

基于光纤环形腔结构的布里渊频移器设计

张晓青 贾豫东 董建晶

北京信息科技大学光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100101

摘要 为了达到布里渊光时域分析(BOTDA)系统双通道激光源的布里渊频移要求,设计了一个光纤布里渊频移器,放置在其探测脉冲通道,使探测光与另一通道的扫频光具有布里渊频移差(约 11.2 GHz)。通过分析频移器的输出光谱线宽窄化原理,利用光纤中激发的布里渊增益谱结合一定的环形腔结构形成窄线宽的布里渊斯托克斯光谱输出,且分析了环形腔频移器的受激布里渊散射阈值和光-光转换效率两个性能指标及其影响因素。采用 1551 nm 窄线宽光源,对实际搭建的 9 km 单模光纤布里渊频移器进行了实验验证,结果表明:频移器的受激布里渊散射阈值为 2.3 mW,布里渊频移对应的波长改变约为 0.1 nm,此时的定向耦合器耦合比为 0.4,光-光转换效率为 49%。所设计的光纤布里渊频移器能达到布里渊光时域分析系统光源的技术指标,降低了系统的复杂性和成本。

关键词 激光器; 光纤激光器; 环形腔; 受激布里渊散射; 阈值功率

中图分类号 TN253 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.1214007

Design of Brillouin Frequency Shifter Based on Ring Cavity Structure of Optical Fiber

Zhang Xiaoqing Jia Yudong Dong Jianjing

Beijing Key Laboratory for Optoelectric Measurement Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China

Abstract In order to meet the Brillouin frequency shift requirement of dual channel laser source for Brillouin optical time domain analysis(BOTDA) system, an optical fiber Brillouin frequency shifter is designed and placed in the probe pulse channel to make Brillouin frequency shift difference(about 11.2 GHz) between the probe pulse light and the frequency scanning light in another channel. By analyzing the frequency shifter output spectral linewidth narrowing principle, the Brillouin Stokes spectral output with narrow linewidth is formed by combining optical fiber stimulated Brillouin gain spectrum and specific ring cavity structure. The two performance indexes, including threshold of stimulated Brillouin scattering of ring cavity frequency shifter and light-light conversion efficiency, and their influence factors are analyzed. An experimental device of Brillouin frequency shifter with a seed source of 1551 nm and 9 km single mode fiber is set up. The experimental results indicate that the threshold value of stimulated Brillouin scattering is 2.3 mW and the wavelength change corresponding to the Brillouin frequency shift is about 0.1 nm, when the coupling ratio of directional coupler is 0.4 and light-light conversion efficiency is 49%. This optical fiber Brillouin frequency shifter meets the basic light source technical indexes of BOTDA system, which reduces the complexity and the cost of the system.

Key words lasers; fiber laser; ring cavity; stimulated Brillouin scattering; threshold power

OCIS codes 140.3490; 140.3510; 290.5900

1 引言

在分布式光纤传感技术中,基于布里渊光时域分析(BOTDA)的系统具有检测信号强度大、测量精度高以及传感距离长的优点,已成为该领域研究热点^[1]。由于需要频差为布里渊频移的两个光源,一般的

收稿日期: 2016-06-06; 收到修改稿日期: 2016-08-18

基金项目: 北京市教委科技计划面上项目(KM201411232005)、光电测试技术北京市重点实验室资助项目(GDKF2013002)、北京市青年拔尖人才培养计划(CIT&TCD201404122)

作者简介: 张晓青(1967—),女,博士,副教授,主要从事光纤传感技术及先进信号处理等方面的研究。

E-mail: zhangxiaqing@bistu.edu.cn

BOTDA 系统都采用微波信号源和高速调制器实现频移,激光器光波通过高速电光相位调制器实现频移,频移量由加载在调制器上的微波源来控制^[2]。这种实现方式比较直接,也是目前布里渊传感系统光源的主要方法。但是电光调制器有电光转换效率不高、高阶边带引入噪声、需要复杂的工作点控制才能稳定工作等缺陷,而且引入了结构复杂、造价昂贵的微波信号源,使得系统成本增加很多。为了避免引入高速调制器和微波信号源等复杂结构、降低系统成本、提高系统性能,采用光学方法实现频移成为可能的替代方案^[3-4]。常见的光纤频移器方案有以下几种:1)法布里-珀罗型谐振腔结构由一段掺杂光纤和一对平行放置的反射腔镜组成^[5],反射镜在激光振荡产生过程中提供光学反馈,从而实现布里渊散射光的谐振输出。这种结构通常在光纤端面镀介质膜形成反射腔镜,反射光谱带宽有几个纳米,模式选择性较差,因此多工作在多纵模状态,难以获得单频窄线宽输出。2)相比法布里-珀罗型线性腔,无源环形腔通过环行器和单模光纤(SMF)构成环形谐振腔,用耦合器的输入输出端接入环形腔代替腔镜。环形腔满足阈值条件后,形成受激布里渊散射光的腔内振荡,通过耦合器输出,不易产生布里渊级联效应、具有更低的阈值和更窄的线宽而适用于制作单波长布里渊光纤激光器^[6]。这种谐振腔结构简单,但需对环形腔的参数进行严格选定,才能形成理想的窄线宽一阶斯托克斯光输出。3)基于掺铒光纤放大的布里渊光纤环形激光器,又称有源环形腔,使用两种增益介质,即单模光纤中的非线性布里渊增益和掺铒光纤中的线性增益利用掺铒光纤放大器补偿谐振腔的损耗,而激光仍由布里渊增益产生,从而实现布里渊频移^[7]。这种结构可获得更窄的线宽、更高功率的激光输出,但需要两个抽运源,结构较复杂。

由于 BOTDA 光源需要窄线宽一阶斯托克斯光谱输出,而且要求结构简单,本文在分析几种频移实现方法的基础上,结合 BOTDA 双通道光源的特点,以无源腔为基础,设计了 BOTDA 双通道光源的布里渊频移器,从理论上分析了频移器的性能影响因素,并搭建了实验系统对输出光谱进行实验研究。

2 布里渊频移器结构设计

布里渊频移器整体设计方案如图 1 所示。激光器光源通过可调谐衰减器作为抽运光进入光纤环形腔结构。在进腔之前需加入隔离器 1,防止腔内激光折回对光源造成损坏。环形腔由光纤环行器、标准单模光纤、偏振控制器、隔离器 2、可调耦合比光耦合器组成。抽运光在腔内形成顺时针环形抽运。当经过 SMF 时,由于发生受激布里渊散射效应,SMF 中将产生沿环形腔逆时针方向传播的布里渊散射斯托克斯光,斯托克斯光再经过隔离器 2 和偏振控制器,在腔中形成环形振荡,并经由耦合器输出。环形腔中隔离器 2 的作用是仅使环路中的光逆时针传播,防止产生高阶斯托克斯光;偏振控制器的作用是调节环路中的偏振态使之达到本征态,使环路中的散射光强达到最大。

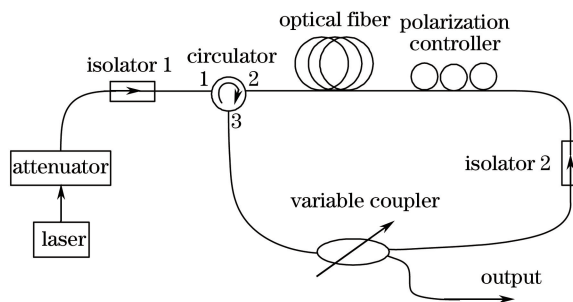


图 1 无源环形腔布里渊频移器基本结构

Fig. 1 Basic structure of Brillouin frequency shifter with passive ring cavity

3 频移器性能参数及影响因素

3.1 布里渊增益谱线宽

在不考虑自发布里渊散射噪声对线宽的影响情况下,抽运光在转化为斯托克斯光的过程中,由于声子衰减和谐振腔反馈作用,其相位噪声被大大减弱,从而实现了斯托克斯光线宽的压缩,抽运光线宽 $\Delta\nu_p$ 与斯托克斯光线宽 $\Delta\nu_s$ 之间存在以下关系^[8]

$$\Delta\nu_s = \frac{\Delta\nu_p}{\xi} \left(1 + \frac{\gamma_A}{\Gamma_c} \right)^2, \quad (1)$$

式中, ξ 称为窄化因子; γ_A 为光纤中声波的衰减速率, $\gamma_A = 1 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$; Γ_c 为环形腔的损耗速率, $\Gamma_c = -c \ln(R/nL)$; c 为真空中的光速; R 为环形腔斯托克斯波的反馈系数, $R = k(1-\gamma)\exp(-\delta)$, k 为耦合器耦合比, γ 为耦合器附加损耗, δ 为环形腔附加损耗; n 为光纤纤芯折射率, L 为环形腔腔长。图 2 为抽运光线宽 $\Delta\nu_p = 1 \text{ MHz}$ 、窄化因子 $\xi = 1$ 、反馈系数 $R = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ 情况下, 环形腔长度与斯托克斯光谱线宽关系的仿真图。可以看到, 通过环形腔结构输出的斯托克斯光线宽与腔长、耦合器耦合比、耦合器损耗等因素有关^[9]。窄化因子越大, 则输出增益谱线宽越窄^[10]。在参数选取恰当的情况下, 可能得到比抽运激光线宽窄 100 倍的斯托克斯激光输出, 这对窄线宽布里渊环形频移器的研究十分重要。

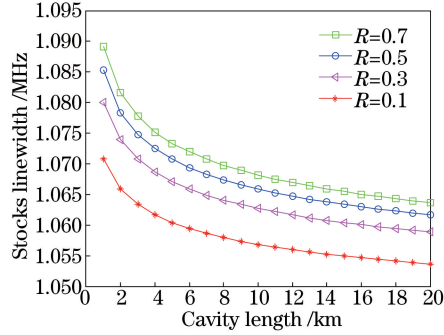


图 2 布里渊频移器输出光谱线宽

Fig. 2 Linewidth of output spectrum of Brillouin frequency shifter

3.2 频移器受激布里渊散射阈值

在布里渊环形腔频移器的设计中, 受激布里渊散射阈值是一个需要考虑的重要参数。阈值越高, 激光器就需要更大的功率才能产生相同功率的斯托克斯光^[11-12], 而更大功率的激光器则需要更高的成本。

根据布里渊散射理论的经典模型, 光纤中产生受激布里渊散射所需的阈值功率 P_{th} 为^[13]

$$P_{th} = \frac{KGA_{eff}}{g_B L_{eff}} \frac{\Delta\nu_p + \Delta\nu_B}{\Delta\nu_B}, \quad (2)$$

式中, G 为受激布里渊散射阈值增益系数, A_{eff} 为有效纤芯面积, g_B 为布里渊峰值增益系数, L_{eff} 为光纤的有效作用长度, $L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha$, α 为光纤损耗系数, L 为光纤环形腔长度, K 为偏振系数, 其取值范围约为 $0 < K < 1$, $\Delta\nu_B$ 为布里渊自然增益线宽。当激光器线宽 $\Delta\nu_p$ 远小于 $\Delta\nu_B$ 时, 有

$$P_{th} = \frac{KGA_{eff}}{g_B L_{eff}}, \quad (3)$$

$$g_B = \frac{2\pi n^7 p_{12}^2}{c\lambda^2 \rho_0 V_a \Delta\nu_B}, \quad (4)$$

式中, n 为光纤纤芯折射率, p_{12} 为纵向弹光系数, λ 为激光器波长, ρ_0 为光纤纤芯材料密度, V_a 为声速^[14]。

取阶跃型单模光纤, 其高斯束模场半径 w 表示为^[15]

$$w^2 = \frac{2r^2}{\ln(2\Delta r^2 n^2 k_0^2)}, \quad (5)$$

式中, r 为光纤纤芯半径, Δ 为相对折射率差, $k_0 = 2\pi/\lambda$, 为真空中波数, 则有

$$A_{eff} = \pi w^2 = \frac{2\pi r^2}{\ln(2\Delta r^2 n^2 k_0^2)}. \quad (6)$$

结合(3)、(4)、(6)式, 取 $K \cdot G = 21$, 推导出环形腔频移器的受激布里渊散射阈值功率为

$$P_{th} = \frac{21c\lambda^2 \rho_0 V_a \Delta\nu_B \alpha r^2}{n^7 p_{12}^2 [1 - \exp(-\alpha L)] \ln(2\Delta r^2 n^2 k_0^2)}. \quad (7)$$

取 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$, 查找得到普通单模光纤的典型参数值: $\rho_0 = 2.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $V_a = 5945 \text{ m/s}$, $\Delta\nu_B = 30 \text{ MHz}$, $r = 4 \text{ }\mu\text{m}$, $n = 1.46$, $p_{12} = 0.29$, $\Delta = 0.01$, 并在 $\alpha = 0.1, 0.2, 0.3 \text{ dB/km}$ 时得到

频移器的布里渊散射阈值功率与光纤长度的仿真关系,如图3所示。可以看到,增加环形腔中光纤长度可降低频移器阈值功率,这种改变在3500 m以前较明显,之后趋于平缓。这表明光纤长度足够长以后并不能更多地降低阈值功率,反而可能因此增加光损耗,从而降低频移器性能。

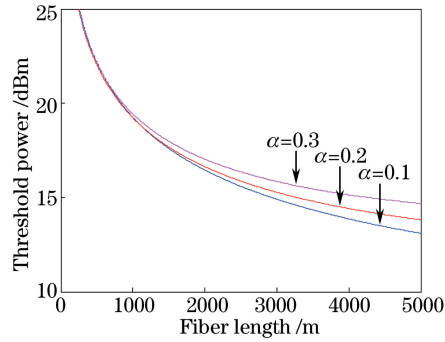


图3 频移器阈值功率与光纤长度的关系

Fig. 3 Relation between fiber length and threshold power of frequency shifter

3.3 频移器转换效率

由于频移器要利用的是一阶斯托克斯波,为抑制其他高阶成分,在环形腔中加入了隔离器2(图1所示),使环形腔只能发生一阶斯托克斯光谐振。当抽运功率高过某一阈值时,将产生二阶斯托克斯光,它不会在环形腔内发生谐振,但会损失掉部分一阶斯托克斯光。因此频移器最佳工作状态是抽运功率恰好达到二阶斯托克斯光阈值,此时,抽运光转化为一阶斯托克斯光的效率达到最高值。

根据抽运光波和斯托克斯光波的强度耦合方程,并结合环形腔谐振时的传输特性^[16-17],受激布里渊散射阈值功率可写为

$$P_{th} = \frac{[\ln(1/R) + \alpha L] \cdot A_{eff}}{g_B L_{eff}} \quad (8)$$

设抽运光波功率为 P_{in} ,当抽运光波功率 P_{in} 达到 P_{th} 后,抽运光波开始转化为一阶斯托克斯光,并在环形腔中不断积累,直到产生斯托克斯光输出,输出斯托克斯光功率可表示为^[17]

$$P_{sout} = \sqrt{50k} T_{out} P_p (\sqrt{P_{in}/P_{th}} - 1), \quad (9)$$

式中, $T_{out} = (1-k)(1-\gamma)$,为斯托克斯输出功率传输系数。 P_p 为耦合进环形腔的抽运功率,若不考虑光源损耗,则可认为 $P_p = P_{in}$ 。 $\sqrt{50k}$ 可称为环形腔修正系数,与腔长有关,通常取经验值,或者由实验测量后确定^[18]。

由(9)式可得到输出斯托克斯光功率与输入抽运功率的比值,即转换效率,为

$$\eta = \frac{P_{sout}}{P_{in}} = \sqrt{50k} T_{out} P_p \left(\frac{1}{\sqrt{P_{in} P_{th}}} - \frac{1}{P_{in}} \right) \quad (10)$$

对(10)式求导,得到 η 的极值点条件为

$$P_{in} = 4P_{th} \quad (11)$$

结合(10)、(11)式,且在 $P_p = P_{th}$ 时,得到最大转换效率为

$$\eta_{max} = \sqrt{50k} T_{out} / 4 \quad (12)$$

通过理论分析可以得出,当激光器抽运功率等于频移器阈值功率的4倍时,光-光转换效率最高。频移器的转换效率还与腔内耦合器的耦合比有关,耦合比在0.3~0.5范围内有较高的转换效率,如图4所示。

在实际设计中,可根据所需的转换效率选择合适的耦合器及耦合比,然后根据激光器的抽运功率确定所需光纤的长度,从而得到工作在最佳状态的布里渊光纤环形频移器。

4 实验研究

在进行布里渊频移器系统实验前,对构成环形腔的光纤的受激布里渊阈值进行了测试实验,实验装置如图5所示。分布式反馈激光器(DFB)经过可调衰减器与隔离器1进入环行器1口,从环行器2口作为抽运

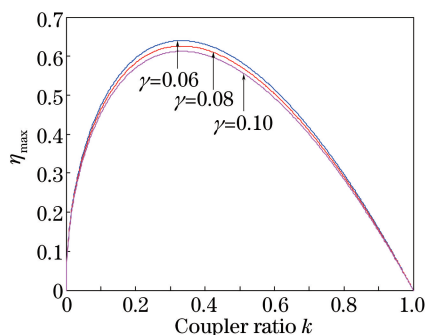


图 4 最高转换效率与耦合比的关系

Fig. 4 Relation between maximum conversion efficiency and coupling ratio

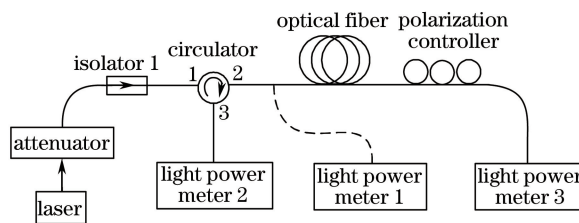


图 5 受激布里渊散射阈值测试装置

Fig. 5 Experimental equipment for threshold power of stimulated Brillouin scattering

光进入 9 km 单模光纤。分别用功率计 1,2,3 记录抽运光功率、散射光功率与出纤功率,并调节室温为 20 ℃。

为了准确地测量布里渊斯托克斯光谱输出功率,环形器 2 口输出光首先由功率计 1 检测并记录功率信息,再记录功率计 2、功率计 3 的功率。调节抽运光功率,调节范围是 0~18 mW,调节偏振控制器的状态,得到表 1 测量数据。未发生受激布里渊散射时,光纤中的散射处于自发状态,此时除了布里渊散射光谱外还有更大功率的瑞利光谱存在。为了更清楚地显示数据信息,将表 1 中的单位毫瓦分贝转换成功率单位毫瓦,转换关系为: $10\lg(x \text{ mW}) = y \text{ dBm}$, 并作出折线图如图 6 所示。

表 1 阈值功率测试数据

Table 1 Test data of threshold power

Number N	Meter 1 /dBm	Meter 2 /dBm	Meter 3 /dBm
1	6.1	-41.5	3.9
2	6.9	-38	4.7
3	7.5	-35.5	5.2
4	8.0	-32	5.67
5	8.4	-24	6.65
6	9.0	-22	7.59
7	9.4	-9.2	8.0
8	9.6	-7.7	8.0
9	9.9	-3.36	8.1
10	10.1	0.0	8.1
11	10.4	2.2	8.1
12	10.5	3.0	8.1
13	10.6	3.3	8.1
14	10.7	3.8	8.1
15	10.8	4.2	8.1
16	11.0	4.7	8.2
17	11.2	5.1	8.4
18	11.3	5.7	8.5

从图 6 的功率计 2 对应的曲线可以看到,当抽运光功率较小时,由于光纤中发生的是自发散射效应,布里渊斯托克斯光的功率极其微弱,而当注入抽运功率达到 9.5 mW 时,布里渊斯托克斯光迅速增强,在此之后,布里渊斯托克斯光和注入光功率成线性增长的关系,9.5 mW 即为受激布里渊阈值,这一过程和理论吻合得很好。

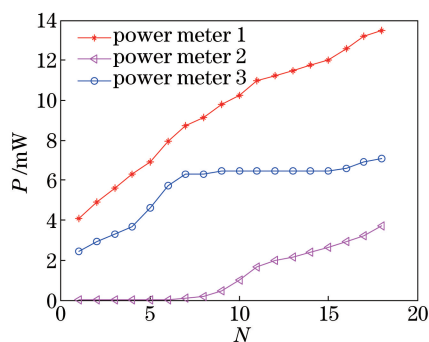


图 6 测试阈值功率

Fig. 6 Test of threshold power

根据所设计的布里渊频移器结构,选取 9 km 长单模光纤进行实验研究,如图 7 所示。将环境温度调节为 20 °C。实测中心波长为 1551.28 nm、最大输出功率为 13 dBm(20 mW)的 DFB 激光器输出的光经过光衰减器进入环形腔,输出光的功率由 AV6334 型光功率计测量,输出光谱由 ANDO-AQ6317B 型光谱仪观测,分辨率为 0.01 nm。

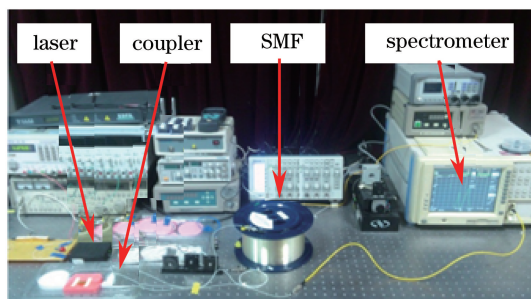


图 7 布里渊频移器实验系统

Fig. 7 Experimental system of Brillouin frequency shifter

调节可调谐光耦合器的耦合系数 k 为 0.5,通过衰减器改变进入环形腔的光功率,当光功率为 2 mW 时的输出光谱如图 8(a)所示。此时,环形腔内未产生受激布里渊散射,主要表现为自发布里渊散射。输出光谱最大峰在 1551.30 nm 处,是与入射激光波长基本相同的瑞利散射峰,瑞利峰两侧为自发布里渊散射,含有斯托克斯和反斯托克斯成分,光强很小,其中右侧为斯托克斯光。这时频移器处于未工作状态。图 8(b)是激光器抽运功率为 2.1 mW 时的输出光谱,此时斯托克斯光强由于反馈而逐渐增大,同时瑞利光强逐渐减小,能量逐渐发生转移。这时频移器处于斯托克斯光激发状态,在调节过程中激光输出的频率不是很稳定。

当继续增大进入环形腔的光功率到 2.3 mW 时,由于环形腔的反馈机制,腔内产生布里渊放大效应,斯托克斯光功率突然增大,而此时其他波长的散射光急剧衰减,光谱上只表现为布里渊斯托克斯光(1551.38 nm),如图 9(b)所示。对比图 9(a),与抽运源的稳定输出波长(1551.28 nm)相比,频移器的频移量为 0.1 nm,且斯托克斯光功率随着入腔光功率的增加而逐渐增大,产生较为稳定的布里渊频移输出,如图 10 所示。

由图 10 特性曲线可以看出激光器输出功率与频移器输出功率呈线性增长趋势。实验得到此时的光-光平均转换效率约为 45%,频移器阈值为 2.3 mW。与前面的阈值测试相比,频移器阈值大约降低了 4 倍,这说明环形腔结构的反馈机制能大幅降低受激布里渊散射阈值。从 0.1 开始改变光耦合器的耦合系数 k 一直到 0.9,每次改变量为 0.1,按照前面的实验步骤,记录数据如表 2 所示。

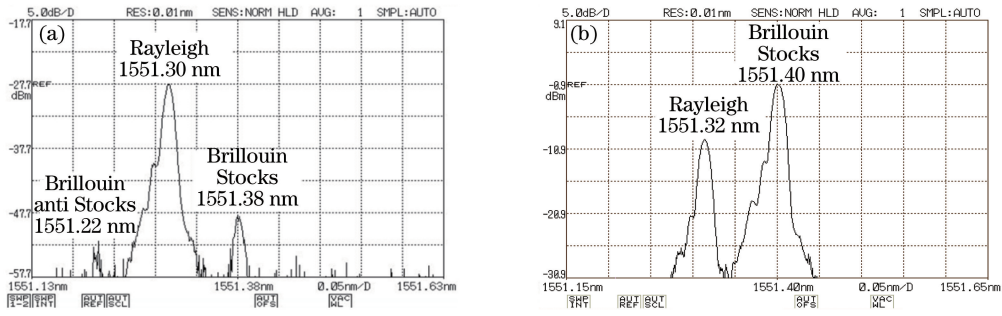


图 8 斯托克斯光激发过程的光谱输出。(a) $P_{in}=2\text{ mW}$; (b) $P_{in}=2.1\text{ mW}$

Fig. 8 Output spectrum of Stocks light in simulated process. (a) $P_{in}=2\text{ mW}$; (b) $P_{in}=2.1\text{ mW}$

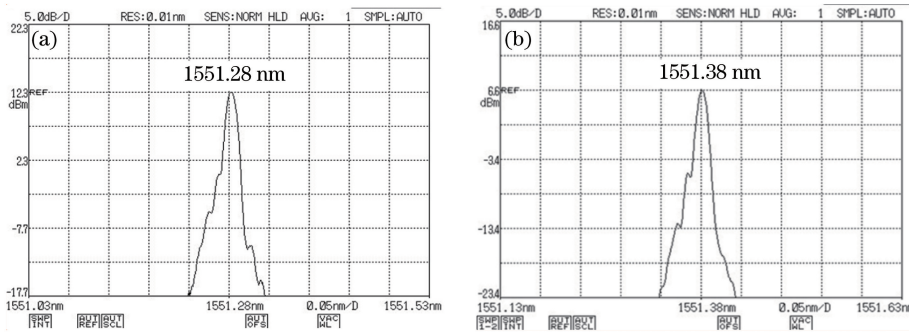


图 9 激光器与频移器输出光谱对比图。(a) 激光器光谱(激光器功率为 17.0 mW); (b) 频移器输出光谱(激光器功率为 2.3 mW)

Fig. 9 Spectrum comparison between laser and frequency shifter. (a) Spectrum of laser ($P_{in}=17.0\text{ mW}$); (b) output spectrum of frequency shifter ($P_{in}=2.3\text{ mW}$)

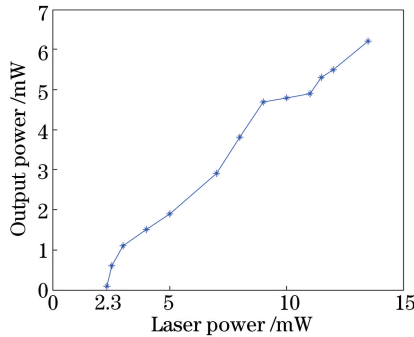


图 10 频移器输出功率特性曲线

Fig. 10 Characteristic curve of output power of frequency shifter

表 2 不同耦合比对应的阈值功率和光-光转换效率

Table 2 Threshold value and light-light conversion efficiency of different coupling ratios

k	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
P_{th}/mW	4.10	3.59	2.92	2.38	2.30	2.33	2.30	2.29	2.30
η	0.40	0.54	0.52	0.49	0.45	0.29	0.16	0.14	0.08

从表 2 可以看到,所设计的 9 km 环形腔频移器在 $k \leq 0.4$ 时阈值功率随着 k 的增大而急剧减小,而在 $k > 0.4$ 之后频移器的阈值功率几乎没有变化,约为 2.3 mW。这是由于频移器腔内的受激布里渊散射随着 k 的增加而增强,到达 $k=0.4$ 之后,受激布里渊散射效应一直处于最强状态。因此,设计的 9 km 单模光纤环形腔频移器在耦合器耦合比为 0.4,光-光转换效率为 49% 时达到最佳工作状态。

5 结 论

基于光纤中的受激布里渊散射理论,设计了具有无源环形腔结构的 9 km 光纤布里渊频移器,分析了光纤布里渊频移器的主要参数及影响因素,包括布里渊增益谱线宽、阈值功率和光-光转换效率等,并得出了仿真结果。建立了相应的实验系统,进行了阈值功率及输出光谱的测量、计算和分析,对理论分析结果进行了验证。光纤布里渊频移器用于 BOTDA 系统,可简化结构、降低成本及提高性能,因此,关于光纤布里渊频移器的理论和实验研究对它在 BOTDA 系统中的实用化具有十分重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Jaaskelainen M. Fiber optic distributed sensing applications in defense, security, and energy[C]. SPIE, 2009, 7316: 731606.
- 2 Chan E H W, Minasian R A. All-optical frequency shifter based on stimulated Brillouin scattering in an optical fiber[J]. IEEE Photonics J, 2014, 6(2): 6600210.
- 3 Zornoza A, Loayssa A. Low-cost Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) distributed sensor setup[C]. SPIE, 2010, 7653: 765334.
- 4 Huang Minshuang, Huang Junfen. Distributed fiber optic Brillouin sensing technique with frequency shifting[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(9): 1428-1432.
黄民双, 黄军芬. 光纤移频分布式布里渊光纤传感技术[J]. 光子学报, 2011, 40(9): 1428-1432.
- 5 Fang Xiuli, Tong Zhengrong, Cao Ye, *et al.* Narrow linewidth ring cavity fiber laser using F-P fiber ring filter[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(2): 329-333.
方秀丽, 童峥嵘, 曹 晔, 等. 采用 F-P 光纤环滤波器的窄线宽环形腔光纤激光器[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 329-333.
- 6 Li Xiaoyan, Su Xianpu, Zhang Shoujun, *et al.* Experimental study of a Brillouin single-mode fiber ring laser[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2010, 21(10): 1462-1465.
李小彦, 苏贤普, 张守军, 等. 布里渊单模光纤环形腔激光器实验研究[J]. 光电子·激光, 2010, 21(10): 1462-1465.
- 7 Zhou Huijuan, Chen Mo, Chen Wei, *et al.* Brillouin-erbium fiber laser with ultra-short ring cavity[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0702010.
周会娟, 陈 默, 陈 伟, 等. 超短环形腔布里渊掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0702010.
- 8 Hu Hongwu, Xiao Pingping. Study on highly stable single-frequency Brillouin fiber laser[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2012, 42(7): 731-736.
胡红武, 肖平平. 高稳定单频 Brillouin 光纤激光器的研究[J]. 中国科学: 物理学、力学、天文学, 2012, 42(7): 731-736.
- 9 Wei Jiaju, Liang Yiping, Dai Teli. The theory and application of stimulated Brillouin scattering in fiber[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2011, 28(5): 68-73.
魏佳菊, 梁一平, 戴特力. 受激布里渊散射对光纤的影响分析[J]. 重庆师范大学学报, 2011, 28(5): 68-73.
- 10 Debut A, Randoux S, Zemmouri J. Linewidth narrowing in Brillouin lasers: theoretical analysis[J]. Phys Rev A, 2000, 62(2): 023803.
- 11 Zhao Lijuan. Analysis and calculation of SBS threshold in single mode fibers[J]. Optical Fiber & Electric Cable, 2009, 3: 24-26.
赵丽娟. 单模光纤受激布里渊散射阈值分析与计算[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2009, 3: 24-26.
- 12 Shen Yichun, Song Muping, Zhang Xianmin, *et al.* Analysis and measurement of stimulated Brillouin scattering threshold in single mode fiber[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(4): 497-499.
沈一春, 宋牟平, 章献民等. 单模光纤中受激布里渊散射阈值研究[J]. 中国激光, 2005, 32(4): 497-499.
- 13 Xiao Shanghui, Li Li. Analysis of multi-parameter effects on the distributed Brillouin threshold in single-mode fiber[J]. Piezoelectric & Acoustooptics, 2009, 31(4): 479-481.
肖尚辉, 李 立. 影响分布式布里渊阈值功率的多参数分析[J]. 压电与声光, 2009, 31(4): 479-481.
- 14 Zhang Hui, Wan Shengpeng, Wang Yuzhi. Stimulated Brillouin fiber-optic ring laser and its analysis for the threshold[J]. Modern Electronics Technique, 2009, 32(14): 127-129.
张 辉, 万生鹏, 王玉枝. 受激布里渊光纤环形激光器及其阈值分析[J]. 现代电子技术, 2009, 32(14): 127-129.
- 15 Yan Fengping, Shan Ying, Jian Shuisheng. Study on threshold power of the fiber source for the stimulated Brillouin scattering fiber optic gyros(SBS-FOG)[J]. Chinese J Lasers, 2000, 27(9): 790-794.
延凤平, 单 英, 简水生. 受激布里渊散射光纤陀螺中光纤光源的阈值光功率研究[J]. 中国激光, 2000, 27(9): 790-

794.

- 16 Stocks L F, Chodorow M, Shaw H J. All-fiber stimulated Brillouin ring laser with submilliwatt pump threshold[J]. Opt Lett, 1982, 7(10): 509-511.
- 17 Bayel P, Giles I P. Evaluation of performance parameters of single-mode all-fiber Brillouin ring laser[J]. Opt Lett, 1989, 14(11): 581-583.
- 18 Zhang Pingping, Yang Yuanhong, Chen Shuying. The optimization on the resonator parameters of efficient Brillouin fiber laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(s): 317-320.
张萍萍, 杨远洪, 陈淑英. 高效布里渊光纤激光器谐振腔参数优化[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(s): 317-320.