES R M. Transfer matrix method for fundamental LP01 core mode coupling in a tilted FBG sensor[C]//AIP Conference Proceedings. 2020, 2293: 200010.
- [7] WANG Diyang, LI Xuan, et al. Measurement and analysis of loss characteristics of fiber Bragg gratings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(06): 186-192.
王迪洋, 皮浩洋, 李璇, 等. 光纤布拉格光栅损耗特性的测量与分析[J]. 中国激光, 2018, 45(06): 186-192.
- [8] WANG Zechao, QIU Yufu, CHEN Jianghua, et al. A novel FBG-based tri-axis tip force sensor: design, modeling, and application[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2025, 30(6): 5722-5733.

- [9] RIZA M A, GO Y I, HARUN S W, et al. FBG Sensors for environmental and biochemical applications—a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(14): 7614–7627.
- [10] CAPONERO M A. Use of FBG sensors in advanced civil engineering applications[C]. 6th International Conference Frontiers in Diagnostics Technologies, 2023, 18: C07020.
- [11] ERDOGAN T. Fiber grating spectra[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1277–1294.
- [12] FAN Yi, CHEN Heming. Study on transmission spectrum of apodized phase-shifted fiber grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, (06): 26–30.
范毅, 陈鹤鸣. 变迹相移光纤光栅传输谱的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2005, (06): 26–30.
- [13] YIN Feifei, DAI Yitang. Theory and application of fiber Bragg gratings[M]. Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2019.
尹飞飞, 戴一堂. 光纤布拉格光栅理论及应用[M]. 北京邮电大学出版社, 2019.
- [14] ZHANG Yuning, LI Can, XU Shanhui, et al. A broad continuous temperature tunable DBR single-frequency fiber laser at 1064 nm [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(2): 1–7.
- [15] LV Ruidong, CHEN Tao, HUANG Jin, et al. Linewidth compression of a single longitudinal mode ytterbium-doped fiber laser based on femtosecond laser fabricated fiber Bragg gratings [J]. Applied Optics, 2024, 63(8): 2004–2010.
- [16] LI Yanyan, DENG Xun, FU Shijie, et al. High-power, high-efficiency single-frequency DBR fiber laser at 1064nm based on Yb³⁺-doped silica fiber [J]. Optics Letters, 2023, 48(3): 598–601.
- [17] LIU Xiaobing, PAN Hao, PAN Yongjian, et al. Low-noise 1053 nm DBR single longitudinal mode fiber laser with 1.3 nm mode-hop-free tuning range[J]. Optical Fiber Technology, 2025, 93: 104255.
- [18] WANG Yuhan. Rapid analysis and simulation of transmission characteristics for non-uniform fiber gratings[D]. Chongqing University, 2011.
汪雨寒. 非均匀光纤光栅传输特性快速分析及仿真[D]. 重庆大学, 2011.
- [19] RAO Yunjiang, WANG Yiping, ZHU Tao. Principle and Application of Fiber Gratings[M]. Science Press, 2006.
饶云江, 王义平, 朱涛. 光纤光栅原理及应用[M]. 科学出版社, 2006.
- [20] KENNETH O H, GERALD M. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1263–1276.
- [21] ZHENG Shengnan, CHEN Dongying, ZHAO Qiang, et al. Design and sensing characteristic analysis of biconcave-shaped fiber Bragg grating structures inscribed by femtosecond laser[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(3): 0305002.
郑胜男, 陈东营, 赵强, 等. 基于飞秒激光写制的双凹面型光纤布拉格光栅结构设计与传感特性分析[J]. 光学学报, 2025, 45(3): 0305002.
- [22] WEI Zhenshuai, HUANG Lu, LI Haiyan, et al. High-efficiency single-frequency DBR fiber laser at 1091 nm utilizing a Yb:YAG crystal-derived silica fiber[J]. Optics Express, 2024, 32(9): 15370.
- [23] HUANG Jin, SUN Bo, JIA Jing, et al. 1064 nm Ultrashort Cavity Single-frequency Distributed Bragg Reflector Yb-doped Silica Fiber Laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(8): 814003.
黄金, 孙博, 贾静, 等. 1064 nm 超短腔 DBR 单频掺镱硅酸盐光纤激光器[J]. 光子学报, 2017, 46(8): 814003.

Design, characterization, and application in single-longitudinal-mode laser generation of DBR grating

Yao Zefeng^{1,2}, Zhang YaoHui¹, Xia Handing¹, Li Bowen², Zheng Junwen¹, Li Jianbin¹, Tian Xiaocheng¹, Zhang Fan¹, Zhang Rui¹, Chen Lin¹, Li Ping¹

(1 Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

(2 School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Single-longitudinal-mode (SLM) fiber lasers are recognized for their narrow linewidth, high coherence, excellent beam quality, and ease of integration, making them indispensable for a wide array of applications, including coherent optical communication, LiDAR, and gravitational-wave detection. Their ability to generate high-quality, stable, narrow-linewidth light is crucial for ensuring the integrity and precision required in these fields. Additionally, distributed Bragg reflector (DBR) SLM fiber lasers provide several key advantages, such as flexible wavelength tuning, mode-hop-free operation, and relatively low fabrication costs. These benefits have contributed to their growing adoption across various industries and

research areas. However, the output performance of DBR SLM fiber lasers is heavily influenced by the intracavity fiber Bragg grating (FBG), whose spectral characteristics directly impact critical parameters such as linewidth, side-mode suppression ratio (SMSR), wavelength stability, and output power. Consequently, precise control and accurate characterization of FBG parameters are essential for optimizing the performance of DBR SLM fiber lasers. This study investigates the design, characterization, and application of FBG in DBR resonators for SLM laser generation, following a comprehensive technical framework that includes theoretical simulations, device fabrication, and experimental validation. The transfer matrix method is utilized to simulate the effects of refractive index modulation depth and grating length on the reflectivity, reflection bandwidth, and effective grating length of the FBG. Through this method, a detailed understanding of the relationship between structural parameters and spectral responses is obtained. Based on the requirements for stable SLM operation, an optimized set of FBG parameters is determined to ensure the efficient operation of the laser around 1053 nm. The simulated high-reflectivity FBG (HR-FBG) achieves a peak reflectivity of 99.94% and a bandwidth of 0.231 nm, while the low-reflectivity FBG (LR-FBG) exhibits a reflectivity of approximately 78.47% and a bandwidth of 0.041 nm. These optimized parameters are crucial for maintaining stable SLM operation and confirming the effectiveness of the simulation methodology in achieving the desired laser performance. Subsequently, a pair of FBG is fabricated based on the optimized parameters for experimental validation. A high-precision wavemeter-based measurement method for characterizing FBG is introduced, offering a significant improvement over conventional methods that utilize broadband femtosecond sources and optical spectrum analyzers (OSA). The wavemeter-based method achieves a remarkable precision of 0.7 pm for both FBG reflectivity and reflection bandwidth measurements, allowing for the detailed observation of the FBG side-mode lobes, which is crucial for understanding the fine spectral features of the laser. Experimental results show that the traditional OSA-based measurement technique introduces significant errors, especially when determining the 3 dB bandwidth of the LR-FBG. In contrast, the proposed wavemeter-based method offers superior accuracy, with minimal deviation from the simulation results, demonstrating its reliability and precision for FBG characterization. Finally, the characterized FBG pair is fusion-spliced with a 7-mm section of high-gain ytterbium-doped fiber to form a compact DBR resonator, and the performance of the resulting laser is experimentally validated. The laser operates at a center wavelength of 1052.992 nm, with a linewidth of 1.12 kHz, measured over a 100 μ s integration time, indicating excellent temporal coherence and stability. Continuous, mode-hop-free tuning of 0.348 nm is achieved by varying the temperature from 3 °C to 55 °C, demonstrating exceptional thermal tuning capability and environmental adaptability. Under a 730 mW pump power at 976 nm, the laser delivers an output power of 41.7 mW, with a side-mode suppression ratio exceeding 75 dB, indicating high spectral purity and effective mode filtering. These results validate the optimized FBG design and the high-performance operation of the DBR SLM fiber laser. This work contributes to the advancement of the design and characterization of FBGs for SLM fiber lasers, significantly improving the accuracy and precision of FBG parameters. While this study focuses on FBG characterization under static, room-temperature conditions, future research will explore the evolution of FBG parameters under varying temperature ranges, dynamic mechanical stress, and exposure to radiation. Additionally, the performance of the laser in practical applications, such as coherent detection, high-precision sensing, and coherent synthesis for high-power laser systems, will be further investigated to fully exploit the potential of SLM fiber lasers in real-world environments.

Key words: fiber Bragg grating; single longitudinal mode; grating characterization; distributed Bragg reflector cavity; fiber laser

OCIS Codes: 060.3480; 060.3735; 060.2310; 060.2430

CSTR: 32255.14.gzxb20265508.0814002