

# 随机分布反馈光纤激光器研究进展

胡朋兵 董新永

(中国计量学院光电子技术研究所, 浙江 杭州 310018)

**摘要** 随机分布反馈光纤激光器(RDFFL)是近几年才发展起来的一种新型光纤激光器。它在结构上区别于传统激光器,即无反射镜,激光的反馈通过光纤中随机分布的背向瑞利散射效应实现,因此是一种随机激光器。RDFFL通过光纤中的分布式拉曼散射效应获得增益,可实现稳定的、空间不相干的连续激光输出,被认为是一种重要的新光源,可用于非线性光学、光通信和传感等领域。对 RDFFL 的研究进展进行了综述,阐明了其工作原理,从理论上分析了其工作特性,并分析了其应用与发展前景。

**关键词** 光纤激光器;随机激光器;瑞利散射;拉曼散射

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.110606

## Research Progress in Random Distributed Feedback Fiber Lasers

Hu Pengbing Dong Xinyong

(Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

**Abstract** Random distributed feedback fiber laser (RDFFL) has been developed as a new type of fiber laser in recent years. RDFFL belongs to random lasers since the feedback of laser light depends on the random distributed fiber Rayleigh scattering, rather than reflection mirrors. It achieving gain through distributed fiber Raman scattering, is regarded as a new light source with stable, incoherent continuous-wave (CW) output, with potential applications in nonlinear optics, optical communications and sensing areas. The working principle, research progress and applications of RDFFL are introduced.

**Key words** fiber laser; random laser; Rayleigh scattering; Raman scattering

**OCIS codes** 060.0060, 060.3510, 060.4370

## 1 引言

众所周知,激光产生的三个条件为工作物质、光学谐振腔和抽运激励源,当光在谐振腔中往返一次的总增益能够补偿总损耗时,就可以产生激光输出。随机激光器是利用随机增益介质中光的多次散射产生非相干叠加而形成的新型无腔激光器,当光散射的平均自由程足够小时,光子将连续发生多次散射形成安德森局域化现象,产生类似于谐振腔的闭合环形腔,提高了光放大的有效路径,从而形成随机激光输出<sup>[1,2]</sup>。由于随机激光器结构紧凑、体积小且制作简单,近年来人们对它的研究越来越多。但是,由于闭合环形腔在介质中是随机分布的,所以其受激辐射具有各纵模的不确定性,即复杂辐射特性、辐射角度依赖性<sup>[3,4]</sup>,因而在某些检测领域应用时必须改进其光谱特性,才能挑战传统激光器的优异性能。

利用低维随机系统结构(如光纤)可以改善随机激光器的上述不足。2007年,de Matos等<sup>[5]</sup>报道了第一台光纤随机激光器,通过在光子带隙光纤的纤芯中填充 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒,并利用掺钕钇铝石榴石激光器侧面抽运光子带隙光纤,成功地实现了一维随机激光输出,在一定程度上确保了激光光束的方向性。但该方法技

**收稿日期**: 2011-06-03; **收到修改稿日期**: 2011-08-06; **网络出版日期**: 2011-09-30

**基金项目**: 国家 973 计划(2010CB327800)、国家自然科学基金(60807021)和浙江省自然科学基金(R1080087)资助课题。

**作者简介**: 胡朋兵(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: hupengbing@hotmail.com

**导师简介**: 董新永(1975—),男,博士,研究员,主要从事光纤激光器、光纤光栅和光纤通信等方面的研究。

E-mail: xydong@cjlu.edu.cn(通信联系人)

(本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 <http://www.opticsjournal.net>)

术难度大,不容易实现。

2009年,英国阿斯顿大学的 Turitsyn 等<sup>[6]</sup>研究了光纤长度达 270 km 的超长光纤拉曼激光器,通过实验和理论分析了光纤中分布式瑞利散射效应对激光纵模结构的影响,发现在光纤长度超过 270 km 时,由于光纤中的背向瑞利散射效应,激光器中的腔镜(光纤光栅)将失去反馈作用。随后,El-Taher 等<sup>[7]</sup>在两个波长不同的光纤光栅的帮助下,在对称抽运的 200 km 光纤中实现了双波长窄线宽激光输出,实验证实了利用背向瑞利散射效应构成分布式激光谐振腔的可行性。2010年4月,Turitsyn 等<sup>[8]</sup>报道了完全利用光纤中的分布式瑞利散射效应作为反馈机制的光纤拉曼激光器,并阐明了其基本工作原理,首次将这种激光器命名为随机分布反馈光纤激光器(RDFFL)。

RDFFL 无需腔镜,结构简单,能提供稳定的、空间不相干的连续激光输出。2010年第4期的 *Nature Photonics* 刊发评论,称其为一种重要的新光源,将在非线性光学、光通信和传感等领域获得应用<sup>[9]</sup>。目前,RDFFL 的研究已经吸引了国外多家研究机构的兴趣,取得了许多重要研究进展<sup>[7~12]</sup>,但国内尚未见相关报道。本文基于 RDFFL 的研究现状,着重分析和介绍其工作原理、研究方案、工作特性、应用及发展前景。

## 2 RDFFL 的工作原理

RDFFL 的实现是基于光纤中光的分布式瑞利散射和拉曼散射效应。光在经过透明玻璃介质时,由于介质材料固有的不均匀性,将会产生背向瑞利散射。在标准单模光纤(SMF)中,1550 nm 对应的通信窗口的瑞利散射系数约为 0.2 dB/km (或  $0.045 \text{ km}^{-1}$ )<sup>[13]</sup>,只有其中的背向瑞利散射可以用作光的反馈,其他方向的瑞利散射因进入包层而损耗。虽然背向瑞利散射系数非常小,约为  $2 \times 10^{-3} \text{ dB/km}$ <sup>[13]</sup>,但当采用超长距离光纤且光纤中存在分布式拉曼抽运光时,这些微弱的散射光在传输过程中就会得到持续不断的放大,其增益可以大到足够抵消光纤的损耗。

RDFFL 的典型结构如图 1 所示,由抽运激光器、波分复用(WDM)耦合器和较长的光纤构成。抽运激光从光纤的中点位置( $z=0$ 处)通过 WDM 耦合器注入到光纤中,但需要等强度地分成两束沿相反方向入射,以便在两侧的光纤中产生等强度的拉曼散射光并为背向散射光提供相同的拉曼增益。抽运光在光纤中激励产生的背向斯托克斯光及前向斯托克斯光的背向瑞利散射部分在光纤中传输时,得到分布式受激拉曼散射效应的持续放大,在空间上形成了随机的光学反馈。当抽运光功率及光纤长度满足一定条件时,散射光的增益克服损耗并形成自激振荡。当进一步增加抽运功率时,输出光谱线宽变窄,功率趋于稳定并随抽运光功率线性增长。其输出特性与激光器相同,而光的反馈是沿光纤长度随机分布的(类似于随机激光器),所以被称为 RDFFL。

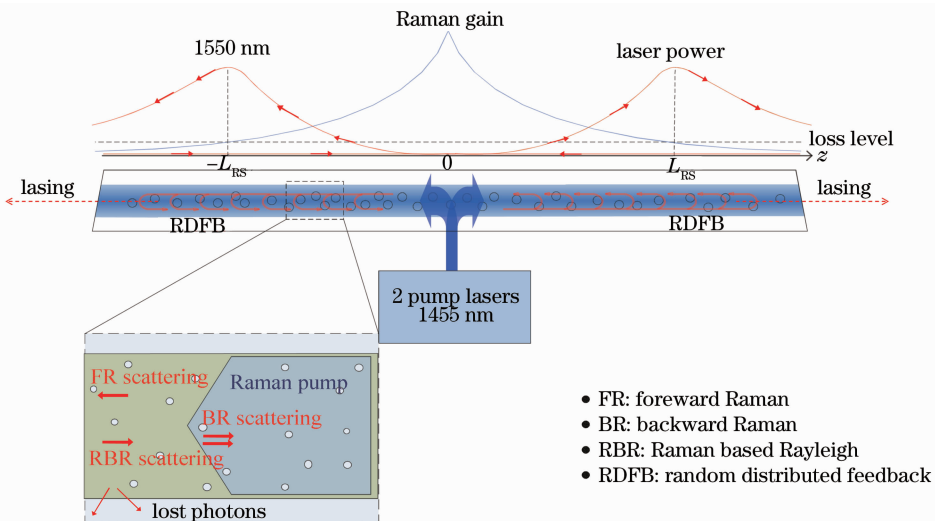


图 1 RDFFL 工作原理

Fig. 1 Operation principle of RDFFL

因为瑞利散射效应的效率很低,光纤的长度与拉曼抽运光的功率都需要达到一定的阈值,才能使反馈光的拉曼增益大于光纤损耗以产生激光输出<sup>[8]</sup>。如果采用 1455 nm 的激光为拉曼抽运光(对应拉曼增益峰在 1550 nm),通过以下的简单理论模型可粗略分析计算出典型 RDFFL 的光纤长度阈值、抽运阈值及斯托克斯光功率分布。

忽略抽运光由于产生斯托克斯光造成的消耗,则沿光纤轴向分布的拉曼增益可以简单地表述为  $g_R P_p(z)$ ,其中  $g_R \approx 0.39 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$  为 1550 nm 处光纤的拉曼增益系数; $P_p(z)$  为轴向分布的抽运光功率,它的变化规律为  $P_p(z) = P_0 \exp(-\alpha_p |z|)$ , $P_0$  为初始抽运光功率, $\alpha_p \approx 0.057 \text{ km}^{-1}$  为 1455 nm 处的损耗系数。根据增益损耗平衡条件

$$g_R P_p(L_{RS}) = \alpha, \quad (1)$$

式中  $\alpha = 0.2 \text{ dB/km}$  为斯托克斯光的损耗系数,在  $P_0 = 1 \text{ W}$  的情况下,可得  $L_{RS} = \ln(g_R P_0 / \alpha) / \alpha_p \approx 35 \text{ km}$ ,从而当  $L \geq 2L_{RS} \approx 70 \text{ km}$  时,激光器将由于背向瑞利散射而产生激光输出。

由于抽运光的拉曼增益效应,抽运光在光纤中传输时将产生拉曼斯托克斯光功率  $P_s^\pm(z)$ ,在仅考虑背向瑞利散射损耗的条件下,其功率传输方程为

$$\frac{dP_s^\pm}{dz} = \mp \alpha P_s^\pm \pm g_R (P_p^+ + P_p^-) P_s^\pm \pm \epsilon P_s^\mp, \quad (2)$$

式中  $\epsilon = 4.5 \times 10^{-5} \text{ km}^{-1}$  为光纤的背向瑞利散射系数。

斯托克斯光在光纤中传输时受到分布式拉曼放大、背向瑞利散射及损耗的调制,其积分增益损耗平衡方程可以表示为

$$\epsilon \int_0^{L/2} dz \exp[-2\alpha z + 2g_R \int_0^z P_p(s) ds] = 1, \quad (3)$$

通过鞍点逼近可以得到光纤长度  $L \gg L_{RS}$  时激光抽运阈值的解析解为

$$P_0 = \frac{\alpha}{g_R} \left[ 1 + \ln \left( \frac{g_R P_{th}}{\alpha} \right) \right] + \frac{\alpha_p}{2g_R} \ln \left( \frac{1}{\epsilon} \sqrt{\frac{\alpha \alpha_p}{\pi}} \right) \approx 0.8 \text{ (W)}. \quad (4)$$

由此可知,总的抽运阈值功率为  $2P_0 \approx 1.6 \text{ W}$ 。

### 3 RDFFL 的基本工作特性

RDFFL 的基本工作特性与普通激光器类似。在抽运功率低于阈值的情况下,输出光谱呈现出放大自发辐射拉曼增益光谱特性。在 1455 nm 抽运光作用下,放大自发辐射拉曼增益谱在 1557 和 1567 nm 两个波长处出现波峰,形状与拉曼增益曲线相似。在接近阈值功率的情况下,输出光谱十分不稳定,且出现较多随机毛刺,如图 2(a)所示<sup>[8]</sup>。该现象可能与光纤中出现高阶布里渊散射效应相关。随着抽运功率的增大,在 1557 和 1567 nm 处形成双波长激光输出,输出谱线变得平滑,线宽变窄,如图 2(b)所示<sup>[8]</sup>。

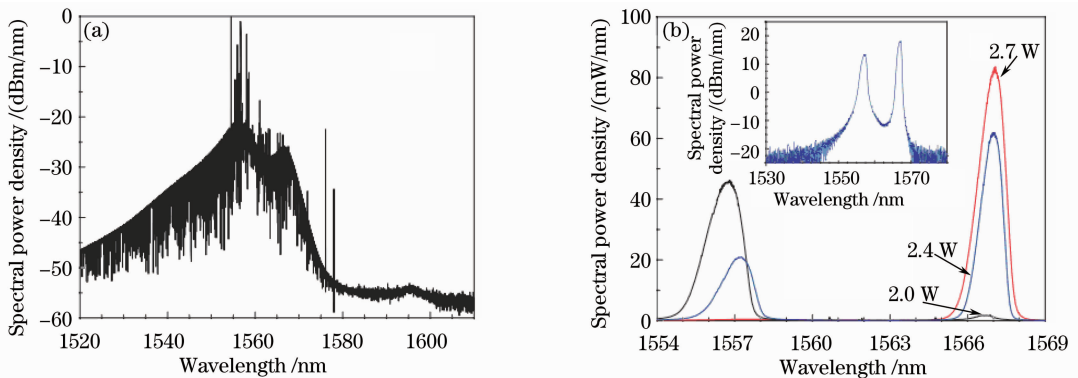


图 2 RDFFL 的输出光谱。(a)在阈值抽运功率附近时的非稳定激光光谱;(b)稳定的激光光谱(插图为 2.4 W 抽运功率时的对数坐标激光光谱)

Fig. 2 Output spectra of the RDFFL. (a) Unstable laser spectra near the lasing threshold; (b) stable laser spectra in the CW regime. Inset: log-scale output spectrum at 2.4 W pumping power

实验测得 RDFFL 输出功率与抽运功率的关系如图 3 所示<sup>[8]</sup>。激光抽运阈值功率为 1.6 W, 与理论分析结果吻合, 激光输出功率与抽运功率呈现较好的线性关系, 其斜率效率接近 15%。

## 4 不同类型的 RDFFL

随着国外多家研究机构对 RDFFL 的研究发展, RDFFL 的激光产生机理及相关特性的理论解释已经初步形成, 其间, RDFFL 也衍生出多种不同类型的结构, 大致可归类为双向分布反馈 RDFFL 及单向分布反馈 RDFFL。

### 4.1 双向分布反馈 RDFFL

双向分布反馈 RDFFL 是最基本的一类 RDFFL, 它完全依靠光纤的瑞利散射来形成谐振, 不借助光纤光栅或光反射镜, 在形式上是一种无腔镜的超长光纤拉曼激光器, 具有无纵模、非空间相干的双波长连续输出特性。

双向分布反馈 RDFFL 除前面介绍的中心双向抽运方式外, 还可以采用单向抽运。2010 年 9 月, Churkin 等<sup>[10]</sup>采用单向抽运的 1455 nm 激光和 41 km 长的 SMF, 成功地获得了双波长激光输出, 其实验装置如图 4 所示。光纤的端面采用倾斜角处理的目的是为了消除菲涅耳反射, 保证激光反馈仅由分布式瑞利散射提供。与 Turitsyn 等提出的中心双向抽运 RDFFL 相比, 该激光器具有相似的激光输出谱及阈值特性, 只不过抽运光的功率分布不同, 因此阈值功率略高。

### 4.2 单向分布反馈 RDFFL

单向分布反馈 RDFLL 采用单个反射镜[光纤布拉格光栅(FBG)]与分布式瑞利散射相结合构成谐振腔, 是一种不完全的 RDFFL。由于采用高反射率的 FBG 作为其中一个腔镜, 其对抽运功率阈值和光纤总长度的要求降低, 因此更容易实现激射。另外, 采用不同 FBG 可实现单波长、双波长、多波长及波长可调谐激光输出, 突破了拉曼增益峰值对激射波长和波长数的限制。

利用单个 FBG 作为反射镜即可得到单波长单向分布反馈 RDFFL, 其结构如图 5 所示<sup>[10]</sup>。Churkin 等通过实验及模拟发现此激光器的最优光纤长度应该约为 40 km。光纤越短, 激光器所需的抽运功率阈值越高, 在光纤长度超过 40 km 后, 阈值功率下降并趋于 0.8 W。采用 41 和 165 km 长的光纤时, 其输出激光光谱形状不变, 分别对应于黑色和黄色谱线, 如图 6 所示<sup>[10]</sup>。该现象与分布式背向瑞利散射光在光纤长度上

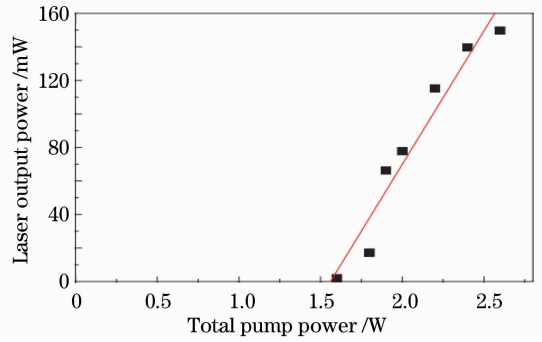


图 3 RDFFL 的输出功率与总抽运功率的关系  
Fig. 3 Output power of RDFFL as a function of total input pump power

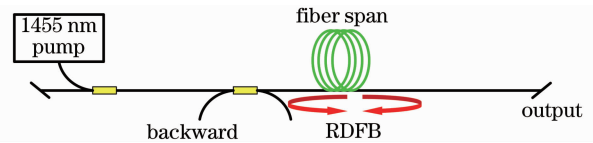


图 4 采用单向抽运方式的双向分布反馈 RDFFL  
Fig. 4 Bidirectional RDFFL with unidirectional pump

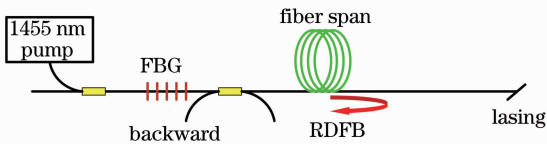


图 5 基于单个 FBG 的单波长单向分布反馈 RDFFL  
Fig. 5 Single-wavelength unidirectional RDFFL with a FBG

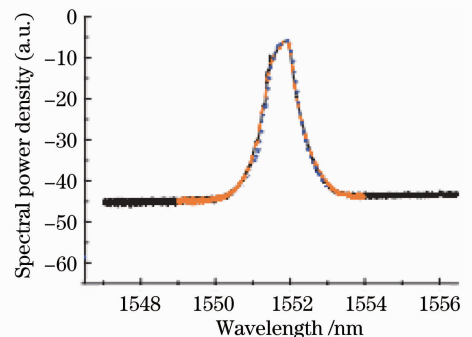


图 6 单波长单向分布反馈 RDFFL 的输出光谱  
(不同长度的光纤)  
Fig. 6 Output spectra of the single-wavelength unidirectional RDFFL (fibers of different lengths)

的集聚效应相关,当光纤长度超过 40 km 时,分布式背向瑞利散射效应趋向饱和状态。

利用两个或多个 FBG 作为反射镜即可得到双波长或多波长单向分布反馈 RDFFL。2010 年 4 月,南安斯顿大学的 El-Taher 等<sup>[7]</sup>将两个布拉格波长不同的 FBG 分别接到 200 km 长光纤的两端,在双向抽运的情况下实现了双波长窄线宽激光输出,其实验装置及激光输出谱分别如图 7,8 所示。两个 FBG 的中心波长相差 1 nm,因此它们之间不能构成光学谐振腔,而是分别与 200 km 长光纤中的分布式瑞利散射构成等效谐振腔,其工作机理与图 5 所示的单波长 RDFFL 相同。因此,该激光器实际上可以看作是两个独立的激光谐振腔的组合,实验观察到的激光光谱中两条谱线仅由对应的 FBG 调制这一特点也验证了此解释。

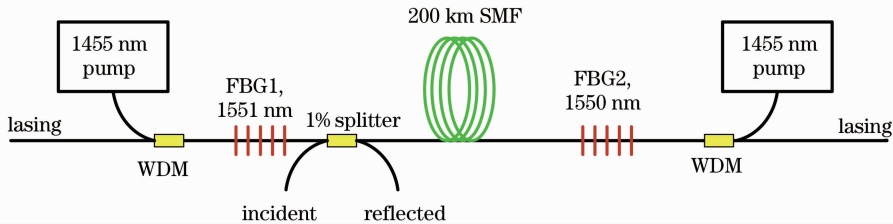


图 7 基于双 FBG 的双波长单向分布反馈 RDFFL

Fig. 7 Dual-wavelength unidirectional RDFFL with two FBG

2010 年 9 月,El-Taher 等<sup>[11,12]</sup>报道了采用多个不同波长 FBG 的多波长 RDFFL,其实验装置如图 9 所示<sup>[11]</sup>,采用了 22 个波长不同的 FBG、11 km 长的 SMF 和 10.5 km 长的真波光纤(TWF)。由于真波光纤的零色散波长在 1456 nm,其较高的非线性系数可以展宽 1455 nm 抽运光。当展宽的抽运光进入 SMF 中将激励起较平坦的拉曼增益谱线,有利于获得多波长激光输出,其激光输出谱如图 10 所示<sup>[12]</sup>。另外,RDFFL 是以无模式形式辐射的,不存在模式的竞争,激光功率仅由光纤的拉曼增益和 FBG 的反射率决定。因此,还可以通过优化 FBG 的反射率来提高多波长激光输出功率的一致性。

由此可见,通过改变 RDFFL 的具体结构,例如 FBG 的中心波长、FBG 的数量及抽运方式等,可以实现多种 RDFFL,满足不同应用场合的需求。

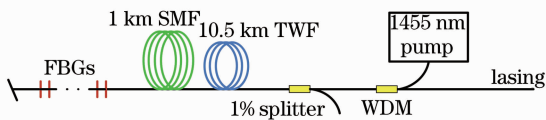


图 9 基于 FBG 阵列的多波长单向分布反馈 RDFFL

Fig. 9 Multi-wavelength unidirectional RDFFL with a FBG array

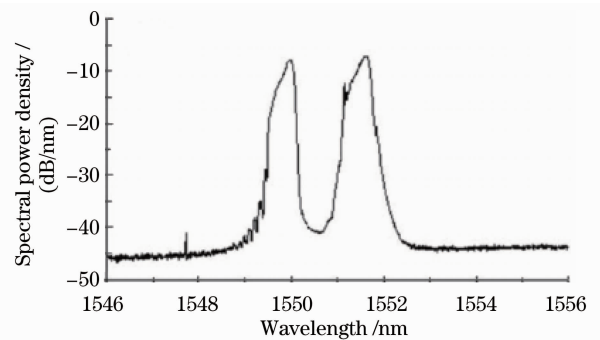


图 8 双波长单向分布反馈 RDFFL 的输出光谱

Fig. 8 Output spectrum of the dual-wavelength unidirectional RDFFL

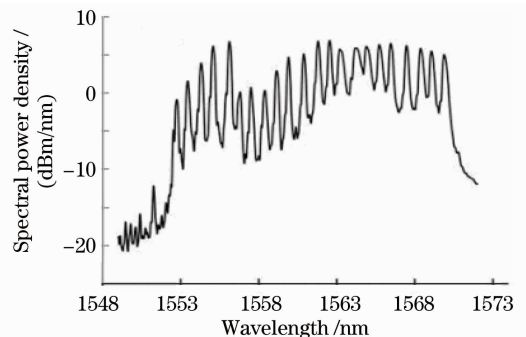


图 10 多波长单向分布反馈 RDFFL 的输出光谱,抽运功率为 3.5 W

Fig. 10 Output spectrum of the multi-wavelength unidirectional RDFFL with pump power of 3.5 W

## 5 RDFFL 的传感应用

由于单向分布反馈 RDFFL 中采用的 FBG 对应变和温度敏感,因此 RDFFL 可以用于光纤传感。2009 年 2 月,Frazão 等<sup>[14]</sup>利用多波长 RDFFL 中的 FBG 阵列成功地实现了远距离(10 km)的温度、应力同时测



量,实验装置如图 11 所示。实验采用 1 km 长的色散补偿光纤(DCF)作为增益介质,10 km 长的 SMF 作为传输介质。在 1 W 功率的 1450 nm 激光抽运下,获得了与 7 个 FBG 波长对应的多波长激光输出。因为每个激光波长的变化与对应的 FBG 所受到的应变或温度相关,所以可获得远程的温度与应变同时测量,其灵敏度与 FBG 传感器相同。

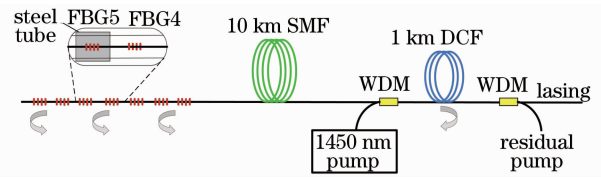


图 11 利用多波长 RDFFL 进行远距离光纤传感

Fig. 11 Remote sensing with multi-wavelength RDFFL

## 6 RDFFL 的发展前景

基于随机分布反馈原理的光纤激光器技术目前仍处于实验室研究阶段,但 RDFFL 的提出能够很好地实现远程光纤通信中信息的准无损传播,而且它在光纤传感及光纤激光领域也有着独特的应用,如波长可调谐光纤激光器、级联随机分布反馈激光器、多波长光纤激光器、远程温度与应变的同时测量、基于瑞利散射的相位敏感时域反射计等<sup>[8,11,15]</sup>。虽然 RDFFL 具有阈值功率高、转换效率低等固有缺点,但它能提高空间不相干的、无模式竞争的连续激光输出,在非线性光学、光通信和传感等领域有着潜在的应用。同时,RDFFL 的建立为量子光学、非线性光学、激光原理及混沌理论等众多交叉学科提供了一个十分理想的理论研究模型,具有十分重要的意义。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Lei, Lou Qihong, Wang Zhijiang *et al.*. Recent investigation on random laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(5): 2~7  
陈 雷, 楼祺洪, 王之江 等. 随机激光的发展现状 [J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(5): 2~7
- 2 Wang Hong, Liu Jinsong. Recent investigation on random lasers in theories and achievements [J]. *Physics*, 2005, **32**(4): 235~241  
王 宏, 刘劲松. 随机激光器的理论与研究现状 [J]. *物理*, 2003, **32**(4): 235~241
- 3 H. Cao. Review on latest developments in random lasers with coherent feedback [J]. *J. Phys. A*, 2005, **38**(49): 10497
- 4 D. S. Wiersma. The physics and applications of random lasers [J]. *Nature Phys.*, 2008, **4**(5): 359~367
- 5 C. J. S. de Matos, L. de S. Menezes, A. M. Brito-Silva *et al.*. Random fiber laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **99**(15): 153903
- 6 S. K. Turitsyn, J. D. Ania-Castañón, S. A. Babin *et al.*. 270 km ultralong Raman fiber laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **103**(13): 133901
- 7 A. E. El-Taher, M. Alcon-Camas, S. A. Babin *et al.*. Dual-wavelength, ultralong Raman laser with Rayleigh-scattering feedback [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(7): 1100~1102
- 8 S. K. Turitsyn, S. A. Babin, A. E. El-Taher *et al.*. Random distributed feedback fibre laser [J]. *Nature Photon.*, 2010, **4**(4): 231~235
- 9 A. A. Fotiadi. An incoherent fibre laser [J]. *Nature Photon.*, 2010, **4**(4): 204~205
- 10 D. V. Churkin, S. A. Babin, A. E. El-Taher *et al.*. Raman fiber lasers with a random distributed feedback based on Rayleigh scattering [J]. *Phys. Rev. A*, 2010, **82**(3): 033828
- 11 A. E. El-Taher, P. Harper, S. A. Babin *et al.*. Effect of Rayleigh-scattering distributed feedback on multi-wavelength Raman fiber laser generation [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(2): 130~132
- 12 A. E. El-Taher, D. V. Churkin, P. Harper *et al.*. Multi-wavelength ultra-long Raman fibre laser based on Rayleigh-scattering feedback [C]. *IEEE-ECOC*, 2010, 1. 21
- 13 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. New York: Wiley-Interscience, 2007. 3~21
- 14 O. Frazd̄ao, C. Correia, L. Santos *et al.*. Raman fibre Bragg-grating laser sensor with cooperative Rayleigh scattering for strain-temperature measurement [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2009, **20**(4): 045203
- 15 J. C. Juarez, E. W. Maier, K. N. Choi *et al.*. Distributed fiber-optic intrusion sensor system [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(6): 2081~2087