

啁啾倾斜 Bragg 光纤光栅制作及 Raman 滤除研究

张宇菁, 王 蒙, 王泽锋, 曹润秋, 肖 虎

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 受激拉曼散射(SRS)是制约光纤激光器功率进一步提升的重要因素之一。提出利用啁啾倾斜 Bragg 光纤光栅(CTFBG)抑制 SRS, 针对 1018 nm 光纤激光 SRS 信号设计并制作了 1066 nm 啁啾倾斜光纤光栅, 搭建实验系统, 对拉曼信号滤除效果进行了验证。结果表明, 设计的 CTFBG 对 1 级 SRS 信号的抑制接近 20 dB, 取得了很好的效果。研究结果对利用 CTFBG 抑制大功率光纤激光振荡器和放大器中的 SRS, 进一步提高光纤激光的效率和输出功率具有一定意义。

关键词 光纤光学; 倾斜 Bragg 光纤光栅; 光纤激光器; 受激拉曼散射

中图分类号 TN247; TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0106002

Fabrication of Chirped and Tilted Fiber Bragg Gratings and Investigation of Raman Filtering Effect

Zhang Yujing, Wang Meng, Wang Zefeng, Cao Jianqiu, Xiao Hu

College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,

Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Stimulated Raman scattering (SRS) is one of the important factors which restrict the further improvement of fiber laser power. We propose that using chirped and tilted fiber Bragg gratings (CTFBGs) can suppress SRS. According to the design of optical fiber laser SRS signal of 1018 nm, a CTFBG of 1066 nm is fabricated. An experimental system is established to verify the filtering effect of Raman signal. Results show that the designed CTFBG can suppress the first-order SRS signal about 20 dB, and achieve a good effect. The research results have certain significance for suppressing SRS in high power fiber laser oscillator and amplifier with CTFBG, and for further improving the efficiency and output power of fiber lasers.

Key words fiber optics; tilted fiber Bragg grating; fiber lasers; stimulated Raman scattering

OCIS codes 060.2340; 140.3510; 290.5910

1 引 言

自 1978 年加拿大通信研究中心的 Hill 等^[1]发现了纤芯掺铒的光纤具有光敏性, 并利用双向传播的 488 nm 氩离子激光束形成的驻波刻写了世界上第一个光纤光栅以来, 光纤光栅获得了飞速发展, 已经成为一种重要的光纤无源器件, 广泛应用于光纤激光器、光通信、光纤传感等领域。1990 年, Meltz 等^[2]首次提出倾斜光纤光栅模型。倾斜光栅的光栅平面不与光纤轴向垂直, 有一定倾斜角度, 加强了前向传输的纤芯模到后向或前向传输的包层模、辐射模的耦合。它能够通过改变制作系统的装置来精确地按照目标光谱进行制备, 光纤种类不限, 所以倾斜光纤光栅是近年来的研究重点。由于其特殊的模式耦合特性, 其应用范围非常广泛, 包括滤波器、掺铒放大器的增益平坦器^[3-5]、波分复用器(WDM)^[6]、偏振相关器件^[7-8]、各种传感器^[9-11]等, 此外功能型涂覆进一步拓展了其传感的新领域^[12-14]。其中, 滤波器是倾斜光纤

收稿日期: 2016-07-25; **收到修改稿日期:** 2016-08-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11274385)

作者简介: 张宇菁(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤光栅方面的研究。E-mail: 15084929846@163.com

导师简介: 王泽锋(1980—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光纤气体激光器和光纤光栅方面的研究。

E-mail: hotrosemaths@163.com(通信联系人)

光栅最基本的一项应用,已有相关报道尝试将啁啾光栅与倾斜光栅相结合制作出带宽可调的宽带带阻滤波器^[15]。

近年来,具有转换效率高、光束质量好等优势掺杂稀土离子光纤激光器得到了广泛应用^[16-17]。随着双包层光纤工艺的进步和抽运光源的改进,其输出功率不断地提升,其中掺镱光纤激光器已经实现了近衍射极限万瓦级输出^[18]。目前受激拉曼散射(SRS)仍是限制光纤激光器功率进一步提升的关键因素^[19]。在光纤中双向传输的受激拉曼散射光会导致信号激光功率下降,更具有危害性的是后向传输的 SRS 被放大后会对系统形成致命的损伤。研究人员通过利用大模场光纤^[20]或特殊波段高损耗光纤^[21]来抑制 SRS,取得了较好的效果,但受限于光纤的制作工艺,应用仍十分有限。也可采用拉曼兼容的方法,即注入一个前向的拉曼种子光,允许前向拉曼激光与信号激光一起输出,可以有效地将后向拉曼信号抑制在一定范围内,但是输出光谱特性变差,同时光束质量也会受到一定的影响。另有报道利用二氧化碳激光制作的长周期光纤光栅作为滤波器^[22],通过将部分拉曼散射光耦合至包层中滤除,达到抑制 SRS 的目的,但是长周期光栅的交叉敏感问题是影响其稳定性的重要因素。基于紫外准分子激光器制作的啁啾倾斜 Bragg 光纤光栅(CTFBG),通过选择合适啁啾率和周期的相位掩模板,设计合理的倾斜角度,可以方便地制作与光纤激光 SRS 信号匹配(中心波长和带宽)的滤波器,进而达到滤出拉曼信号的目的。到目前为止,利用 CTFBG 滤除拉曼信号的相关实验未见报道。

本文提出利用 CTFBG 抑制大功率光纤激光器中的 SRS 信号,并进行了实验验证。介绍了啁啾倾斜光纤光栅的模式耦合理论和拉曼抑制机理,利用 OptiGrating 仿真分析了倾斜角度、调制深度、啁啾率对啁啾倾斜光纤光栅透射谱的影响;设计并采取旋转相位掩模板的方法制作了滤除 1018 nm 光纤激光 SRS 信号的 1066 nm 啁啾倾斜光纤光栅,并搭建了实验系统进行验证,取得了对于 1 级 SRS 信号近 20 dB 的滤除效果。为下一步利用啁啾倾斜光纤光栅抑制大功率光纤激光中的 SRS 打下了一定的基础。

2 工作原理与仿真

2.1 基础理论

与普通 Bragg 光纤光栅类似,倾斜光纤光栅在纤芯中的折射率调制也是沿光纤轴向呈现周期性,不同之处是倾斜光纤光栅的光栅平面与光纤的切向呈一定倾角,如图 1 所示。由于倾斜角度的存在,除了存在前向与后向传输的纤芯模间的耦合外,还存在前向传输的纤芯模与后向传输的包层模或辐射模(假设包层直径无限大)间的耦合。在倾斜光纤光栅的透射光谱中短波区域会出现许多分立的谐振峰,这就是纤芯模与包层模间的耦合现象。

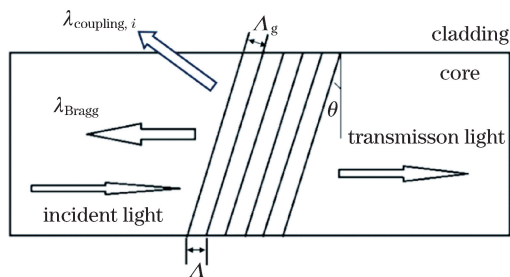


图 1 倾斜光纤光栅结构图

Fig. 1 Structure diagram of tilted fiber grating

透射谱的上述现象可以用 Bragg 衍射理论来解释^[23]。入射光进入光栅只有满足了动量守恒,即相位匹配条件后才能有效地衍射。纤芯模或包层模波矢量可表示为 $\beta_i = 2\pi n_{\text{eff},i} e_z / \lambda$, 其中 e_z 为沿光纤轴向的单位矢量,正方向为入射光传播方向, $n_{\text{eff},i}$ 为第 i 阶模在波长 λ 情况下的有效折射率。入射光栅前的波矢量为 $\beta_{\text{in}} = 2\pi n_{\text{eff}} e_z / \lambda$, 入射光栅后的波矢量为 $\beta_g = -2\pi e_z / \Lambda$, $\Lambda = \Lambda_g / \cos \theta$ 。因此 2 种模式耦合的相位匹配条件可以表示为 $\beta_{\text{in}} + \beta_i = \beta_g$, 即数值上满足

$$2\pi n_{\text{eff}} / \lambda + 2\pi n_{\text{eff},i} / \lambda = 2\pi \cos \theta / \Lambda_g \quad (1)$$

如图 2(a)所示,对于一个普通 Bragg 光栅,只存在前向、后向传输纤芯模间的耦合。此时,在某一特定波长,只有当 β_g 是纤芯模波矢量 β_{01} 幅度的 2 倍时相位匹配条件才满足,所以在其透射谱中仅有 Bragg 谐振峰。如图 2(b)所示,光栅平面倾斜后 β_g 的数值减小,此时 Bragg 反射无法满足相位匹配条件,但由于包层模的有效折射率小,可能出现纤芯模耦合至包层模的情况,这些包层模由于强烈的损耗而在包层的边界处被散射或吸收,因此在透射谱的短波区域会出现一系列分立谐振峰。

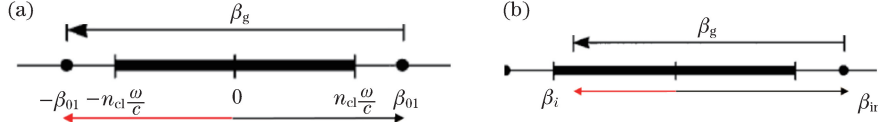


图 2 两种光栅模式耦合原理示意图。(a) 前向、后向传输纤芯模的耦合;(b) 前向传输纤芯模与后向传输辐射模的耦合
Fig. 2 Schematic of coupling principle of two grating modes. (a) Coupling of forward and backward transmission fiber core modes; (b) coupling of forward transmission core mode and backward transmission radiation mode

类似于 Bragg 光纤光栅的谐振条件,对于普通 Bragg 光纤光栅,满足 Bragg 衍射条件的谐振波长可以表示为

$$\lambda_{\text{Bragg}} = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} + n_{\text{eff}}^{\text{co}})\Lambda, \quad (2)$$

式中 $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 是纤芯模的有效折射率。对于倾斜光纤光栅,其 Bragg 谐振波长表达式为

$$\lambda_{\text{Bragg}} = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} + n_{\text{eff}}^{\text{co}})\Lambda_g / \cos \theta. \quad (3)$$

由于倾角的存在,会有部分前向传输的纤芯模耦合到反向传输的包层模中,谐振波长可表示为^[24]

$$\lambda_{\text{cl},i} = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} + n_{\text{eff},i}^{\text{cl}})\Lambda_g / \cos \theta, \quad (4)$$

式中 $n_{\text{eff},i}^{\text{cl}}$ 是第 i 阶包层模的有效折射率。随着倾斜角度的增大,Bragg 谐振波长向长波方向移动,且谐振深度变浅,同时在短波方向有更多的高阶包层模谐振。

啁啾光纤光栅的周期是非均匀的,在不同位置对应不同波长光的反射。由于紧邻的谐振峰互相重叠,在光谱中就出现一个展宽的谐振峰。将啁啾光栅与倾斜光栅相结合,可以利用啁啾光栅的光谱展宽能力将倾斜光栅一系列分立的梳状谐振峰连接成宽带的谐振包络。

2.2 仿真研究

为了更好地了解啁啾倾斜光纤光栅的特性,以便设计满足实际需要的倾斜光栅,利用仿真软件 OptiGrating 重点仿真分析了倾斜角度、折射率调制深度、相位掩模板啁啾率对倾斜光栅透射谱的影响。以下所有仿真都是基于单模光纤 HI1060 进行的,相位掩模板中心周期均为 736.9 nm,对应的 Bragg 中心波长为 1070 nm。

图 3 是啁啾、非啁啾倾斜光纤光栅的仿真结果,制作倾斜角设为 4° ,相位掩模板的啁啾率取 2 nm/cm。红色分立谱线对应非啁啾倾斜光栅的透射谱,蓝色光滑谱线对应啁啾倾斜光栅的透射谱,黑色竖线代表所采用掩模板对应的 1070 nm 原始波长。可以看到,正如前面理论分析的结果,非啁啾倾斜光栅在短波方向出现了一系列的分立谐振峰,对应不同的包层模;加入啁啾量后,倾斜光栅的一系列分立谐振峰展宽后互相交叠为一个光滑的包络,表明将啁啾光栅与倾斜光栅相结合可以制成宽带带阻滤波器。

图 4 是不同倾斜角度下啁啾倾斜 Bragg 光纤光栅透射光谱的仿真结果,啁啾率取 2 nm/cm。可以看到,随着倾斜角度的增大,出现更多的高阶包层模谐振,光谱上表现为谐振包络整体向短波方向移动,且带宽随之增大,透射谱的深度变浅,这与第 2.1 节的理论分析相吻合。针对不同角度的仿真结果,对如何选择带宽与拉曼光谱宽度相对应的啁啾倾斜光栅的制作参数有一定指导意义。

图 5 为折射率调制深度对啁啾倾斜 Bragg 光纤光栅透射光谱的影响,啁啾率设为 2 nm/cm,制作倾斜角度取 4° ,4 条曲线从上到下调制深度 Δn 分别为 0.0008、0.0010、0.0015、0.0020。可以看出, Δn 直接决定了透射峰的深度,是滤除拉曼散射光的重要指标, Δn 越强,透射峰深度越深,意味着对拉曼信号的滤除效果越好。光栅可以达到的最大调制深度主要取决于光纤的光敏量(包括光纤本身的光敏性、载氢情况),因此可以根据实际需要达到的滤除效果选择合适的载氢光纤。

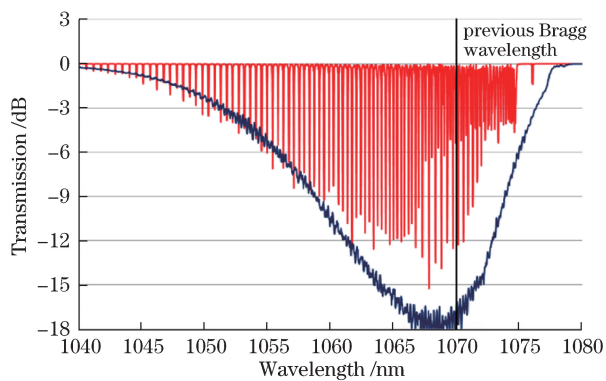


图 3 倾斜角为 4°的啁啾、非啁啾倾斜光纤光栅透射光谱

Fig. 3 Transmission spectra of chirped and non-chirped tilted fiber grating with tilting angle of 4°

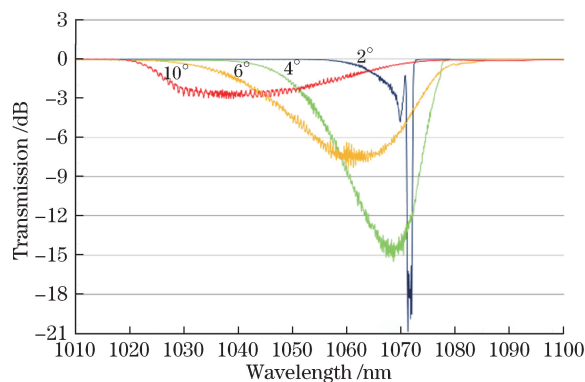


图 4 不同倾斜角度下啁啾倾斜 Bragg 光纤光栅透射光谱

Fig. 4 Transmission spectra of CTFBG with different tilting angles

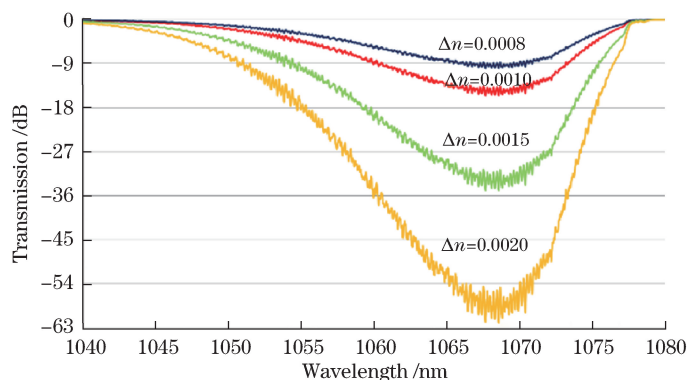


图 5 不同调制深度下啁啾倾斜 Bragg 光纤光栅的透射光谱

Fig. 5 Transmission spectra of CTFBG with different modulation depths

对采用啁啾率分别为 0.4、2、10、20 nm/cm 的啁啾相位掩模板制备出的 CTFBG 的透射光谱进行仿真，制作倾斜角度设为 4°， Δn 均为 0.001，结果如图 6 所示。可以看出，啁啾率越大光谱展宽的范围越大，与理论分析一致。在啁啾光栅中不同位置作用于不同波长，在相同光栅长度的情况下，越大的啁啾率就需要越大的 Δn 以达到相同的透射谐振深度。

由以上仿真结果可知，通过增大倾斜角度或增加相位掩模板的啁啾率可以获得宽带滤波光谱。但是，过大的倾斜角度或啁啾率都会使光栅刻写难度增加，要根据特定波段的拉曼光谱合理选择倾斜角度和相位掩模板的啁啾率，以达到最佳的拉曼信号滤除效果。

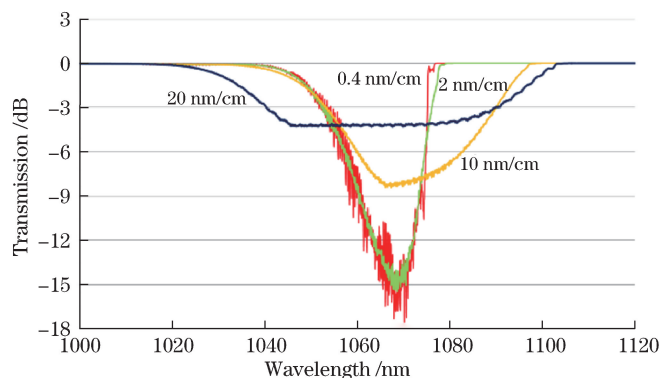


图 6 不同啁啾率的啁啾倾斜 Bragg 光纤光栅透射谱

Fig. 6 Transmission spectra of CTFBG with different chirping rates

3 制作与测试

3.1 制作系统与方法

相位掩模板法具有工艺简单、参数改变灵活等特点,是目前被广泛采用的 Bragg 光纤光栅制备方法,其刻写系统构成如图 7(a)所示。准分子激光器采用 Coherent 公司生产的 COMPexPro110,使用 KrF 气体,输出 248 nm 紫外激光,最高重复频率为 100 Hz,最高输出脉冲能量为 400 mJ,最大平均功率达 30 W。在制作过程中,其输出的紫外激光经 2 片 248 nm 高反射率平面镜反射后通过一个二维可调的狭缝,选择中间光强分布最均匀的小矩形区域,通过由 2 片柱面镜构成的扩束系统进行扩束,扩束光束经过一个柱透镜聚焦在啁啾相位掩模板上发生衍射,±1 级衍射光在紧邻的光纤上形成干涉条纹,在纤芯中实现周期性折射率调制完成光栅的刻写。用于切趾和补偿的振幅掩模板位于扩束系统和聚焦柱面镜之间,安装在一个垂直放置的一维电控线性平移台上,刻写过程中通过自上到下的扫描完成切趾和补偿。

采用倾斜相位掩模板的方式制作啁啾倾斜光栅,如图 7(b)所示,相位掩模板平面与紫外入射光保持垂直,光纤与相位掩模板平面平行,距离约 10 μm,其轴向旋转一定角度 θ,纤芯中的光栅平面倾角可表示为^[7]

$$\theta_T = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{1}{n_{uv} \tan \theta}\right), \quad (5)$$

式中 n_{uv} 是纤芯对 248 nm 激光波长的折射率,对于石英光纤, n_{uv} 约为 1.452。由(5)式可知,在小角度情况下 θ_T 约为 θ 的 1.5 倍。

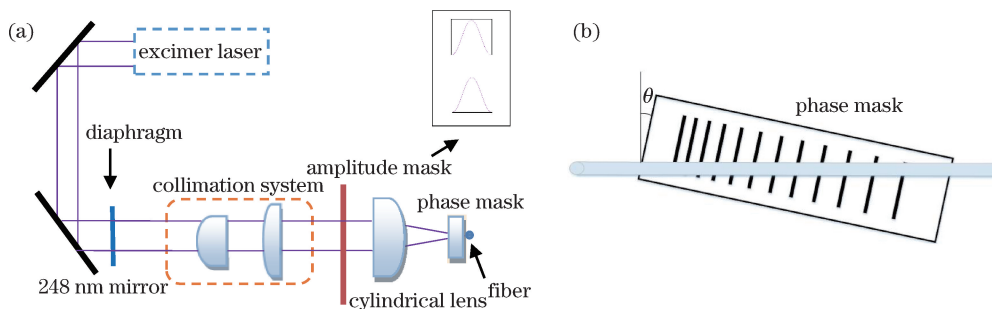


图 7 (a) 相位掩模板法刻写系统示意图;(b) 倾斜相位掩模板刻写光纤光栅平面示意图

Fig. 7 (a) Schematic of writing system with phase mask method; (b) plane schematic of writing fiber grating by tilting phase template

3.2 测试结果与分析

在光栅刻写中,准分子激光器工作频率设为 30 Hz,单脉冲能量为 100 mJ,采用在线测试的方式,即在刻写的过程中实时观测光栅的透射谱和反射谱,测试系统如图 8 所示。其中测试光源为 1 μm 波段放大自发辐射(ASE)光纤光源,通过环形器与光纤光谱仪(OSA)连接,所有光纤均为 HI1060,包括用于刻写光栅的载氢光纤。

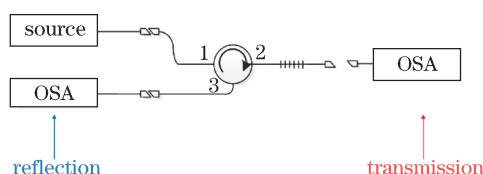


图 8 光栅透射谱、反射谱在线监测系统示意图

Fig. 8 Schematic of grating transmission and reflection spectra on line monitoring system

图 9 为制备的啁啾光栅、倾斜光栅(制作倾斜角度为 4°),以及结合两者获得的宽带啁啾倾斜光栅的光谱图。其中蓝色粗谱线对应右侧反射谱坐标,红色细谱线对应左侧透射谱坐标。图 9(a)、(c)对应的是中心波长为 1064 nm、啁啾率为 0.4 nm/cm 的啁啾相位掩模板,图 9(b)对应的是中心波长为 1064 nm 的非啁啾相位掩模板。对比图 9(a)、(b)、(c)可以看出,将啁啾光栅和倾斜光栅结合起来可以获得宽带滤波器,与前面的理论分析和仿真结果一致。

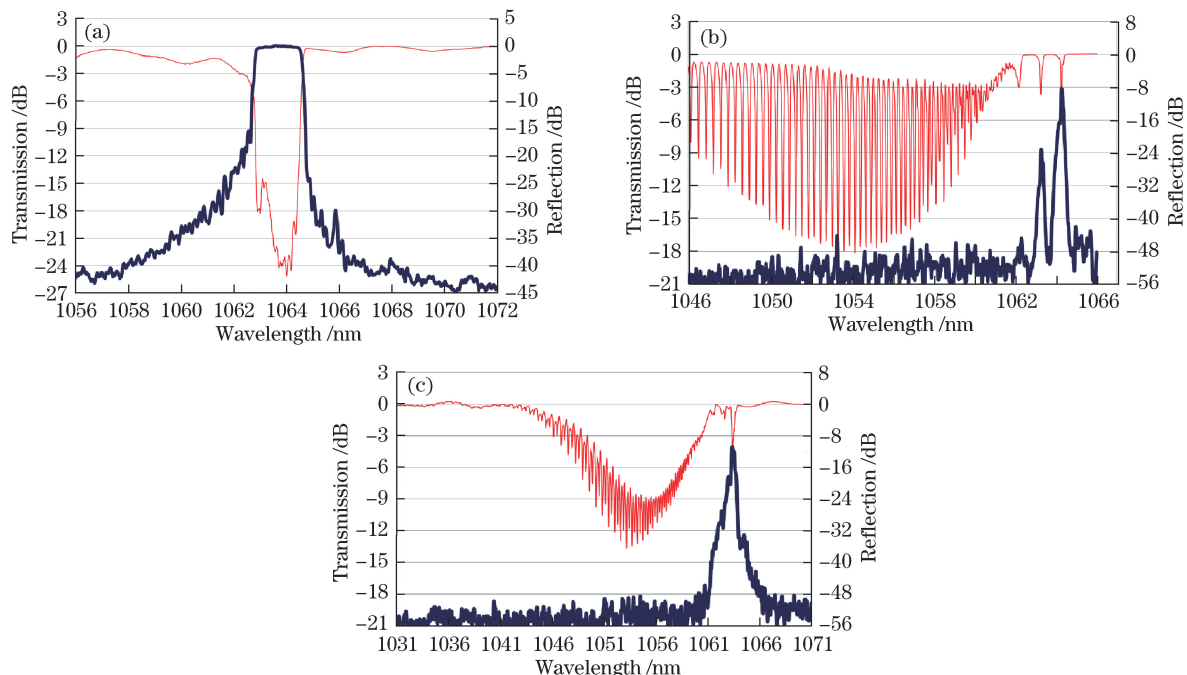


图 9 (a) 啁啾率为 0.4 nm/cm 的啁啾光栅的光谱;(b) 制作倾斜角度为 4° 的倾斜光栅的光谱;
(c) 啁啾率为 0.4 nm/cm、制作倾斜角为 4° 的啁啾倾斜光栅的光谱

Fig. 9 (a) Chirped grating spectra with a chirp rate of 0.4 nm/cm ; (b) tilted grating spectra with tilting angle of 4° ;
(c) chirped and tilted grating spectra with a chirp rate of 0.4 nm/cm and tilting angle of 4°

利用啁啾率为 2 nm/cm 的相位掩模板,在不同倾斜角度下刻写了啁啾倾斜光栅,其透射谱的变化趋势如图 10 所示。可以看出随着角度的增加越来越多的高阶包层模谐振出现,表现为谐振包络向短波方向移动,与理论分析和仿真结果一致。根据后面验证实验的需求(滤除 1018 nm 光纤激光对应的 1066 nm 拉曼信号),结合理论与仿真部分的分析,选择啁啾率为 0.4 nm/cm、中心波长为 1070 nm 的啁啾相位掩模板,采取相位掩模板倾斜角度 $\theta=4^\circ$ 的方案制备了拉曼滤除器。

4 滤除 Raman 信号实验结果与分析

4.1 实验系统

为验证啁啾倾斜光栅对光纤激光中拉曼散射光的滤除效果,搭建了如图 11 所示的实验系统。掺镱光纤(YDF)激光振荡器输出波长为 1018 nm,采用 5 个 50 W 的 976 nm LD 作为抽运源,大模场双包层光纤(NUFREN 公司生产的 LMA-GDF-15/130-M 光纤,纤芯直径 15 μm ,包层直径 130 μm)为增益介质。为降

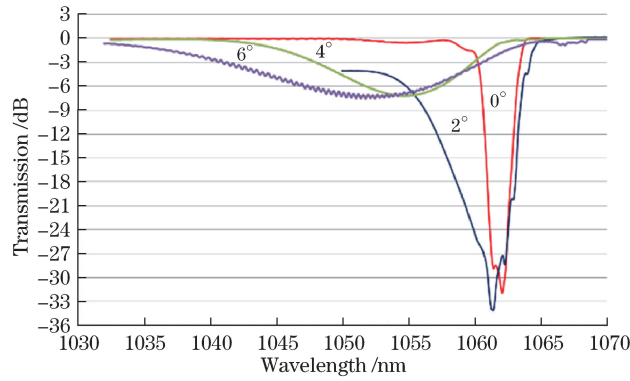


图 10 不同倾斜角度下啁啾倾斜 Bragg 光纤光栅的透射谱

Fig. 10 Transmission spectra of CTFBG with different tilting angles

低受激拉曼散射的阈值,后续连接了长度为 950 m 的 HI1060 单模光纤,在 1060 nm 损耗为 0.8 dB/km。由于 2 种光纤模场失配较为严重,为降低插入损耗制作了模场匹配器(MFA)。在 2 种光纤熔接过程中,将熔接机的电极偏向细光纤一侧,并将放电时间延长至 30 s,通过加热扩芯的方式来实现模场匹配。由铽离子的吸收与发射光谱可知,1030 nm 与 1018 nm 竞争时更具优势,激光振荡器后复杂系统中少量 1030 nm 的瑞利散射会引起很强的自激现象。因此,在激光振荡器输出端熔接了一个带通滤波器(BPF)将 1030 nm 的光滤除,以保证 1018 nm 输出。

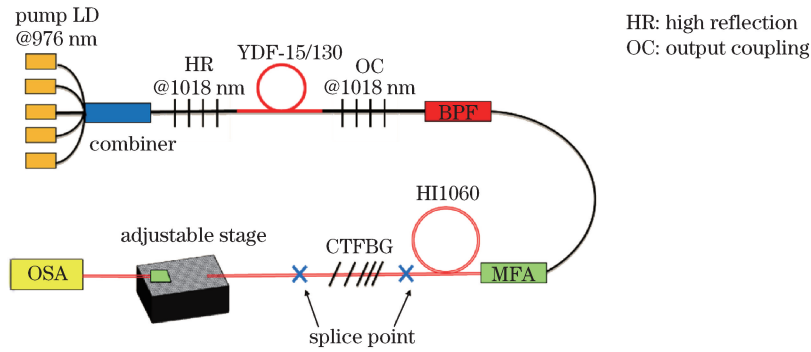


图 11 滤除拉曼光实验装置示意图

Fig. 11 Schematic of experimental setup for filtering Raman light

为保护光谱仪,将其跳线一端与系统出射端空间对准,采集部分散射光进行测量。1018 nm 掺铽光纤激光器易受端面反射光的影响,所以出射光纤端面切 8°斜角。为保证测量的准确性,空间对准部分在插入 CTFBG 前后固定于三维调节台上保持不变。测试未插入 CTFBG 时系统产生拉曼散射光的光谱,插入 CTFBG 后再测量,验证 SRS 的抑制效果并与光栅制作时的参数进行对比。

4.2 实验结果与分析

假设拉曼增益谱为洛伦兹型,则临界抽运功率 P_0^{cr} 的一个较好的近似可以表示为^[25]

$$\frac{g_R P_0^{cr} L_{eff}}{A_{eff}} \approx 16, \quad (6)$$

式中最大拉曼增益系数 g_R 取 1.55×10^{-13} m/W,光纤有效长度 L_{eff} 为 1000 m,有效模场面积 A_{eff} 取单模光纤典型值 $10 \mu\text{m}^2$,计算得出 $P_0^{cr} \approx 1.03$ W。实际上,受限于激光器的时序特性,出射激光中存在自脉冲现象,这将大大降低系统的拉曼阈值。

图 12(a)、(b)分别是激光器输出功率为 361 mW、1 W 时,接入 CTFBG 前后测得的透射谱,其中蓝色细线对应插入 CTFBG 后的光谱,红色粗线对应插入 CTFBG 前的光谱。可以看出在没有插入 CTFBG 时,除了 1018 nm 处的信号光,在 1066 nm 附近有一带宽约 20 nm 的受激拉曼散射峰。接入制备好的 CTFBG 后,在完全不改变三维调节台的情况下测量此时的透射光谱,对比 CTFBG 接入前后的光谱可以发现,CTFBG 对信号光的插入损耗很小,约为 1 dB,对拉曼信号在整个拉曼带宽范围内都有很强的滤除效果。对

比图12(a)、(b)可知,随着激光器功率的增加,拉曼散射光的功率也随之增加,CTFBG的抑制作用很明显。利用图12(a)中插入CTFBG前后的数据可以计算得出CTFBG的实际透射光谱,如图12(d)所示,其光谱曲线与图12(c)所示的制备时用ASE宽带光源测量得到的光栅透射光谱吻合得较好。由图12(d)可见,CTFBG对1级受激拉曼散射信号峰值的抑制接近20 dB。

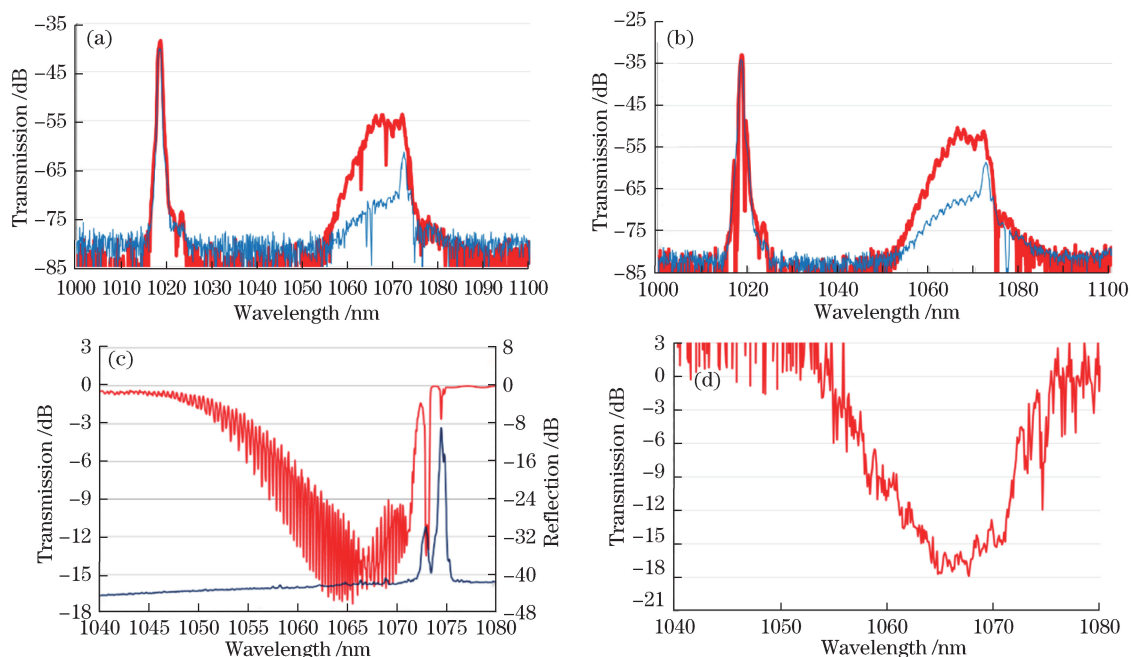


图12 (a) 功率为361 mW时插入CTFBG前后的光谱对比;(b) 功率为1 W时插入CTFBG前后的光谱对比;
(c) 制备时测得的光栅透射谱;(d) 实验测得的光栅透射谱

Fig. 12 (a) Comparison of spectra before and after inserting CTFBG when the power is 361 mW;
(b) comparison of spectra before and after inserting CTFBG when the power is 1 W;
(c) grating transmission spectra measured in the process of preparation;
(d) grating transmission spectra measured by experiment

对于更高功率的激光器,可以通过多个CTFBG串联的方式来增强抑制效果。若滤除高阶拉曼散射光,可以制作不同波段的CTFBG。

5 结 论

分析了CTFBG抑制光纤激光SRS的基本原理,为了验证滤除拉曼信号的实际效果,制作了针对1018 nm光纤激光SRS信号1066 nm的CTFBG,设计并搭建了实验系统,测量了插入CTFBG前后系统的输出光谱。实验结果表明,设计制作的CTFBG对1级SRS信号的抑制接近20 dB,取得了非常好的效果。对于更高功率的激光器,可以采用多个CTFBG串联的方式来增强抑制效果。针对不同波长的激光器产生的拉曼散射光可以设计不同波段的CTFBG。研究结果对利用CTFBG抑制大功率光纤激光振荡器和放大器中的SRS,进一步提高光纤激光的效率和输出功率具有重要意义。

6 致 谢

感谢加拿大瑞尔森大学顾锡嘉教授在制作啁啾倾斜Bragg光纤光栅方面给予的指导。

参 考 文 献

- [1] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, *et al.* Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection fiber fabrication[J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(10): 647-649.
- [2] Meltz G, Morey W W, Glenn W H. In-fibre Bragg grating tap[C]. Optical Fiber Communication Conference, San

- Francisco, 1990, TUG: TUG1.
- [3] Kashyap R, Wyatt R, Campbell R J. Wideband gain flattened erbium fiber amplifier using a photosensitive fiber blazed grating[J]. Electronics Letters, 1993, 29(2): 154-156.
- [4] Kashyap R, Wyatt R, Mckee P F. Wavelength flattened saturated erbium amplifier using multiple side-tip Bragg gratings[J]. Electronics Letters, 1993, 29(11): 1025-1026.
- [5] Kerrinckx E, Hidayat A, Niay P. Suppression of discrete cladding mode resonances in fiber slanted Bragg gratings for gain equalisation[J]. Optics Express, 2006, 14(4): 1388-1394.
- [6] Haggans C W, Singh H, Varner W F, *et al.* Narrow-band rejection filters with negligible back reflection using tilted photoinduced gratings in single-mode fibers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(5): 690-692.
- [7] Mihailov S J, Walker R B, Lu P, *et al.* UV-induced polarisation-dependent loss in tilted fiber Bragg gratings: Application of a PDL equaliser[J]. IEE Proceedings-Optoelectronics, 2002, 149(56): 211-216.
- [8] Zhou K, Chen X, Simpson A G, *et al.* High extinction ratio in-fiber polarizer based on 45° tilted fiber Bragg gratings [J]. Optics Letters, 2005, 30(11): 1285-1287.
- [9] Chen C, Caucheteur C, Mégret P, *et al.* The sensitivity characteristics of tilted fiber Bragg grating sensors with different cladding thickness[J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18(10): 3117-3122.
- [10] Baek S, Jeong Y, Lee B. Characteristics of short-period blazed fibre Bragg gratings for use as macro-bending sensors [J]. Applied Optics, 2002, 41(4): 631-636.
- [11] Caucheteur C, Chah K, Lhommé F, *et al.* Simultaneous bend and temperature sensor using tilted FBG[C]. SPIE, 2005, 5855: 707-710.
- [12] Maguis S, Laffont G, Ferdinand P, *et al.* Biofunctionalized tilted fiber Bragg gratings for label-free immunosensing[J]. Optics Express, 2008, 16(23): 19049-19062.
- [13] Yanina Y, Shevchenko Y, Albert J. Plasmon resonances in gold-coated tilted fiber Bragg gratings[J]. Optics Letters, 2007, 32(3): 211-213.
- [14] Yang D X, Du L, Xu Z Q, *et al.* Magnetic field sensing based on tilted fiber Bragg grating coated with nanoparticle magnetic fluid[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(6): 061903.
- [15] Liu F, Guo T, Wu C, *et al.* Wideband-adjustable reflection-suppressed rejection filters using chirped and tilted fiber gratings[J]. Optics Express, 2014, 22(20): 24430-24438.
- [16] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: Current status and future perspectives[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.
- [17] Nilsson J, Payne D N. High-power fiber lasers[J]. Science, 2011, 332(6032): 921-922.
- [18] Shiner B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market[C]. Proceedings of CLEO, 2013, AF2J: AF2J.1.
- [19] Wang Wenliang. Stimulated Raman scattering in high power fiber lasers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
王文亮. 大功率光纤激光器受激拉曼散射研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- [20] Wang Y, Xu C Q, Hong P. Analysis of Raman and thermal effects in kilowatt fiber lasers[J]. Optics Communications, 2004, 242(4): 487-502.
- [21] Fini J M, Mermelstein M D, Yan M F, *et al.* Distributed suppression of stimulated Raman scattering in an Yb-doped filter-fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2006, 31(17): 2550-2552.
- [22] Nodop D, Jauregui C, Jansen F, *et al.* Suppression of stimulated Raman scattering employing long period gratings in double-clad fiber amplifiers[J]. Optics Letters, 2010, 35(17): 2982-2984.
- [23] Albert J, Shao L Y, Caucheteur C. Tilted fiber Bragg grating sensors[J]. Laser and Photonics Review, 2013, 7(1): 83-108.
- [24] Erdogan T. Cladding-mode resonances in short and long period fiber grating filters[J]. Journal of Optical Society of America A, 1997, 14(8): 1760-1773.
- [25] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics[M]. New York: Academic Press, 1995: 195-211.