

文章编号: 1001-3806(2004)04-0383-04

# 高性能光纤参量放大器的设计与应用

曹 辉, 陈国杰

(佛山科学技术学院 物理学系, 佛山 528000)

摘要: 近年来, 光纤参量放大的发展非常迅猛。分析了提高光纤参量放大增益、扩展带宽、降低偏振灵敏度的几种重要方法, 并就光纤参量在分立式集中放大、透明的波长转换、归零脉码生成、OTDM 开关、全光抽样、可擦除全光缓存、3R 再生等方面的典型应用进行了全面综述。光纤 OPA 在 DWDM 系统、全光网等领域将有非常广泛而重要的运用。

关键词: 光纤参量放大器; 相位匹配; 参量过程; 四波混频

中图分类号: TN253 文献标识码: A

## Design and application of high performance fiber optical parametric amplifier

CAO Hui, CHEN Guojie

(Department of Physics, Foshan University, Foshan 528000, China)

Abstract: Development of fiber optical parametric amplifier(OPAs) is very fast in recent years. On one hand, this paper analyzes several important efficient techniques for improving the peak gain, expanding the gain bandwidth, reducing the polarization sensitivity of fiber OPAs. On the other hand, some typical applications such as lumped amplifying, transparent wavelength conversion, RZ pulse generation, OTDM switch, all optical sampling, all optical erasable storage buffer, 3R regeneration are fully summarized. Fiber OPAs would be abroad and significantly used in DWDM and all-optical net(AON).

Key words: fiber optical parametric amplifier; phase matching; parametric process; four wave mixing

### 引 言

基于光纤非线性效应的光纤参量放大器(OPA)近年来得到广泛研究。光纤 OPA 以其高增益(小信号近似时, 与抽运功率成指数关系)、宽带宽(可以在光通信范围内全波段工作)、具有相敏特性(可实现 0dB 自发辐射噪声放大)、产生闲频带(在放大信号的同时可进行波长转换)等显著优点在光通信领域引起了人们的关注<sup>[1-3]</sup>。随着研究的深入, 光纤 OPA 技术得到迅猛发展。利用光纤 OPA, 可以实现光通信中绝大部分全光操作, 如光信号放大、波长转换、全光抽样、光开关、光脉冲生成、光解复用、脉冲压缩、3R 再生、全光缓存等<sup>[4-7]</sup>。可见, 光纤 OPA 在 DWDM 系统、全光网等领域将有非常广泛而重要的运用。下面将介绍高性能光纤 OPA 的各种设计方法及其在光通信中的应用。

### 1 高性能光纤 OPA 设计技术

光纤 OPA 的内在机理是高效的四波混频(FWM), 而简并的 FWM 更容易满足相位匹配条件, 故通常采用的光纤 OPA 结构见图 1, 耦合至参量放大增益光纤的只有强抽运光和弱信号光, 在  $z=0$  处

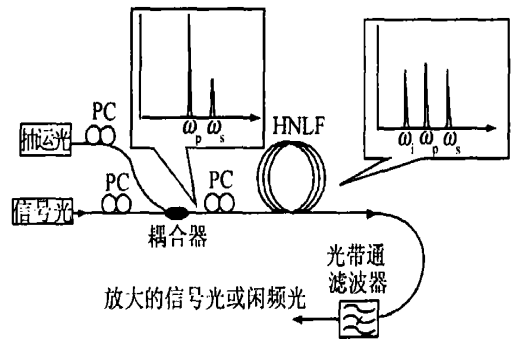


图 1 光纤参量放大原理示意图

PC—偏振控制器 HNLF—高非线性光纤

可认为闲频光为 0, 但在很小的一段传播距离内就会产生闲频光。这种结构的光纤 OPA 其峰值信号增益, 以分贝为单位可写成:

$$G_{dB} = 10 \lg[\exp(2\sqrt{P_p L})/4] = P_p L S_p - 6 \quad (1)$$

作者简介: 曹 辉(1973), 男, 博士研究生, 讲师, 目前主要从事光纤通信中非线性效应和光有源器件的研究。

E-mail: foshancaohui@sina.com

收稿日期: 2003-09-25; 收到修改稿日期: 2003-11-20

式中,  $S_p = 10 \lg[\exp(2)] \gamma \approx 8.7 \gamma$  为参量增益斜率, 单位为 dB/W/km,  $\gamma$  为光纤的非线性系数,  $L$  为光纤长度,  $P_p$  为抽运光功率; 若将光纤 OPA 带宽定义为两峰值增益间的宽度, 则带宽取决于严格相位匹配时抽运光波长  $\lambda_p$  与信号光波长  $\lambda_s$  之差。由严格相位匹配条件可得:

$$\lambda_p - \lambda_s = \frac{\sqrt{\frac{\gamma P_p}{\frac{\pi}{\lambda_0^2} \frac{dD}{d\lambda} (\lambda_p - \lambda_0)}}}{\sqrt{\frac{\ln(4G_s)}{\frac{2\pi}{\lambda_0^2} \frac{dD}{d\lambda} (\lambda_p - \lambda_0) L}}} \quad (2)$$

式中,  $\lambda_0$  为零色散波长。

目前, 光纤 OPA 的设计已经发展了多种高效技术, 主要有准相位匹配 (quasi phase matching)、双重抽运、采用高非线性光纤 (HNLF) 和多孔光纤 (holey fiber)、采用环形结构、层叠结构、近零色散波长抽运、零色散波长分布、偏振分集等, 以达到提高峰值增益、拓展平坦带宽、降低偏振灵敏度的目的。下面结合实例进行具体的分析。

### 1.1 提高峰值增益

虽然 20 多年前就开始光纤 OPA 的实验研究, 但直到近两年, 高非线性光纤 (HNLF) 的出现和使用才真正使 OPA 在光通信波长范围得到净增益。一个综合运用多种方法提高峰值增益的光纤 OPA 实验装置见图 2<sup>[1]</sup>。其突出特点是: (1) 采用高非线

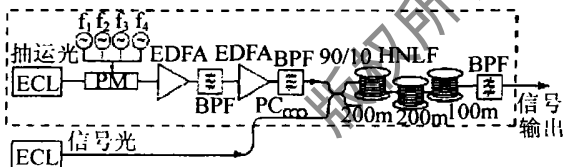


图 2 连续光抽运的 39dB 净信号增益光纤 OPA 实验装置

EDFA—掺铒光纤放大器 ECL—外腔谐振激光器 PM—相位调制器  
BPF—光带通滤波器 PC—偏振控制器 HNLF—高非线性光纤

性光纤,  $\gamma = 11 \text{W}^{-1} \text{km}^{-1}$ , 比普通光纤的非线性系数高 4 倍~5 倍; (2) 用连续波抽运, 实现对比特率完全透明, 无需同步, 减小 SPM 和 XPM 的影响; (3) 采用众多手段提高增益光纤的注入功率。除用 EDFA 进行抽运光功率放大外, 还采用 3 种方法将 SBS 阈值提高 15dB, 达到 32.2dB, 包括: (1) 将 HNLF 紧绕在铁柱上产生张力以提高布里渊增益带宽; (2) 将每个铁柱恒定在不同温度以在光纤中产生温度分布来提高布里渊增益带宽; (3) 通过相位调制 (PM) 来扩展抽运光频谱从而提高 SBS 阈值。HANSRYD 等人报道用 500m HNLF 光纤 OPA 获得 39dB 净增益<sup>[1]</sup>。

增加光波相互作用的光纤长度似乎是提高峰值增益的有效手段。事实上, 如果简单地增加 OPA 增益光纤的长度会导致相位失配和增益随长度的周期性变化。最近, KIM 等人<sup>[8]</sup>借用二次谐波生成中惯用的准相位匹配 (QPM) 技术, 在增益达到最大处中止 OPA 过程并进行相移以达到相位匹配, 然后再进行参量放大, 采用这种层叠结构在色散位移光纤 OPA 中将增益提高了 12dB。

采用非线性系数大的光纤是提高峰值增益的重要途径。表 1 中给出了 5 种光纤典型参数的测量或计算值。可见, 如果将  $\gamma = 50 \text{W}^{-1} \text{km}^{-1}$  的多孔光纤用作 OPA 增益光纤, OPA 增益将进一步提高。但同时这种光纤的插接、损耗、偏振模色散和色散系数的调整都面临挑战。

表 1 5 种光纤的典型参数比较

| 光纤  | SMF | DSF | DCF  | HNLF | ASMF   |
|---|-----|-----|------|------|--------|
| 损耗/(dB km <sup>-1</sup> )   | 0.2 | 0.2 | 0.45 | 0.7  | 80~240 |
| 有效纤芯面积<br>$A_{\text{eff}}/\mu\text{m}^2$                            | 85  | 50  | 19   | 12   | 3      |
| 1550nm 处非线性系数<br>$\gamma/(\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1})$      | 1.8 | 2.7 | 5    | 15   | 50     |
| 参量增益斜率<br>$/( \text{dB} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1} )$ | 16  | 23  | 44   | 131  | 435    |

注: SMF—单模光纤, DSF—色散位移光纤, DCF—色散补偿光纤, HNLF—高非线性光纤, ASMF—空气硅微结构光纤 (多孔光纤)

### 1.2 拓宽带宽

由 (2) 式知, 光纤长度是影响带宽的一个重要参数, 若保持  $\gamma P_p L$  不变, 即峰值增益不变, 放大器的带宽将随  $L$  的减小而增加。通常光纤中的功率是一个限制因素, 因此可以使用短的 HNLF 来减小  $L$  增加  $\gamma$ , 达到保持峰值增益一定而增加带宽的目的。最近 HO 等<sup>[9]</sup>报道了用 20m HNLF 获得 200nm 带宽的光纤 OPA。

第 2 个重要参数是光纤的零色散波长  $\lambda_0$ 。图 3 为计算得到的光纤 OPA 抽运光波长取不同值时的信号增益谱, 各参数取值如下:  $P_p = 1.4 \text{W}$ ,  $L = 500 \text{m}$ ,  $\gamma = 11 \text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,  $\lambda_0 = 1559 \text{nm}$ ,  $\lambda_p = 1560 \text{nm}$  (虚线); 1559.5nm (实线),  $\frac{dD}{d\lambda} = 0.03 \text{ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ , 可见在一定的条件下, 光纤 OPA 可以获得很大的信号增益和带宽。

由 (2) 式和图 3 可知, 使抽运波长靠近  $\lambda_0$  可提高信号带宽。而且实际光纤的  $\lambda_0$  是沿光纤长度稍有变化, 相对固定的  $\lambda_0$  而言, 这将拓宽增益带宽而

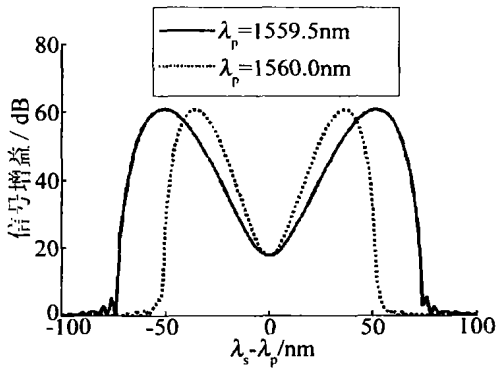


图3 光纤参量放大增益谱计算值

使峰值增益下降。可见通过巧妙设计光纤  $\lambda_0$  的变化能平坦和拓宽增益带宽, HANSRYD 等<sup>[1]</sup> 通过实验发现, 使  $\lambda_0$  按递增排列可获得最大的带宽和增益。

第3个重要参数是光纤的色散斜率  $dD/d\lambda$ 。由(2)式知减小色散斜率能提高信号带宽。有一种巧妙地间接减小色散斜率的方法, 即采用准相位匹配技术(QSM)<sup>[8]</sup>, 通过周期性的接入色散补偿光纤来补偿相位失配的积累, 从而设计出小色散斜率的非线性介质, 提高信号带宽。

另一个必须考虑的因素是双折射的存在, 将破坏抽运光和信号光偏振方向相同的特性, 影响增益和带宽。对此, YANG 等人<sup>[10]</sup> 报道用偏振方向相互垂直的双重抽运技术, 并使两列抽运光关于零色散波长对称, 通过多级非简并、简并四波混频可获得平坦的指数增益。

总之, 一些关键参数, 如高抽运功率、高非线性系数、短光纤、近零色散波长抽运、低色散斜率等有利于获得高增益和宽带宽。

### 1.3 降低偏振灵敏度

光纤OPA的偏振敏感性是其在光通信系统中得到应用的主要障碍。目前, 降低光纤OPA偏振灵敏度的方法主要有两种: (1) 单光源抽运时, 采用偏振分集的方法, 即用偏振分光器将OPA增益光纤组成环形结构, 环内采用保偏光纤或进行偏振控制, 可得到单光源抽运偏振无关OPA。ISLAM 等人<sup>[3]</sup> 用此方法进行实验, 实现在 30nm 波长转换带宽内偏振灵敏度小于 0.65dB, 比非环形结构提高 2dB。(2) 双重抽运时, 控制两列抽运光使偏振态相互正交、抽运功率相等。最近, WONG 等<sup>[11]</sup> 报道用这一方法使平均 15dB 的信号增益随偏振态的变化为  $\pm 0.5$ dB。偏振灵敏度的进一步降低, 需要使用保偏高非线性光纤(PM-HNLF), 以消除与温度和应力有关的双折射, 从而更好地抑制增益的抖动。

## 2 应用的发展

### 2.1 分立式集中放大器

光纤OPA最直接的应用是作为分立式集中放大器, 它由于具有大的微分增益, 很适合于分立式的集中放大。HANSRYD 等<sup>[1]</sup> 用连续光抽运的OPA获得平均 35dB、峰值达 39dB 的信号净增益, 若用二向色耦合器代替 10dB 耦合器, 还可将峰值增益提高到 49dB, 它可很好地用于中跨度光再放大。

OPA的一个突出特点是能在EDFA带宽范围 1530nm~ 1600 nm 之外进行光放大, 以进一步提高DWDM通信系统的容量。利用OPA信号增益范围依赖于可灵活选择的抽运波长, 且在抽运光波长附近也有增益的特点, AKASAKA 等<sup>[12]</sup> 综合喇曼放大和OPA实现了在S波段20 nm 带宽内获得 18dB 信号增益。

### 2.2 透明的波长转换

利用可调连续波抽运的光纤OPA可进行波长转换, 并具有对比率透明、转换效率高、转换间距大(可从C波段转换到S波段或L波段)等特点, 特别适合在DWDM系统中应用。HANSRYD 等<sup>[8]</sup> 报道了抽运光 24nm 范围内可调、波长转换带宽 61nm 的可调波长转换器; ISLAM 等<sup>[3]</sup> 用OPA完成了WDM中C波段向S波段的转换, 转换效率大于 4.7dB, 转换波带宽 30nm, 信道间串音小于 -27dB。因此, 用连续光抽运实现对比率透明, 用偏振分集的方法降低偏振灵敏度, 而相敏OPA的理论ASE噪声系数为 0dB, 可满足波长转换器低串音的要求。光纤OPA在这方面的应用具有相当大的吸引力。

### 2.3 归零脉码生成

当OPA工作在相位匹配条件下, 具有与抽运功率成指数关系的增益。若采用正弦型强度调制的抽运光, OPA的增益将随抽运功率周期性变化。图4

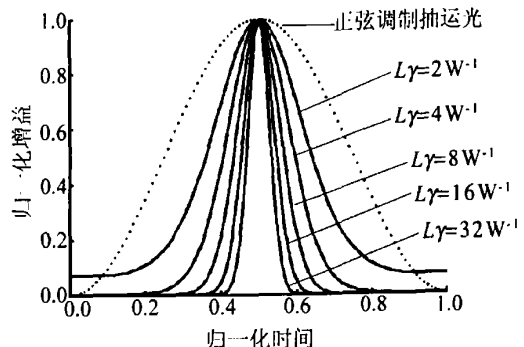


图4 正弦型调制抽运OPA归一化增益时间曲线随LY变化的计算结果

中<sup>[5]</sup>给出一组在  $L_V$  取不同值时一个周期内归一化增益系数变化曲线。对大的  $L_V$ ,  $G \gg 1$ , 图 4 中曲线近似为高斯型, 参量放大器可视为光开关, 在 FWHM 内放大, 而在 FWHM 外透明, 不起放大作用, 从而生成归零脉码。HANSRYD 等<sup>[5]</sup>完成了用单个正弦调制的抽运光生成 40GHz 脉冲的实验, 在信号和闲频光中都可得到几乎无转换限制、高功率、无振幅和时间抖动的 40GHz 脉冲, 在 37nm 波长宽度可调, 脉宽 2ps~4ps, 抽运光平均功率在 700mW~1.05W 之间变化时, 平均信号输出功率在 -9dBm~15dBm 间变化。与采用非线性光纤环路镜相比, 用光纤 OPA 进行脉冲生成和波长转换具有很大的优越性。

## 2.4 O-TDM 开关

调制抽运的 OPA, 由于具有很窄的增益时间窗系数, 可作为超快 O-TDM 开关。方法是周期性的放大或波长转换预定信道上的信号。HANSRYD 等<sup>[4]</sup>报道用 10GHz 正弦调制的抽运光来解复用  $4 \times 10\text{Gbit/s}$  O-TDM 信号, 信号净增益达 30dB, 其 BER 斜率甚至比接收器的热极限 BER 斜率还小。这是由于 OPA 对 ASE 有抑制作用而表现出独特而良好的性能。

## 2.5 全光抽样

光信号的直接监控, 对未来的超快光通信系统而言是相当重要的。全光抽样使实时评价接收到的高比特率信号成为可能。OPA 应用于全光抽样跟应用于 O-TDM 开关的原理相似, 只是在全光抽样时重点在于取出闲频光信号并使之可视化。LI 等<sup>[6]</sup>用光纤 OPA 全光抽样突发的 O-TDM 信号, 速率为 160Gbit/s, 200Gbit/s, 或 300Gbit/s, 生成的闲频脉冲用带宽为 125MHz 的成像设备探测, 得到抽样信号的眼图。在信号最小输入峰值功率为 10mW 时, 信噪比大于 20dB, 并具有抽样时间短(0.2ps)、无需时钟恢复的特点。

## 2.6 可擦除全光存储缓冲器

高速光网络的实现依赖于一些关键技术, 例如高速率调制光源、光交换机、时钟恢复、波长转换器、光存储缓冲器等。在一些特殊情况下, 例如速率转换时, 光存储缓冲器显得尤为重要。相敏 OPA 由于具有增益稳定、0dB 噪声系数、低时间抖动等特性而非常适合于再放大。AGARWAL 等<sup>[7]</sup>实现了用相敏参量放大存储和读取 1Gbit/s 的数据包(包含皮秒脉冲)。该缓冲器的可擦除性是运用一个非线性光纤环路镜作为全光开关而实现的。

## 2.7 3R 再生

DWDM 使网络速率达到 Tbit/s, 但随着信道数目和单信道比特率的增加, 由于 XPM, SRS, FWM 等非线性效应产生的抖动和信道间的串音、ASE 噪声、PMD 等限制了传输距离和网络规模。因此需要放大、整形、再定时, 即 3R 再生来突破这一限制, 从网络的观点看, 为实现网络重构和无阻塞, 在 3R 再生的同时进行波长转换有时也是必要的。SU 等人<sup>[12]</sup>用 OPA 实现信号放大和整形, 而用锁相环实现再定时, 并利用光纤 OPA 在放大的同时具有波长转换的功能特点, 将再生的数据波长转换了 15nm。与其它将光学门和时钟恢复分两个分立模块的 3R 再生方案相比, 它具有结构新颖、简单的优点, 并在进行 3R 再生的同时实现了波长转换。

## 3 光纤 OPA 前景展望

光纤 OPA 性能的提高主要源于高非线性光纤的发展和功率半导体激光器的应用, 光纤 OPA 的进一步发展也有待于这些领域的进一步发展, 特别是多孔光纤非常适合于这一应用。虽然光纤 OPA 的研究才初步展开, 还远未达到实用的阶段, 但光纤 OPA 的 0dB ASE 噪声、产生闲频光、指数型增益、增益波段可灵活设计等特征使其功能众多、应用灵活, 光纤 OPA 在 DWDM 系统中的应用具有诱人的前景。

### 参 考 文 献

- [1] HANSRYD J, ANDREKSON P A. Broad-band continuous-wave-pumped fiber optical parametric amplifier with 49dB gain and wavelength conversion efficiency [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2001, 13 (3): 194~196.
- [2] MARHIC M E, KAGI N, CHIANG T K *et al.* Broadband fiber optical parametric amplifiers [J]. Opt Lett, 1996, 21: 573~575.
- [3] ISLAM M N, BOYRAZ O. Fiber parametric amplifiers for wavelength band conversion [J]. IEEE J Selected Topics in Quantum Electronic, 2002, 8 (3): 527~537.
- [4] HANSRYD J, ANDREKSON P A. Wavelength tunable 40GHz pulse source based on fiber optical parametric amplifier [J]. Electron Lett, 2001, 37 (4): 584~585.
- [5] HANSRYD J, ANDREKSON P A. O-TDM demultiplexer with 40dB gain based on a fiber optical parametric amplifier [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2001, 13 (7): 732~734.
- [6] LI J, HANSRYD J, HEDEKVIST P O *et al.* 300Gbit/s eye diagram measurement by optical sampling using fiberbased parametric amplification [J]. OFC, 2001, 4: PD3f-1~PD3f-3.
- [7] AGARWAL A, WANG L J, SU Y K *et al.* All optical erasable storage buffer based on parametric nonlinearity in fiber [J]. OFC, 2001, 4: ThH5-1~ThH5-3.

在  $\beta_2 = -\beta_1 > 0$  时, (13) 式成立的条件为  $\Omega_{c_1}^2 + \Omega_{c_2}^2 < 4\Omega_{c_1}\Omega_{c_2}$ , 此时扰动增益为(7)式。易看出, (13)式成立时, 必然有:  $f_1 f_2 > C_{XPM}$ 。

### 3 结论

详细分析光纤中两光波交叉相位调制不稳定性的结果表明, 文献[1]~[3]中关于 XPM 产生的必要条件为  $f_1 f_2 < C_{XPM}$ , 增益谱公式为  $g_1(\Omega)$  的结论只对两光波同在正色散区或同在负色散区时才是唯一的。当一光波处于正色散区, 而另一光波处于负色散区时, 由于(4)式中内根号可能为实数也可能为虚数, 使问题变得复杂。研究表明, 无论在  $f_1 f_2 < C_{XPM}$  还是在  $f_1 f_2 > C_{XPM}$  的情形下均可能产生调制不稳定, 而且不稳定增益有 3 种可能的形式, 甚至还可能出现在某一调制频率区域内有两个不稳定增益的情形。以  $\beta_2 = -\beta_1 > 0$  为例, 在内根号为实数的情况下, 发生不稳定的条件是: 两光波参数须满足  $\Omega_{c_1}^2 + \Omega_{c_2}^2 > 4\Omega_{c_1}\Omega_{c_2}$  和  $\Omega_{c_1}^2 > \Omega_{c_2}^2$ , 扰动频率须满足  $0 < \Omega^2 < \Omega_2^2$ 。此时, 调制不稳定又分以下两情况: (1) 如果扰动频率满足  $0 < \Omega^2 < \Omega_1^2$ , 扰动增益有两种, 即  $g_1(\Omega)$  和  $g_2(\Omega)$ ; (2) 如果扰动频率满足  $\Omega_1^2 \leq \Omega^2 < \Omega_2^2$ , 那么增益为  $g_2(\Omega)$ 。在内根号为虚数的情况下, 发生调制不稳定的条件是两光波参数满足  $\Omega_{c_1}^2 + \Omega_{c_2}^2 < 4\Omega_{c_1}\Omega_{c_2}$ , 此时扰动增益为  $g_3(\Omega)$ 。

初步研究了增益系数的规律, 结果表明: 光波参数相同时,  $g_2(\Omega)$  的谱峰和谱宽均大于  $g_1(\Omega)$ , 但随着处于正色散区的那一光波的入射光功率  $P_2$  的增大, 2 个增益谱的差异减小;  $g_2(\Omega)$  和  $g_1(\Omega)$  随处于正色散区的那一光波的入射光功率  $P_2$  的变化规律不同,  $g_1(\Omega)$  随  $P_2$  的减小而增大,  $g_2(\Omega)$  随  $P_2$  的增大而增大; 在微扰频率给定时,  $g_2(\Omega)$  和  $g_1(\Omega)$  均要求  $P_2$  在一很小范围内取值, 且数值上  $P_2$  比  $P_1$  小得多。当扰动增益系数为  $g_3(\Omega)$  时, 只要光纤中稍

有扰动, 就会导致原两光波的不稳定。

最后需要补充说明的是: 上面的讨论只是对  $\beta_2 = -\beta_1 > 0$  这种简单情况进行的, 如果  $\beta_2 \neq -\beta_1$ , 情况会复杂些。若再考虑到损耗、高阶色散、高阶非线性效应、群速度失配等因素影响的话, 那么 XPM 所致 MI 的条件和相应的扰动功率增益系数会变得更加复杂。

### 参考文献

- [1] AGRAWAL G P. Modulation instability induced by cross phase modulation [J]. Phys Rev Lett, 1987, 59(8): 880~883.
- [2] AGRAWAL G P. Modulation instability induced by cross phase modulation in optical fibers [J]. Phys Rev, 1989, A39(7): 3406~3413.
- [3] AGRAWAL G P. 非线性光纤光学原理及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002. 165~183.
- [4] ROTHENBERG J E. Modulation instability of copropagating frequencies for normal dispersion [J]. Phys Rev Lett, 1990, 64(7): 813~814.
- [5] 杨爱玲, 王晶, 苗洪利 *et al.* 色散缓变光纤中交叉相位调制不稳定增益谱 [J]. 激光技术, 2003, 27(1): 44~46.
- [6] WABNITZ S. Modulation polarization instability of light in a nonlinear birefringent dispersive medium [J]. Phys Rev, 1988, A38(4): 2018~2021.
- [7] CAVALCANTI S B, CRESSONI J C, da CRUZ H R *et al.* Modulation instability in the region of minimum group velocity dispersion of single mode optical fibers via an extended nonlinear Schrödinger equation [J]. Phys Rev, 1991, A43(11): 6162~6165.
- [8] KUMAR S, SELVARAJAN A, ANAND G V. Nonlinear copropagation of two optical pulses of different frequencies in birefringent fibers [J]. JOSA A, 1994, B11(5): 810~817.
- [9] 王晶, 冯占民, 苗洪利 *et al.* 交叉相位调制产生调制不稳定性的基态增益谱 [J]. 光电子·激光, 2000, 11(1): 83~85.
- [10] 徐文成, 罗爱平, 郭旗 *et al.* 色散缓变光纤中的调制不稳定性分析 [J]. 光学学报, 2000, 20(10): 1435~1439.
- [11] 张书敏, 徐文成, 罗爱平 *et al.* 色散缓变光纤中飞秒光脉冲的调制不稳定性研究 [J]. 光学学报, 2001, 21(6): 656~659.
- [12] TAI K, HASEGAWA A, TOMITA A. Observation of modulation instability in optical fibers [J]. Phys Rev Lett, 1986, 56(2): 135~138.
- [13] TRILLO S, WABNITZ S, WRIGHT E M *et al.* Optical solitary waves induced by cross phase modulation [J]. Opt Lett, 1988, 13(10): 871~873.
- [14] AFANASYEV V V, KIVSHAR Y S, KONOFOP V V *et al.* Dynamics of coupled dark and bright optical solitons [J]. Opt Lett, 1989, 14(15): 805~807.
- [8] KIM J, BOYRAZ O. Gain enhancement in cascaded fiber parametric amplifier with quasi phase matching: theory and experiment [J]. J Lightwave Technol, 2001, 19(2): 247~251.
- [9] HO M C, UESAKA K, MARHIC M E *et al.* 200nm bandwidth fiber optical amplifier combining parametric and raman gain [J]. J Lightwave Technol, 2001, 19(7): 977~981.
- [10] YANG F S, HO M C, MARHIC M E *et al.* Demonstration of two pump fiber optical parametric amplification [J]. Electron Lett, 1997, 33: 812~813.
- [11] WONG K K Y, MARHIC M E, UESAKA K *et al.* Polarization independent two pump fiber optical parametric amplifier [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2002, 14(7): 911~913.
- [12] SU Y K, WANG L J, AGARWAL A *et al.* Simultaneous 3R regeneration and wavelength conversion using a fiber parametric limiting amplifier [J]. OFC, 2001, 1: MG4 1~MG4 3.

(上接第 386 页)