

文章编号: 0258-7025(2004)07-0802-05

# 高非线性光纤中受激布里渊散射的抑制和光参量放大

王 青, 刘小明, 王 燕, 蒋俏峰, 周炳琨

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘要** 受激布里渊散射(SBS)的抑制是实现光纤参量放大的重要技术要求,已有文献报道多采用对抽运光进行相位调制的方法,将光功率分散到多个频率分量上来达到这一目的。提出一种二次调相的方法,在已有 2 GHz 相位调制的商品光源上施加 365 MHz 的二次相位调制,将高非线性光纤(HNLF)的受激布里渊散射阈值由未加任何调制时的 10 dBm 至少提高到 23.5 dBm,达到了参量放大的要求。在此基础上,进行了连续波(CW)抽运的光纤参量放大实验。实验中采用长度为 1450 m,非线性系数  $\gamma = 11.9 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ ,色散斜率  $S = 0.0155 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$  的高非线性光纤,使用外腔可调谐激光器(ECL)作为信号光源,小信号增益带宽达到 26 nm(增益 > 10 dB),峰值增益达到 24 dB。同时还观察到了由于非线性拉曼放大作用造成的长波长信号光增益大于短波长信号光增益的不对称性。

**关键词** 光电子学;光纤参量放大;相位调制;受激布里渊散射;非线性

**中图分类号** O 437.2 **文献标识码** A

## Stimulated Brillouin Scattering Suppression and Optical Parametric Amplification in Highly Nonlinear Optical Fiber

WANG Qing, LIU Xiao-ming, WANG Yan, JIANG Qiao-feng, ZHOU Bing-kun

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** Suppression of the stimulated Brillouin scattering (SBS) is an important technology for realization of fiber parametric amplification. Phase modulation is employed in the early literatures to meet this purpose. A new method is proposed that a secondly phase modulation is applied on a modulated optical source. Based on this technique, by adding a 365 MHz phase modulation to the 2 GHz phase modulated laser source, the stimulated Brillouin scattering threshold is improved from 10 dBm to 23.5 dBm. Continuous wave (CW) pump optical parametric amplification is demonstrated experimentally in a 1450 m-long highly nonlinear fiber (HNLF), with the nonlinear coefficient  $\gamma = 11.9 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ , dispersion slope  $S = 0.0155 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ . Using an external cavity laser (ECL) as the signal, 26 nm bandwidth (gain > 10 dB) and 24 dB maximum gain for small signal are obtained.

**Key words** optoelectronics; fiber parametric amplification; phase modulation; stimulated Brillouin scattering; nonlinearity

## 1 引 言

利用光纤中的参量过程,可以实现对光信号的放大、波长变换,或时分复用系统的解复用等功能。近年来,随着光纤非线性特性研究的深入和大功率抽运光源技术的发展,人们对光纤参量放大也进行

了广泛的研究<sup>[1~3]</sup>。光纤参量放大实际上是一种简并的四波混频;通过强光抽运作用下的非线性相互作用,信号光获得增益同时产生和信号光共轭的闲频光。为了得到尽可能好的增益特性,除采用强抽运光之外,还可以采用非线性系数高的光纤,比如,近些年人们推出的一种色散小而非线性系数高的高

收稿日期:2003-04-03;收到修改稿日期:2003-06-23

作者简介:王 青(1979—),男,四川仪陇人,清华大学电子工程系物理电子学专业博士研究生,主要从事光纤中的非线性效应研究。E-mail:win2000@mails.tsinghua.edu.cn

非线性光纤(HNLF)就很适用于光纤参量放大。

研究光纤参量放大时首先遇到的问题是受激布里渊散射(SBS):由于光纤参量过程要求注入的抽运功率比较高,即使在普通单模光纤中也会引起受激布里渊散射,这样,相当一部分抽运光会因为后向散射而损耗掉,大大限制了能够进入光纤的抽运功率和放大性能的提高<sup>[4]</sup>。随着高非线性光纤的使用,受激布里渊散射的问题也显得越为严重。早期的光纤参量放大研究都使用脉冲抽运,除了可以达到高的峰值功率之外,还可以提高产生受激布里渊散射之前允许的注入光功率(即受激布里渊散射阈值);对于连续波抽运参量放大,如果不采取措施抑制抽运光的受激布里渊散射,根本不可能实现。除了采用脉冲抽运的办法之外,人们通常采用对抽运光施加相位调制的办法来抑制受激布里渊散射的影响。已有的研究表明,光纤中的受激布里渊散射阈值跟抽运光的线宽有关<sup>[4]</sup>,对于有多个抽运频率分量的情况,当各个频率之间的距离远大于布里渊增益谱宽时(一般认为受激布里渊散射增益带宽 $<100$  MHz),受激布里渊散射阈值仅取决于功率最高的频率分量,因此,通过相位调制使抽运光功率分散在不同的频率分量上,可以有效提高受激布里渊散射阈值。实际上,除光纤非线性技术之外,采用相位调制办法抑制受激布里渊散射的技术在有线电视

(CATV)技术中已被广泛应用<sup>[5]</sup>。不同的是,一般CATV系统中用到的光载波功率不会太大,抑制受激布里渊散射比较容易实现;但是CATV系统中高功率激光上面有加载信号,因此调相频率必须大于最高载波信号频率的2倍;而光纤参量放大中抽运光功率至少要大一个数量级,对抑制受激布里渊散射的难度要求大大增加,不过参量放大的抽运光没有加载信号,因此对调制频率没有附加的限制。在文献[1]中,Jonas Hansryd等人同时施加100 MHz,310 MHz,910 MHz,2700 MHz四个频率的相位调制,使高非线性光纤的受激布里渊散射阈值提高了15 dB,首次实现了连续波抽运参量放大。在31.8 dBm的抽运光功率和500 m高非线性光纤(非线性系数为 $11.4 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ )的条件下峰值增益达49 dB,增益带宽为55 nm(增益 $>10$  dB)。本文通过实验研究了调相技术对提高光纤受激布里渊散射阈值的作用,采用二次调相措施,仅使用两个频率的调制使高非线性光纤的受激布里渊散射阈值提高了13.5 dB以上,达到了与文献[1]四个频率调制接近的效果。据此,在23.5 dBm的连续波抽运功率和1450 m高非线性光纤(非线性系数为 $11.9 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ )条件下完成了参量放大实验,峰值增益达到24 dB,增益带宽达到26 nm(增益 $>10$  dB)。

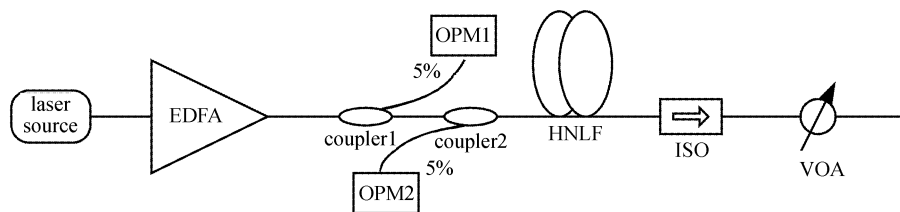


图1 测量受激布里渊散射的实验装置

Fig. 1 Experimental setup for SBS threshold measurement

## 2 二次调相技术对高非线性光纤受激布里渊散射的抑制

研究光纤受激布里渊散射阈值的实验装置如图1所示,该装置用来测定光纤后向散射光功率随着入射光功率的变化关系。激光光源(Laser Source)的输出经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后作为测试光源,通过耦合器 coupler 1 和 coupler 2 输入到待测高非线性光纤。从高非线性光纤输出的光经过可调衰减器(VOA)后进入光谱仪或频谱仪进行测量,隔离器(ISO)用于防止输出端的反射光。coupler 1

和 coupler 2 都是 5:95 的分波器,接在 coupler 1 的 5% 端的光功率计 OPM 1 用于监测掺铒光纤放大器的输出功率,光功率计 OPM 2 用于监测高非线性光纤的后向散射光(受激布里渊散射)功率。高非线性光纤零色散波长  $\lambda_0 = 1548.3 \text{ nm}$ ,在 1550 nm 附近色散斜率  $S = 0.0155 \text{ ps/nm}^2 \cdot \text{km}$ ,光纤非线性系数  $\gamma = 11.9 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ ,长度为 1450 m。coupler 1 和 coupler 2 的总损耗约为 0.5 dB,由于高非线性光纤的模场面积很小,它和 coupler 2 的焊接损耗约为 1.0 dB。掺铒光纤放大器最大输出功率约 25 dBm,实际进入高非线性光纤的最大功率约 23.5 dBm。

分别用一台可调谐激光器(ECL)和一台商用有线电视光源作为测试光源,分别在无相位调制和有相位调制以及二次相位调制的情况下测量高非线性光纤的反向受激布里渊散射功率。图2所示是各种情况下测量得到的后向散射光功率 $P_r$ 随输入功率 $P_{in}$ 的变化,图中 $P_r, P_{in}$ 都是考虑了各种损耗及耦合因素后折合到高非线性光纤输入端的功率。曲线在输入功率比较小时是线性的,对应于光纤中由于瑞利散射等因素产生的反射;当输入功率超过某个临界值,反射功率明显上升,说明受激布里渊散射开始出现,曲线的这一拐点对应于受激布里渊散射阈值。

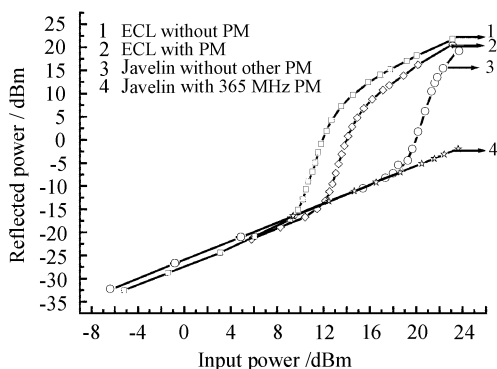


图2 不同输入光条件下1450 m高非线性反射光功率随入射光功率的变化曲线

Fig. 2 Measured reflected power versus input power for 1450 m HNLF under various input conditions

首先用可调谐激光器为光源,它的线宽为300 kHz,波长为1552.8 nm,输出功率为3 dBm;未加调相时,受激布里渊散射的阈值为10 dBm(图2曲线1)。采用铌酸锂波导调制器在可调谐激光器输出上加频率为2.5 GHz,调相指数 $\beta_{PM}$ 为1的相位调制后,受激布里渊散射的阈值变为12 dBm,提高了约2 dB(图2曲线2)。采用外差法(heterodyne)通过频谱仪(ESA)在OPM 1的位置测量调相后可调谐激光器的输出频谱如图3(a)所示,图中功率最大的中央谱峰对应于可调谐激光器原来的频率,其他次峰是调相后新产生的频率分量。外差测量中本地振荡光源用的是另一台窄线宽可调谐激光器,线宽约为100 kHz。从图3(a)可以看出,通过调相将部分抽运功率分摊到其他频率上,而且频率间隔大于受激布里渊散射增益带宽,所以受激布里渊散射阈值有所提高。受实验条件所限,达到的调相指数比较小,当输入功率大于12 dBm后受激布里渊散射反射仍然严重。然后,用ATX Telecom Systems

公司专为有线电视系统设计的商品Javelin 1.5-trnu光发射机(以下简称Javelin发射机)取代可调谐激光器重复上述实验,测量结果如图2曲线3所示,相应受激布里渊散射阈值为19 dBm。Javelin发射机波长为1552.9 nm,输出功率为8 dBm,具有内置相位调制抑制受激布里渊散射的功能,通过外差法得到Javelin发射机的输出频谱如图3(b)所示。

为了进一步提高受激布里渊散射阈值以满足光纤参量放大的要求,对Javelin发射机的输出进行再次相位调制。Javelin发射机二次调相以后的频谱如图3(c)所示。对比图3(b)和图3(c)可见,由于二次调相产生了更多新的频率分量,降低了原有谱线的功率,因而受激布里渊散射阈值得到进一步提高。图2曲线4所示是对Javelin发射机进行二次调相时反射功率随输入功率变化的曲线,其中二次调相频率 $f_{PM} = 365$  MHz,调相指数 $\beta_{PM} = 1$ 。可以看出,受激布里渊散射的阈值由原来的19 dBm至少提高到了23.5 dBm,在能达到的抽运功率范围内很好地抑制了受激布里渊散射。

值得说明的是,为了获得尽可能高的参量放大特性,采用了小色散的高非线性光纤;而当采用经过二次调相、拥有众多频率分量的光作为抽运光的时候,高非线性光纤中强烈的四波混频作用会导致抽运光频率分量进一步发生变化。图3(d)和图3(e)分别是施加二次调相后的Javelin发射机的输出在高非线性光纤前、后的频谱,其中二次调相频率 $f_{PM} = 365$  MHz,调相指数 $\beta_{PM} = 1$ ,即与测量图2曲线4时的条件相同。为清楚起见,图3(d)和(e)只选取了频谱图的一部分,图中最高的谱峰①,②,③对应于Javelin发射机原有初次调相后的谱线,次高峰④,⑤,⑥,⑦,⑧,⑨与主峰频率相差约365 MHz,是二次调相所致。对比图3(d)和(e)发现,经过高非线性光纤后各谱线的相对高度确实发生了变化。特别是原有最高谱峰的高度进一步降低是使受激布里渊散射阈值下降的原因之一。

### 3 连续波抽运高非线性光纤参量放大

光纤参量放大的实验装置如图4所示。其中,Pump LD即Javelin发射机的输出光经过两级掺铒光纤放大器放大以后作为参量放大的抽运光,波长为1552.9 nm。可调谐激光器的输出光作为参量放大的信号光。通过比较开/关抽运(即有抽运光 and 没

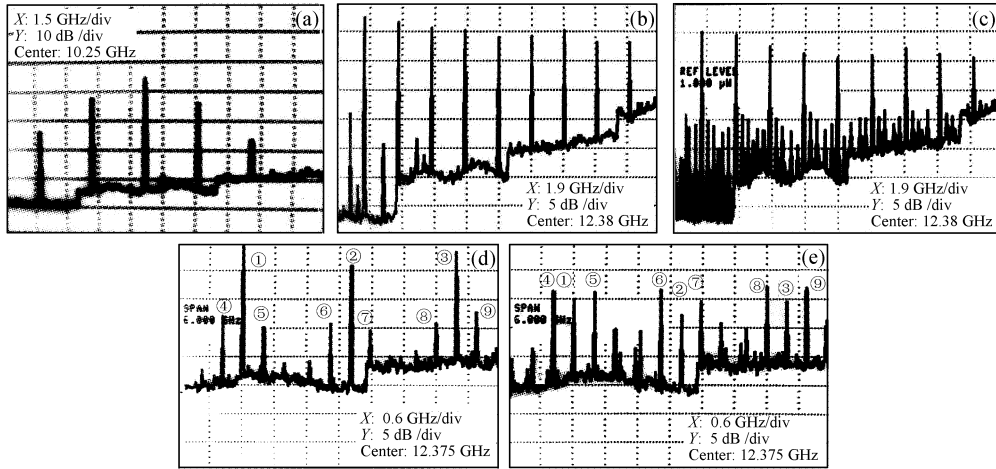


图 3 (a)可调谐激光器经过一次调相以后的频谱,调相频率  $f_{PM} = 2.5$  GHz,调相指数  $\beta_{PM} = 1$ ; (b) Javelin 发射机的输出频谱; (c) Javelin 发射机的输出经过二次调相后的频谱,调相频率  $f_{PM} = 365$  MHz,调相指数  $\beta_{PM} = 1$ ; (d) Javelin 发射机二次调相后频谱的精细结构,调相频率  $f_{PM} = 365$  MHz,调相指数  $\beta_{PM} = 1$ ; (e) 施加了二次调相的 Javelin 发射机输出经过高非线性光纤后的频谱精细结构,调相频率  $f_{PM} = 365$  MHz,调相指数  $\beta_{PM} = 1$

Fig. 3 (a) ECL output spectrum after phase modulation,  $f_{PM} = 2.5$  GHz,  $\beta_{PM} = 1$ ; (b) Output spectrum of Javelin transmitter which has build-in phase modulation for SBS suppression; (c) Spectrum of Javelin transmitter after the second phase modulation,  $f_{PM} = 365$  MHz,  $\beta_{PM} = 1$ ; (d) Fine spectrum of double phase modulated Javelin transmitter,  $f_{PM} = 365$  MHz,  $\beta_{PM} = 1$ ; (e) Fine spectrum of double phase modulated Javelin transmitter after HNLFF,  $f_{PM} = 365$  MHz,  $\beta_{PM} = 1$

有抽运光)前后输出端信号光功率,得到参量放大的增益。调节信号波长,重复以上步骤,可得到该抽运水平下的一条增益谱。相位调制器(PM)用于对 Javelin 发射机的输出光进行进一步二次调制, EDFA1 输出功率约为 18 dBm, EDFA2 输出功率约为 25 dBm。光带通滤波器(BPF)用于滤除 EDFA1 输出端抽运波长以外的放大自发辐射光(ASE)。两个 5:95 的耦合器一个用于抽运光功率的监测,另一个用于抽运光和信号光的耦合。偏振控制器 PC1 使 Javelin 发射机的输出光与相位调制器 PM 的偏振方向一致以获得有效相位调制, PC2 控制信号光的偏振方向与抽运光一致以获得最大参量增益。用作参量增益的高非线性光纤同上,由于两个 5:95 的耦合器及焊点损耗,进入高非线性光纤的最大抽运功率约 23.5 dBm。从高非线性光纤的输出经过一个可调衰减器(VOA)后送入光谱仪(OSA)进行测量。

图 5(a)所示是当信号功率为 -7 dBm, 波长位于 1560.0 nm, 有抽运光时在光谱仪上测得的一个输出光谱。抽运光波长为 1552.9 nm, 调制频率  $f_{PM} = 365$  MHz, 调相指数  $\beta_{PM} = 1$ , 抽运光短波边与信号光对称的是参量过程产生的闲频光, 其波长为

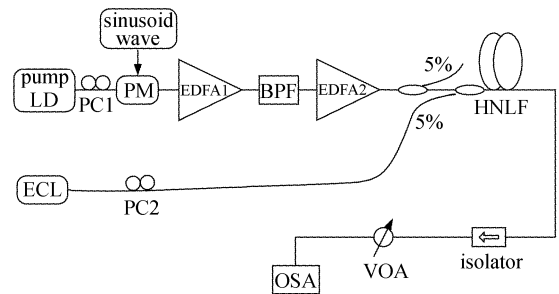


图 4 参量放大实验装置

Fig. 4 Experimental setup of the parametric amplifier

1545.9 nm, 离抽运光更远处还有由更高阶混频过程产生的两个小峰, 分别在 1539 nm 和 1567 nm 附近。增益谱的测量结果如图 5(b) 所示, 图中曲线是相应的数值模拟结果以便对比。可以看到, 增益谱形状是关于抽运波长对称的两个峰, 由于受激拉曼散射功率转移的影响, 长波边的增益比短波边略高。短波边和长波边的增益峰值分别为 23.4 dB 和 24.0 dB, 峰值分别落在 1544 nm 和 1562 nm 附近。按增益大于 10 dB 计算, 总带宽为 26 nm (1540 ~ 1566 nm)。

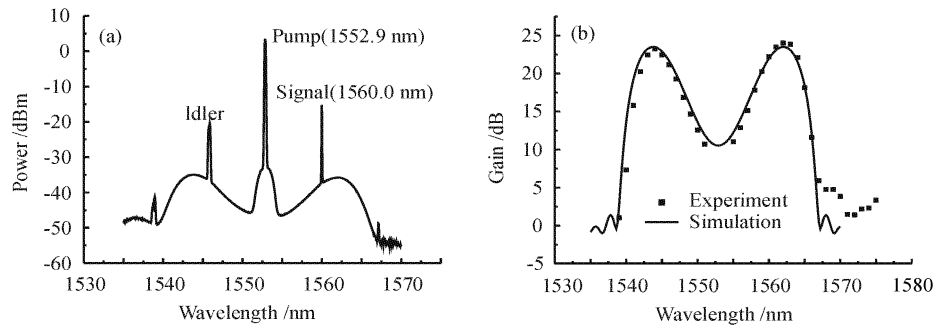


图 5 (a) 参量放大输出光谱;(b) 参量放大增益谱(实线代表数值计算结果,离散的数据点是实测结果)  
Fig. 5 (a) One of the output optical spectrum of the parametric amplifier; (b) Measured gain spectrum of the optical parametric amplifier (solid line denotes calculated result, discrete dots denote the experimental data)

## 4 结 论

采用二次调相技术将高非线性光纤的受激布里渊散射阈值从 10 dBm 提高到 23.5 dBm 以上,据此完成了高非线性光纤连续光抽运的光参量放大实验,小信号最大增益 24 dB,增益带宽 26 nm(增益 > 10 dB)。

**致谢** 感谢 OFS 公司提供的高非线性光纤和有益的讨论。

### 参 考 文 献

1 J. Hansryd, P. A. Andreson. Broad-band continuous-wave-pumped fiber optical parametric amplifier with 49-dB gain and

wavelength-conversion efficiency [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(3):194~196

2 M.-C. Ho, K. Uesaka, M. Marhic *et al.*. 200-nm bandwidth fiber optical amplifier combining parametric and Raman gain [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(7):977~981

3 L. Provino, A. Mussot, E. Lantz *et al.*. Broadband and flat parametric gain with a single low-power pump in a multi-section fiber arrangement [C]. *Proc. Optical Fiber Communication, OFC'2002*, TuS2. 125~126

4 D. A. Fishman, J. A. Nagel. Degradations due to stimulated Brillouin scattering in multigigabit intensity-modulated fiber-optic systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(11):1721~1728

5 Yang Jianliang, Zha Kaide. Two signal phase modulation for SBS suppression in optical fiber CATV transmission system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(8):724~728

杨建良,查开德. 光纤 AM-CATV 外调制传输系统中双频调相抑制 SBS 的理论分析[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(8):724~728