

单模光纤中受激拉曼散射的阈值特性研究

杨远洪^{1,2} 杨 巍¹ 蒋 婷² 杨明伟¹

(¹ 北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)
(² 北京航空航天大学惯性技术国防科技重点实验室, 北京 100191)

摘要 理论分析并仿真了单模光纤中前向和后向拉曼 Stokes 光功率随输入抽运光功率的变化规律, 发现其具有明显的阈值特性。由此提出了一种新的单模光纤拉曼阈值的定义, 将拉曼 Stokes 光功率随输入抽运光功率变化曲线的二阶微分的最大值对应的输入抽运光功率定义为单模光纤拉曼阈值, 还给出了与之相应的单模光纤拉曼阈值的测量方法, 通过对单模光纤拉曼阈值随单模光纤特征参数的变化规律进行仿真和拟合, 分别获得了单模光纤中前向和后向拉曼阈值方程。搭建了实验平台, 采用脉冲光抽运, 对长度为 24 km 的单模光纤中前向和后向受激拉曼散射的阈值特性进行了实验验证, 结果表明, 实验结果与理论分析和仿真结果相符合, 验证了所提出的阈值定义和测量方法的有效性, 实验中还发现, 在不同的光纤特征参数下, 单模光纤后向拉曼散射阈值比前向时平均提高了 24.9%, 与理论仿真结果的 25.3% 相符合, 表明单模光纤中前向受激拉曼散射更容易产生。

关键词 非线性光学; 单模光纤; 受激拉曼散射; 阈值

中图分类号 O437 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0129001

Investigation on Characteristics of Stimulated Raman Threshold in a Single Mode Fiber

Yang Yuanhong^{1,2} Yang Wei¹ Jiang Ting² Yang Mingwei¹

(¹ Key Laboratory on Precision Opto-Mechatronics Technology of Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China)
(² National Key Laboratory on Inertial Technology, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract The power evolutions of forward and backward Raman Stokes wave versus input pump power in a single mode fiber (SMF) are theoretically analyzed and simulated, which demonstrates an obvious threshold characteristic. A novel definition for Raman threshold in a SMF is proposed. The input pump power corresponding to the maximum of the second-order derivation of the power evolution curve of Raman Stokes wave versus input pump power is defined as the Raman threshold. A practical measurement approach for Raman threshold in a SMF is also demonstrated based on the proposed Raman threshold definition. By simulating and fitting the dependence of Raman threshold on the fiber characteristic parameter, the theoretical threshold equations for the forward and backward Raman scattering in a SMF are obtained, respectively. An experimental setup is established to verify the proposed definition and measurement method. The threshold characteristics for the forward and backward Raman scattering in a SMF with a length of 24 km are studied by using a pulsed pump. The experimental results agree well with the theoretical predictions and verify the effectiveness of the proposed definition and measurement method. The experimental results also demonstrate that the threshold of backward Raman scattering is approximately 24.9% in average higher than that of forward case at different fiber characteristic parameters in a SMF, which is coincident with the theoretical value of 25.3% obtained by simulation. The forward stimulated Raman scattering is relatively easier to occur in a SMF.

Key words nonlinear optics; single mode fiber; stimulated Raman scattering; threshold

OCIS codes 060.4370; 060.2430; 290.5910

收稿日期: 2013-08-08; 收到修改稿日期: 2013-09-09

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ04081504)、创新团队发展计划(IRT1203)

作者简介: 杨远洪(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感技术及激光技术方面的研究。

E-mail: yhyang@buaa.edu.cn(中国光学学会会员号: S040420656S)

1 引 言

光纤中的拉曼散射是由光子和光纤中热振动的分子之间非弹性碰撞而产生的,它是光纤中一种重要的非线性效应。依据入射的抽运光功率的大小,光纤拉曼散射分为自发拉曼散射和受激拉曼散射,二者之间可以进行转化。由自发拉曼散射向受激拉曼散射的转化过程具有明显的阈值特性,当入射的抽运光功率超过一定阈值时,抽运光能量迅速向拉曼散射光转移,自发拉曼散射将转化为受激拉曼散射^[1]。光纤拉曼散射效应在光纤传感^[2-5]、光信号放大^[6-8]和激光产生^[9-14]等领域具有十分广泛的应用。基于光纤自发拉曼散射的温度敏感性可以研制分布式光纤温度传感器。在传感距离为几十千米的长距离传感应用中,为了抑制模式色散对传感器空间分辨率的影响,传感光纤通常采用单模光纤(SMF)来替代短距离传感中常用的多模光纤^[4]。为了克服受激拉曼散射对传感器的传感距离、测量精度等性能指标的影响,需要优化设计探测光脉冲功率,使之低于长距离单模传感光纤的拉曼阈值,从而避免激发受激拉曼散射;光纤拉曼放大器和光纤拉曼激光器通常利用单模光纤中的受激拉曼散射效应,其结构和性能指标与单模光纤的拉曼阈值紧密相关,因此,准确地定义和测量单模光纤中的拉曼阈值是实现上述系统优化设计的前提。

研究人员已经提出了多种不同的单模光纤拉曼阈值定义方法。一种经典的定义方法是在光纤输出端,拉曼 Stokes 光功率与剩余抽运光功率相等时所需的输入抽运光功率定义为拉曼阈值^[15];另一种定义方法是在光纤输出端,拉曼 Stokes 光功率等于剩余抽运光功率的一定倍数(0.1 或 0.01)时对应的输入抽运光功率定义为拉曼阈值^[16];还有的从抽运光能量转化率或拉曼 Stokes 光功率沿光纤长度的变化率的角度来考虑,将抽运光能量转化率为 1% 时的抽运光功率或使拉曼 Stokes 光功率沿光纤长度的变化率为 0(即光纤由传输介质转化为增益介质)时对应的输入抽运光功率定义为拉曼阈

值^[17-18]。上述的这些定义方法是基于光纤输出端拉曼 Stokes 光功率与剩余抽运光功率的关系或拉曼 Stokes 光功率沿光纤长度的变化率,并不具有明确的物理意义,无法清晰地描述自发拉曼散射向受激拉曼散射的转化过程,在一些情况下并不适用^[19-20]。且在一些场合下由于瑞利散射等其他散射光的存在,剩余抽运光、抽运光的能量转化效率或拉曼 Stokes 光沿光纤长度的变化率无法准确测量,给实际应用中测量光纤拉曼阈值造成困难^[21-23]。

本文理论分析并仿真了单模光纤中前向和后向拉曼 Stokes 光功率随输入抽运光功率的变化规律,发现其具有明显的阈值特性,由此提出了一种新的单模光纤拉曼阈值的定义,将拉曼 Stokes 光功率随输入抽运光功率变化曲线的二阶微分的最大值对应的输入抽运光功率定义为单模光纤拉曼阈值,并给出了与该定义相对应的单模光纤拉曼阈值的测量方法,通过对单模光纤拉曼阈值随单模光纤特征参数的变化规律进行仿真和拟合,分别获得了单模光纤前向和后向的拉曼阈值方程。为了验证所提出的拉曼阈值的新定义和测量方法的有效性,搭建了实验平台,采用脉冲光抽运,对 24 km 的单模光纤中前向和后向受激拉曼散射的阈值特性进行了实验验证,还对单模光纤中前向和后向拉曼散射的阈值特性进行了对比。

2 单模光纤中前向和后向拉曼 Stokes 光信号随输入抽运光的变化规律

如图 1 所示,将一束抽运光注入长度为 L 的单模光纤,相对于抽运光的入射方向,在单模光纤中会产生前向和后向拉曼散射。在前向光纤拉曼散射过程中,抽运光从单模光纤前端($z=0$)入射,光纤中产生的自发拉曼散射光将起到信号光的作用,在传播过程中与抽运光相互作用,并从光纤末端($z=L$)输出。对描述单模光纤中拉曼散射的耦合波方程组^[1]进行求解可以得到

$$P_p(z) = \frac{P_p(0) \exp(-\alpha z)}{1 + \frac{\omega_p}{\omega_s} \frac{P_s^{\text{eff}}(0)}{P_p(0)} \exp\left\{\frac{g_R P_p(0)}{A_{\text{eff}} \alpha} [1 - \exp(-\alpha z)]\right\}}, \quad (1)$$

$$P_s(z) = \frac{P_s^{\text{eff}}(0) \exp\left\{\frac{g_R P_p(0)}{A_{\text{eff}} \alpha} [1 - \exp(-\alpha z)] - \alpha z\right\}}{1 + \frac{\omega_p}{\omega_s} \frac{P_s^{\text{eff}}(0)}{P_p(0)} \exp\left\{\frac{g_R P_p(0)}{A_{\text{eff}} \alpha} [1 - \exp(-\alpha z)]\right\}}, \quad (2)$$

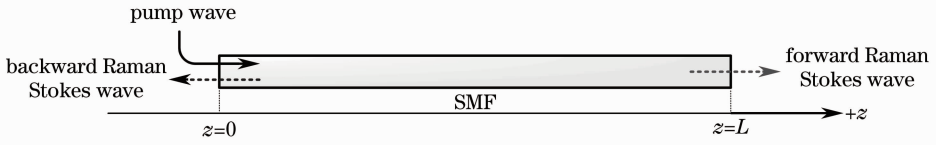


图 1 单模光纤中的前向和后向拉曼散射

Fig. 1 Illustration of forward and backward Raman scattering in a SMF

式中 ω_p 和 ω_s 分别为抽运光和拉曼 Stokes 光的角频率； g_R 为单模光纤拉曼散射增益系数； A_{eff} 为单模光纤纤芯有效面积； α 为单模光纤在抽运光波长和拉曼 Stokes 光波长处的衰减系数； $P_p(z)$ 和 $P_s(z)$ 分别表示在单模光纤中 z 处的抽运光和拉曼 Stokes 光功率； $P_p(0)$ 为入射的抽运光功率； $P_s^{\text{eff}}(0)$ 为有效的 Stokes 输入光功率。 $P_s^{\text{eff}}(0)$ 可表示为^[15]

$$P_s^{\text{eff}}(0) = h\nu_s \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{\Delta\nu}{\sqrt{g_R P_p(0)/(A_{\text{eff}}\alpha)}}, \quad (3)$$

式中 h 为普朗克常数， ν_s 为拉曼 Stokes 光频率， $\Delta\nu$ 为 Lorentzian 线型拉曼增益谱的带宽。

在单模光纤前向拉曼散射过程中，拉曼 Stokes

信号光增益可表示为^[15]

$$G = \exp\left\{-\alpha L + \frac{g_R P_p(0)}{A_{\text{eff}}\alpha} [1 - \exp(-\alpha L)]\right\}. \quad (4)$$

输出端 $z=L$ 处的拉曼 Stokes 光总功率为

$$P_s^{\text{forward}}(L) = \int G h \nu_s d\nu = G h \nu_s B_{\text{eff}}. \quad (5)$$

式中 B_{eff} 是中心位于 $\omega_p - \omega_s$ 处增益峰附近的拉曼散射 Stokes 光的有效带宽。

对于单模光纤的后向拉曼散射，在光纤输出 $z=0$ 端，等效的拉曼 Stokes 光信号增益可表示为^[15]

$$G_{\text{eff}} = \exp\left\{\frac{g_R P_p(0)}{A_{\text{eff}}\alpha} [1 - \exp(-\alpha L)]\right\} / \left\{\frac{g_R P_p(0)}{A_{\text{eff}}\alpha} [1 - \exp(-\alpha L)]\right\}, \quad (6)$$

在 $z=0$ 端输出的后向拉曼 Stokes 光总功率为

$$P_s^{\text{backward}}(0) = \int G_{\text{eff}} h \nu_s d\nu = G_{\text{eff}} h \nu_s B_{\text{eff}}. \quad (7)$$

将(5)式和(7)式比较，有

$$P_s^{\text{backward}}(0) = \frac{G_{\text{eff}}}{G} P_s^{\text{forward}}(L). \quad (8)$$

可以看出，后向拉曼散射 Stokes 光功率是前向拉曼散射 Stokes 光功率的 G_{eff}/G 倍，则从光纤起始端输出的后向拉曼散射 Stokes 功率为

$$P_s^{\text{backward}}(0) = \frac{P_s^{\text{eff}}(0) \exp\left\{\frac{g_R P_p(0)}{A_{\text{eff}}\alpha} [1 - \exp(-\alpha L)]\right\}}{\frac{g_R P_p(0)}{A_{\text{eff}}\alpha} [1 - \exp(-\alpha L)] \left\{1 + \frac{\omega_p}{\omega_s} \frac{P_s^{\text{eff}}(0)}{P_p(0)} \left\{\frac{g_R P_p(0)}{A_{\text{eff}}\alpha} [1 - \exp(-\alpha L)]\right\}\right\}}. \quad (9)$$

设抽运光波长为 1550 nm，拉曼 Stokes 光波长为 1663 nm，单模光纤长度为 24 km，将单模光纤的典型参数代入(2)式和(9)式，就可以通过仿真获得如图 2 所示的单模光纤中前向和后向拉曼 Stokes 光功率随输入抽运光功率的变化规律。

3 单模光纤中拉曼阈值的定义和测量方法

从图 2 所示的仿真结果可看出，单模光纤中前向和后向拉曼 Stokes 光功率随输入抽运光功率的变化都呈现出明显的阈值特性。当输入的抽运光功

率小于一定值时，拉曼 Stokes 光功率极其微弱且增长缓慢，为自发拉曼散射；当输入的抽运光功率超过一定值后，拉曼 Stokes 光功率迅速增加，自发拉曼散射转化为受激拉曼散射。这一变化规律与半导体激光器的输出光功率-驱动电流 ($P-I$) 特性类似。在定义半导体激光器的阈值电流时，一种常用的方法是将其 $P-I$ 特性曲线的二阶微分的最大值对应的驱动电流定义为半导体激光器的阈值电流^[24]。单模光纤的拉曼阈值也可以采用类似的方法来定义和测量，如图 3 所示，将拉曼 Stokes 光功率随抽运光功率的变化曲线的二阶微分的最大值 b 点对应的输入

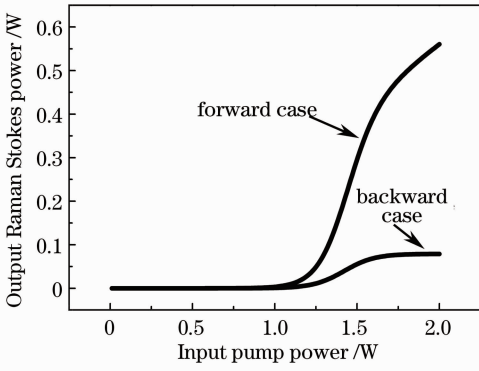


图 2 单模光纤前向和后向拉曼 Stokes 功率随输入抽运功率的变化规律仿真结果

Fig. 2 Simulation results of power evolutions of forward and backward Raman Stokes wave versus input pump power in a SMF

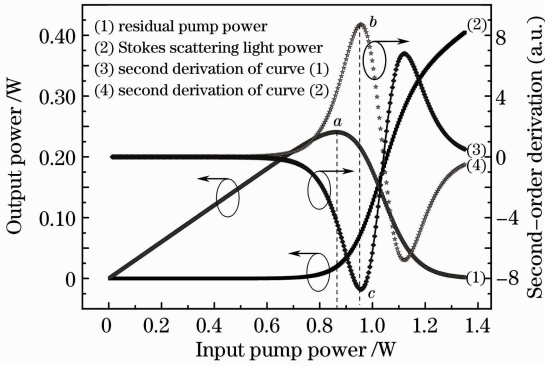


图 3 单模光纤拉曼阈值的定义示意图

Fig. 3 Illustration of the definition of Raman threshold in a SMF

抽运光功率定义为单模光纤拉曼阈值。

这一定义只依赖于拉曼 Stokes 光随输入抽运光的变化,物理意义清晰,可准确地描述自发拉曼散射向受激拉曼散射的演变规律。在自发拉曼散射过程中,拉曼 Stokes 光功率和剩余抽运光功率都随着输入抽运光功率的增加而增加,当抽运光功率增加到某一值(a 点)时,剩余抽运光功率达到峰值,拉曼 Stokes 光功率也开始迅速增加,表明在 a 点处抽运光向拉曼 Stokes 光的能量转化过程开始出现显著变化;拉曼 Stokes 光功率随输入抽运光功率的变化曲线的二阶微分的最大值 b 点与表征剩余抽运光功率随输入抽运光功率的变化曲线的二阶微分的最小值 c 点对应,表明在 b 点和 c 点拉曼 Stokes 光功率和剩余抽运光的变化加速度都同时达到最大,说明自发拉曼散射开始向受激拉曼散射转化, b 点对应的输入抽运光功率即为拉曼阈值。

当抽运光注入单模光纤后,拉曼散射 Stokes 光的变化规律将由(10)式定义的光纤特征参数来描述。

$$\beta = \frac{g_R}{A_{\text{eff}}\alpha} [1 - \exp(-\alpha L)] = \frac{g_R L_{\text{eff}}}{A_{\text{eff}}}, \quad (10)$$

式中 $L_{\text{eff}} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha}$ 为光纤的有效长度。

为了获得较高的抽运功率,通常采用脉冲光抽运来代替直流连续光抽运。脉冲光抽运时,由于拉曼 Stokes 光与抽运光波长群速度不同,导致不同宽度的抽运脉冲光与 Stokes 光在单模光纤中相互作用的距离不同。采用走离长度来表征脉冲抽运光和拉曼 Stokes 光能够相互作用的距离^[25]。当走离长度小于光纤长度时,需要用走离长度代替光纤长度进行计算;当走离长度大于或等于光纤长度时,等效为连续光抽运,此时用光纤长度进行计算。因此,对于脉冲光抽运的情况,需要对(10)式进行如下修正:

$$\beta = \begin{cases} \frac{g_R}{A_{\text{eff}}\alpha} [1 - \exp(-\alpha L_w)], & L_w < L \\ \frac{g_R}{A_{\text{eff}}\alpha} [1 - \exp(-\alpha L)], & L_w \geq L \end{cases}, \quad (11)$$

式中 $L_w = W/d$ 为走离长度, W 为光脉冲宽度, d 为走离参数,通常为 2.5 ps/m 。

按照上述提出的新的单模光纤拉曼阈值定义和测量方法,对单模光纤中前向和后向拉曼阈值随光纤特征参数的变化进行仿真,结果分别如图 4(a)和(b)所示。对单模光纤前向和后向拉曼阈值随光纤特征参数的变化规律进行曲线拟合,获得的拟合方程分别为

$$P_{\text{th}}^{\text{forward}} = 15.31152\beta^{-1.08626}, \quad (12)$$

$$P_{\text{th}}^{\text{backward}} = 19.1773\beta^{-1.08611}, \quad (13)$$

式中 $P_{\text{th}}^{\text{forward}}$ 和 $P_{\text{th}}^{\text{backward}}$ 分别为单模光纤中前向和后向拉曼阈值。可以看出,按照上述方法定义的 $P_{\text{th}}^{\text{forward}}$ 和 $P_{\text{th}}^{\text{backward}}$ 都和光纤特征参数 β 近似为反比例关系。因此,单模光纤前向和后向拉曼阈值方程可分别表示为

$$\frac{g_R P_{\text{th}}^{\text{forward}}}{A_{\text{eff}}\alpha} [1 - \exp(-\alpha L)] \approx 15.312, \quad (14)$$

$$\frac{g_R P_{\text{th}}^{\text{backward}}}{A_{\text{eff}}\alpha} [1 - \exp(-\alpha L)] \approx 19.177. \quad (15)$$

可以看出,对于相同的光纤特征参数 β ,后向拉曼阈值比前向提高了 25.3% 。

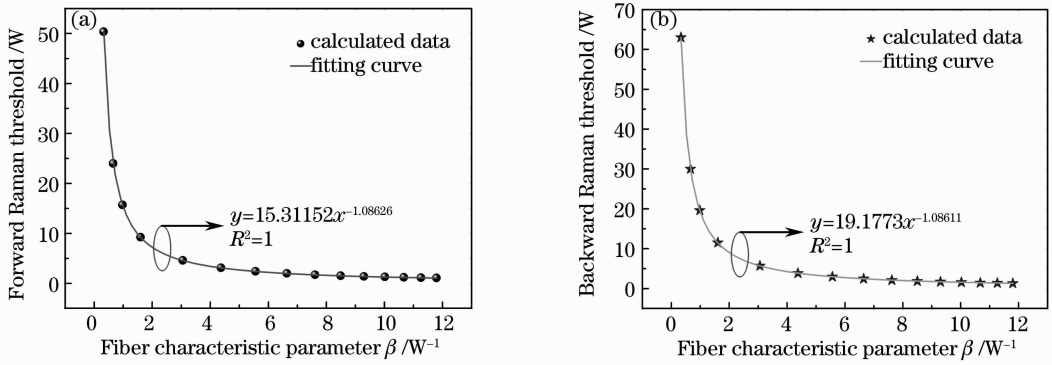


图 4 仿真获得的单模光纤拉曼阈值随光纤特征参数的变化规律。(a)前向；(b)后向

Fig. 4 Simulation results of evolution of Raman threshold versus the fiber characteristic parameter in a SMF. (a) Forward case; (b) backward case

4 单模光纤拉曼阈值的实验测量与分析

4.1 实验装置

为了验证所提出的单模光纤拉曼阈值的新定义和测量方法的有效性，搭建了单模光纤前向和后向拉曼散射阈值特性实验平台进行实验验证和研究，其结构分别如图 5(a)和(b)所示。在图 5(a)中，脉冲光纤激光器输出的激光注入 24 km 的单模光纤，光纤末端输出的光信号中包含了前向拉曼散射光和剩余抽运

光，将该信号输入粗波分复用器(CWDM)，从 CWDM 的 1600~1700 nm 透射端口可以获得前向拉曼 Stokes 光信号；在图 5(b)中，脉冲光纤激光器经标准的单模拉曼波分复用器(SM-RWDM)注入 24 km 的单模光纤，后向散射信号返回至 SM-RWDM，从其 1600~1700 nm 输出端口可获得后向拉曼 Stokes 光信号。利用光功率计就可以分别测量前向和后向拉曼 Stokes 光信号的功率。

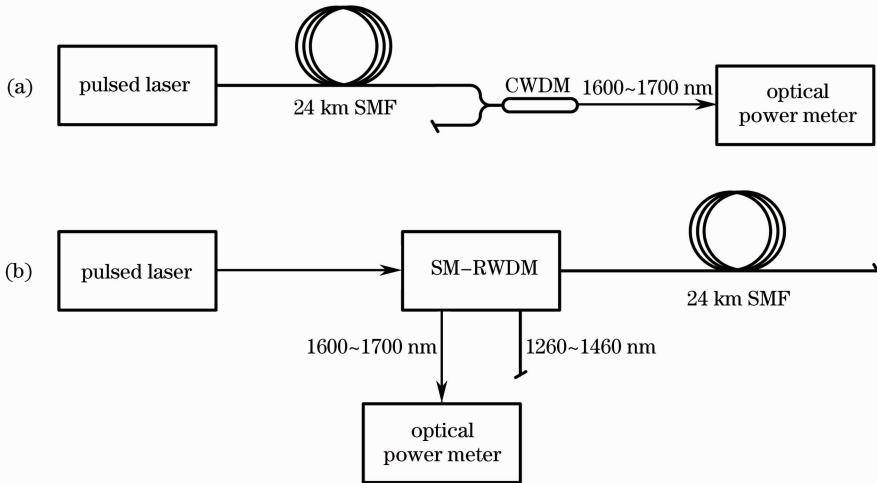


图 5 单模光纤拉曼阈值特性实验平台。(a)前向；(b)后向

Fig. 5 Experimental setups for characterizing fiber Raman threshold in the SMF. (a) Forward case; (b) backward case

4.2 实验结果与分析

设置抽运光脉冲宽度为 15 ns，脉冲重复频率为 4 kHz。逐渐增加输入抽运光功率并在图 5(a)和(b)所示的实验平台中利用光功率计分别测量前向和后向拉曼 Stokes 光功率，获得的前向和后向拉曼散射光功率随输入抽运光功率的变化分别如图 6(a)和(b)所示。前向和后向拉曼 Stokes 光信号功率随输入抽运光功率的变化都呈现出了明显的阈值特性，当抽运功

率小于一定值时，拉曼散射光十分微弱，随着抽运光功率的增加而缓慢增加，当抽运功率大于一定值后，拉曼散射光功率迅速增加，这一现象与理论分析和仿真结果一致。根据第 3 节中所述的单模光纤拉曼阈值的定义和测量方法，对实验测量的前向和后向拉曼散射光功率随输入抽运光功率的变化曲线分别进行二次微分，二次微分曲线的最大值对应的输入抽运光功率即是抽运光脉冲宽度为 15 ns 时单模光纤

的前向和后向拉曼阈值,如图 6(a)和(b)所示,分别为 3.989 W 和 5 W。

由(11)式可知,当采用脉冲光抽运时,不同宽度的抽运脉冲对应的走离长度不同,从而使得光纤特征参数也随着抽运光脉冲宽度的变化而变化,因而可以通过改变光脉冲宽度的方式来获得不同的光纤

特征参数。在实验中逐渐增加光脉冲宽度,在每个脉冲宽度下分别测量前向和后向拉曼 Stokes 光功率随输入抽运光功率的变化曲线,再根据提出的拉曼阈值测量方法,就可以获得如图 7(a)和(b)所示的前向和后向拉曼阈值随光纤特征参数 β 的变化。

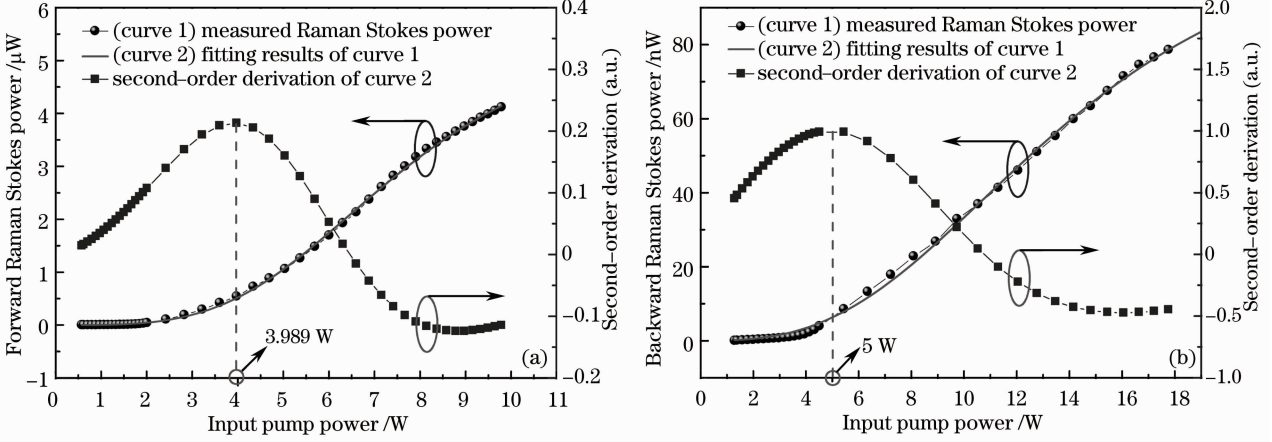


图 6 抽运光脉冲宽度为 15 ns 时,实验测量的拉曼 Stokes 光功率随输入抽运光功率的变化。(a) 前向; (b) 后向
Fig. 6 Measured power evolution of Raman Stokes wave versus input pump power at pump pulse width of 15 ns.

(a) Forward case; (b) backward case

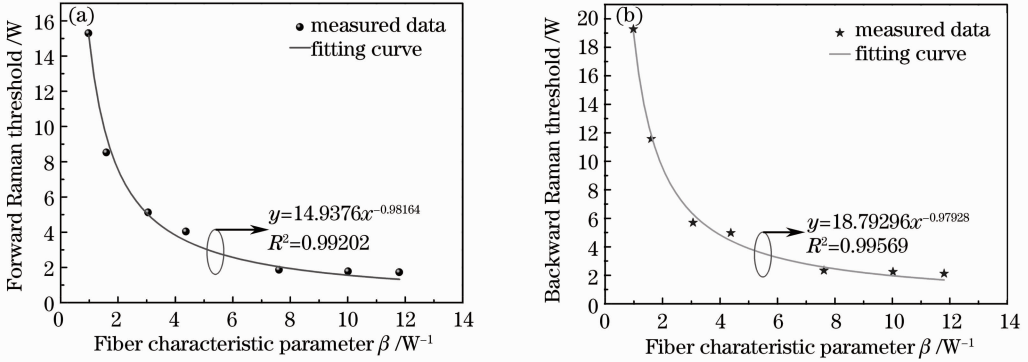


图 7 实验测量的单模光纤拉曼阈值随光纤特征参数的变化。(a) 前向; (b) 后向

Fig. 7 Measured dependences of Raman threshold on the characteristic parameter of the SMF. (a) Forward case; (b) backward case

对实验测量的单模光纤前向和后向拉曼阈值随光纤特征参数的变化规律进行曲线拟合,获得的拟合方程分别为

$$P_{th}^{forward} = 14.9376\beta^{-0.98164}, \quad (16)$$

$$P_{th}^{backward} = 18.79296\beta^{-0.97928}. \quad (17)$$

可以看出,单模光纤的前向和后向拉曼阈值都和光纤特征参数 β 近似为反比例关系,因而实验测量获得的单模光纤前向和后向拉曼阈值方程可分别表示为

$$\frac{g_R P_{th}^{forward}}{A_{eff}\alpha} [1 - \exp(-aL)] \approx 14.938, \quad (18)$$

$$\frac{g_R P_{th}^{backward}}{A_{eff}\alpha} [1 - \exp(-aL)] \approx 18.793. \quad (19)$$

经过对比可知,实验获得的单模光纤前向和后向的阈值方程与(14)式和(15)式所示的理论仿真获得的阈值方程相符合,验证了所提出的单模光纤拉曼阈值的定义和测量方法的有效性。

实验中还对比了测得的前向和后向拉曼阈值,结果如图 8 所示。可以看出,对于不同的光纤特征参数 β ,实验获得的单模光纤的后向拉曼阈值比前向拉曼阈值平均提高了 24.9%,与图 8 中虚线所示的理论仿真结果的 25.3%相符合,说明在相同的

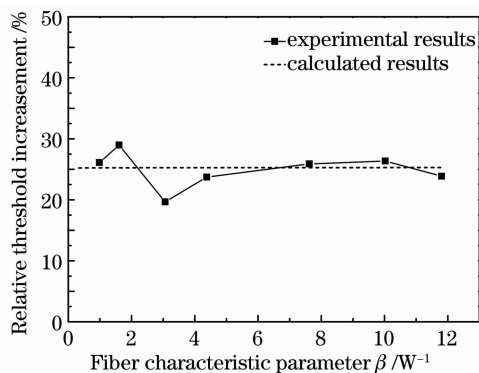


图8 前向和后向单模光纤拉曼阈值的对比

Fig. 8 Comparison of forward and backward Raman threshold in the SMF

条件下,单模光纤中更容易产生前向受激拉曼散射。

5 结 论

理论分析并仿真了单模光纤中前向和后向拉曼 Stokes 光功率随输入抽运光功率的变化规律,发现其具有明显的阈值特性,由此提出了一种新的单模光纤拉曼阈值的定义,将拉曼 Stokes 光功率随输入抽运光功率变化曲线的二阶微分的最大值对应的输入抽运光功率定义为单模光纤拉曼阈值,还给出了与之相应的单模光纤拉曼阈值的测量方法,通过对单模光纤拉曼阈值随单模光纤特征参数的变化规律进行仿真和拟合,分别获得了单模光纤中前向和后向拉曼阈值方程。该阈值定义和测量方法只取决于拉曼 Stokes 光随抽运光的变化,能够清晰准确地描述自发拉曼散射向受激拉曼散射的演变规律。搭建了实验平台,采用脉冲光抽运,对长度为 24 km 的单模光纤中前向和后向受激拉曼散射的阈值特性进行了实验验证,结果表明,实验结果与理论分析和仿真结果相符合,验证了所提出的阈值定义和测量方法的有效性,实验中还发现,对于不同的光纤特征参数 β ,单模光纤后向拉曼散射阈值比前向时平均提高了 24.9%,与理论仿真结果的 25.3% 相符合,表明在相同的条件下,单模光纤中的前向受激拉曼散射更容易产生。

参 考 文 献

- Govind P Agrawal. Nonlinear Fiber Optics [M]. London: Academic Press, 2007. 274-328.
- Zhang Zaixuan, Jin Shangzhong, Wang Jianfeng, *et al.*. Distributed optical fiber Raman photon sensor research review [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(11): 2749-2761.
张在宣, 金尚忠, 王剑锋, 等. 分布式光纤拉曼光子温度传感器的研究进展[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2749-2761.
- Wang Jianfeng, Liu Honglin, Zhang Shuqin, *et al.*. New type

distributed optical fiber temperature sensor (DTS) based on Raman scattering and its' application [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(4): 865-871.

王剑锋, 刘红林, 张淑琴, 等. 基于拉曼光谱散射的新型分布式光纤温度传感器及应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(4): 865-871.

- Marcelo A Soto, Tiziano Nannipieri, Alessandro Signorini, *et al.*. Raman-based distributed temperature sensor with 1 m spatial resolution over 26 km SMF using low-repetition-rate cyclic pulse coding [J]. Opt Lett, 2011, 36(13): 2557-2559.
- Fuchang Chen, Jiacheng Hu, Chengtao Zhang, *et al.*. Dual-source distributed optical fiber sensor for simultaneous temperature and strain measurements [J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(6): 060601.
- Felix Rodriguez-Barrios, Sonia Martin-Lopez, Ana Carrasco-Sanz, *et al.*. Distributed Brillouin fiber sensor assisted by first-order Raman amplification [J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(15): 2162-2172.
- Sonia Martin-Lopez, Mercedes Alcon-Camas, Felix Rodriguez, *et al.*. Brillouin optical time-domain analysis assisted by second-order Raman amplification [J]. Opt Express, 2010, 18(18): 18769-18778.
- Zhou Weijun, Xu Ming, Wang Rongbo. The design on gain flatness of distributed broadband fiber Raman amplifier [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(3): 030602.
周维军, 绪明, 王荣波. 分布式宽带光纤拉曼放大器增益平坦优化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(3): 030602.
- Paul S Westbrook, Kazi S Abedin, Jeffrey W Nicholson, *et al.*. Raman fiber distributed feedback lasers [J]. Opt Lett, 2011, 36(15): 2895-2897.
- Jindan Shi, Shaif-ul Alam, Morten Ibsen. Highly efficient Raman distributed feedback fibre lasers [J]. Opt Express, 2012, 20(5): 5082-5091.
- V R Supradeepa, Jeffrey W Nicholson, Clifford E Headley, *et al.*. A high efficiency architecture for cascaded Raman fiber lasers [J]. Opt Express, 2013, 21(6): 7148-7155.
- Yin Ke, Xu Jiangming, Leng Jinyong, *et al.*. Research progress of high power fiber Raman lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(1): 010004.
殷科, 许将明, 冷进勇, 等. 高功率光纤拉曼激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(1): 010004.
- Liu Peng, Huang Chaohong, Qi Wei, *et al.*. Phosphosilicate fiber Raman laser based on fiber loop mirror [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0202005.
刘鹏, 黄朝红, 漆伟, 等. 基于光纤环形镜的掺磷光纤拉曼激光器 [J]. 中国激光, 2013, 39(2): 0202005.
- Qi Wei, Liu Peng, Lu Helin, *et al.*. 1270 nm hybrid cascaded phosphosilicate fiber Raman laser [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0302008.
漆伟, 刘鹏, 卢和林, 等. 1270 nm 混合级联掺磷光纤拉曼激光器 [J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0302008.
- R G Smith. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering [J]. Appl Opt, 1972, 11(11): 2489-2494.
- Cesar Jauregui, Jens Limpert, Andreas Tunnermann. Derivation of Raman threshold formulas for CW double-clad fiber amplifiers [J]. Opt Express, 2009, 17(10): 8476-8490.
- Yoshiharu Urata, Satoshi Wada, Hideo Tashiro. Fiber-like lanthanum tungstate crystal for efficient stimulated Raman scattering [J]. Appl Phys Lett, 1999, 75(5): 636-638.
- Georgii S Felinskyi, Pavel A Korotkov. Lasing threshold for stimulated Raman generation of monochrome optical wave in single mode fibers [C]. 8th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, 2006. 110-112.
- A B Matsko, A A Savchenkov, R J Letargat, *et al.*. On cavity

- modification of stimulated Raman scattering [J]. *J Opt B*, 2003, 5(3): 272–278.
- 20 Cesar Jauregui, Jens Limpert, Andreas Tunnermann. On the Raman threshold of passive large mode area fibers [C]. *SPIE*, 2011, 7914: 791408.
- 21 Lanlan Liu, Chongqin Wu, Luyao Zhai, *et al.*. The study of the gain characteristics of 1.66 μm fiber Raman amplifier with ordinary single-mode fiber [C]. *SPIE*, 2008, 7134: 71343A.
- 22 Rogers H Stolen. Nonlinearity in fiber transmission [J]. *Proc IEEE*, 1980, 68(10): 1232–1236.
- 23 Prantik Mazumder, Stephan L Logunov, Srikanth Raghavan. Analysis of excess scattering in optical fibers [J]. *J Appl Phys*, 2004, 96(8): 4042–4049.
- 24 ILX Lightwave Corporation. The Differences between Threshold Current Calculation Methods [EB/OL]. <http://www.ilxlightwave.com>. [2013–11–15].
- 25 I Torres, A N Starodumov, Yu O Barmenkov, *et al.*. Raman effect based modulator for high power fiber lasers [J]. *Appl Phys Lett*, 1998, 72(4): 401–403.

栏目编辑: 王晓球