

激光与光电子学进展

少模光参量放大器的光纤设计与串扰特性

张熠哲, 郭晓洁*

暨南大学光子技术研究院, 广东 广州 511443

摘要 研究了少模光参量放大器(FMOPA)的串扰特性,详细描述了发生在少模光纤模式内和模式间的四波混频及其相位匹配条件。给出了少模光纤中与时间无关的非线性薛定谔传输方程,利用数值求解方法描述了FMOPA的模间串扰,并推导出相应的半解析解。首先,设计了一种新的光纤结构,能在C波段(1530~1565 nm)以20 nm带宽传输五个模式。然后,用COMSOL仿真软件获得不同模式的模场分布,并用Matlab软件计算了这些模式间的传播常数与非线性系数。最后,通过合理调整每个模式的传输功率,在150 m长的光纤上使不同模式间的最大差分增益减小到0.7 dB。实验结果表明,半解析解与数值求解方法得到的串扰结果一致性较高。

关键词 非线性光学; 光参量放大器; 四波混频; 少模光纤; 模间串扰

中图分类号 O437.4; TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1119001

Design of Fiber and Crosstalk Characteristics for Few-Mode Optical Parametric Amplification

Zhang Yizhe, Guo Xiaojie*

Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou 511443, Guangdong, China

Abstract In this article, the crosstalk characteristics of the few-mode optical parametric amplification (FMOPA) are studied, and the intra-mode and inter-mode four-wave mixing and their phase matching conditions in the few-mode fiber are described in detail. The time-independent nonlinear Schrodinger transmission equation in few-mode fibers is given, and the intermodal crosstalk of FMOPA is described by numerical solution method, and the corresponding semi-analytical solution is deduced. First, a new fiber structure is designed to transmit five modes in C-band (1530–1565 nm) with a bandwidth of 20 nm. Then, the mode field distributions of different modes are obtained with COMSOL simulation software, and the propagation constants and nonlinear coefficients between these modes are calculated with Matlab software. Finally, the maximum differential gain between different modes can be reduced to 0.7 dB over 150 m fiber length by properly adjusting the transmission power of each mode. The experimental results show that the crosstalk results obtained by the semi-analytical solution and the numerical solution method are highly consistent.

Key words nonlinear optics; optical parametric amplification; four-wave mixing; few-mode fiber; inter-mode crosstalk

1 引言

非线性效应和放大器自发辐射噪声的存在,使

单模光纤传输的数据容量越来越逼近香农极限^[1],而互联网新兴业务对数据容量的需求在迅速增长。未来光纤通信系统将会是超大容量、超远距离的模

收稿日期: 2021-06-10; 修回日期: 2021-07-07; 录用日期: 2021-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(61875075)

通信作者: *xjguo@jnu.edu.cn

分复用系统,为了增加光纤的数据传输能力,基于少模光纤的空分复用系统引起了人们的极大兴趣^[2-4],少模光纤模分复用技术则被认为是该领域中最具发展潜力的技术。

20世纪80年代以来,人们对少模光纤技术展开了多次研究^[5-8]。少模光纤中的非线性过程可应用在少模拉曼放大器^[9]和超连续谱产生^[10]中,Li等^[11]已经设计出了低噪声的少模拉曼放大器,可获得约15 dB的增益。四波混频是少模光纤中一个重要的非线性过程,人们分别从理论和实验两方面对少模光纤中的四波混频过程进行了大量研究^[12-16],结果表明,少模光纤中的四波混频可以分别表示为模式内和模式间的四波混频过程。由于模式内四波混频过程中参与四波混频作用的四个光场都处于同一个空间模式,在少模光参量放大器(FMOPA)中具有很大的应用前景。参与模式间四波混频过程的光场至少涉及到两个不同的空间模式,从而在少模光纤中产生模式间串扰,但模式间四波混频过程的相位匹配通过模式色散和材料色散的共同作用实现,在抑制模式间四波混频方面具有很大的灵活性。目前,对FMOPA的研究主要集中在模式内的四波混频过程中,对模式间四波混频过程的研究较少。此外,简并模在很短的光纤长度内就会发生模式耦合,从而造成模式间的串扰,Guo等^[17]的研究表明,光纤纤芯和包层间具有大折射率差时可以有效抑制模式耦合。

目前,FMOPA采用的光纤结构主要有圆芯渐

变折射率结构^[18]、椭圆芯阶跃折射率结构^[17,19]等。本文设计了一种少模光纤结构,以抑制简并模之间的耦合。首先,对少模光纤中模式内和模式间的四波混频过程进行了详细描述。然后,设计了一种能有效抑制模间耦合的少模光纤结构,可以在C波段(1530~1565 nm)提供20 nm带宽进行五个空间模式的参量放大,并为该光纤的制作提供一定参考。最后,在研究模式间四波混频的过程中,探讨了模式间串扰的物理产生过程,并为模式间串扰提供了一个半解析表达式。实验结果表明,该半解析表达式与数值仿真结果的一致性较高。

2 FMOPA的耦合波方程

假设在一个频率简并的FMOPA中,连续泵浦的频率 ω_p 和信号频率 ω_s 均有多个空间传输模式并被一起传输至少模光纤时,少模光纤内部会发生许多模内四波混频和模间四波混频现象,频率 ω_i 处会对应产生具有多种空间模式的闲频光,且闲频光的频率 $\omega_i = 2\omega_p - \omega_s$ 。假设泵浦、信号和闲频光在少模光纤中传输时的偏振状态不变,且沿同一个方向传输,则可将泵浦、信号和闲频光不同模式下包络线沿少模光纤的传输用一组耦合的非线性薛定谔方程表示^[20]。在连续泵浦条件下,忽略泵浦的传输损耗,在模式 a 中,小信号状态下泵浦和信号的复振幅^[14,18]可表示为

$$\frac{\partial A_{pa}}{\partial z} = i \left[\gamma_{aa} |A_{pa}|^2 + 2 \sum_{b \neq a} \gamma_{ab} |A_{pb}|^2 \right] A_{pa}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_{sa}}{\partial z} = i & \left[2 \left(\gamma_{aa} |A_{pa}|^2 + \sum_{b \neq a} \gamma_{ab} |A_{pb}|^2 \right) A_{sa} + \gamma_{aa} A_{pa}^2 A_{ia}^* \exp(-i\Delta\beta_a^{MI} z) + \right. \\ & \left. 2 \sum_{b \neq a} \gamma_{ab} A_{pa} A_{pb} A_{ib}^* \exp(-i\Delta\beta_{ab}^{PC} z) + 2 \sum_{b \neq a} \gamma_{ab} A_{pa} A_{pb}^* A_{sb} \exp(-i\Delta\beta_{ab}^{BS} z) \right], \quad (2) \end{aligned}$$

式中, z 为传输方向上的空间坐标, A_{pm} 、 A_{sm} 和 A_{im} 分别为以空间模式 m 传输的泵浦、信号和闲频光的复振幅,上标*表示取共轭, $\Delta\beta_a^{MI}$ 为 a 模式内调制不稳定性(MI)过程的相位失配量, $\Delta\beta_{ab}^{BS}$ 为 a 模式对 b 模式布拉格散射(BS)过程的相位失配量, $\Delta\beta_{ab}^{PC}$ 为 a 模式对 b 模式相位共轭(PC)过程的相位失配量, γ_{mn} 为空间模式 m 和空间模式 n 之间的非线性耦合系数,由空间模式 m 和 n 之间的交叠积分决定,可表示为

$$\gamma_{mn}(\omega) = \frac{\omega n_2}{c} \frac{\iint |F_m(x,y)|^2 |F_n(x,y)|^2 dx dy}{\iint |F_m(x,y)|^2 dx dy \iint |F_n(x,y)|^2 dx dy}, \quad (3)$$

式中, c 为真空中的光速, $F_m(x,y)$ 为空间模式 m 的模场分布, n_2 为非线性克尔参量^[21],约为 $2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, ω 为泵浦频率。忽略泵浦、信号和闲频光之间的微小频率差时, $\gamma_{mn}(\omega) \approx \gamma_{mn}$ 。交换式(2)中所有信号和闲频光的下标 s 和 i ,就能得到模式 a 下用复振幅表示闲频光的非线性薛定谔方程。其

中,用 $\Delta\beta$ 描述的少模光纤中会发生不同类型的相位失配,与空间模式的传播常数密切相关。

在小信号状态下,每个空间模式的泵浦、信号和闲频光都会经历由自身功率引起的自相位调制和其他空间模式引起的交叉相位调制。式(2)中等号右侧第一项描述的是由泵浦引起的交叉相位调制,第二项描述的是模内四波混频过程,负责模式 a 的参量放大,通常被称为MI过程,满足能量守恒关系 $2\omega_{pa} = \omega_{sa} + \omega_{ia}$,第三项和第四项分别描述的是PC和BS过程,同样满足能量守恒关系 $\omega_{pa} + \omega_{pb} = \omega_{sa} + \omega_{ib}$ 和 $\omega_{pa} + \omega_{sb} = \omega_{sa} + \omega_{pb}$ 。其中, ω_{pm} 为 m 模式中泵浦的频率, ω_{sm} 为 m 模式中信号的频率, ω_{im} 为 m 模式中闲频光的频率。PC和BS可用来描述模间四波混频过程,即模间串扰,这些相互作用的相位匹配^[18]可表示为

$$\Delta\beta_a^{MI}(\omega) = \beta_a(\omega_s) + \beta_a(\omega_i) - 2\beta_a(\omega_p) \approx \beta_{2_a}\Omega_s^2, \quad (4)$$

$$\Delta\beta_{ab}^{PC}(\omega) = \beta_a(\omega_s) + \beta_b(\omega_i) - \beta_a(\omega_p) - \beta_b(\omega_p) \approx \Omega_s \left[(\beta_{1_a} - \beta_{1_b}) + \left(\frac{\beta_{2_a} + \beta_{2_b}}{2} \right) \Omega_s \right], \quad (5)$$

$$\Delta\beta_{ab}^{BS}(\omega) = \beta_a(\omega_s) + \beta_b(\omega_p) - \beta_a(\omega_p) - \beta_b(\omega_s) \approx \Omega_s \left[(\beta_{1_a} - \beta_{1_b}) + \left(\frac{\beta_{2_a} - \beta_{2_b}}{2} \right) \Omega_s \right], \quad (6)$$

式中, $\beta_m(\omega)$ 为 m 模式中频率为 ω 光的传播常数, β_{j_m} 为 m 模式中频率为 ω_p 光传播常数的 j 阶导数,满足 $\beta_{j_m} = \partial^j \beta_m(\omega) / \partial \omega^j |_{\omega=\omega_p}$ 。其中, $\Omega_s = \omega_s - \omega_p$ 为信号与泵浦之间的频率失谐。为了简化分析过程,未考虑 β_{3_m} 和 β_{4_m} 。若泵浦波长不太接近光纤的零色散波长,就能用式(4)~式(6)近似描述这些非线性相互作用的相位失配^[21]。

任何非线性过程都要满足三个条件:能量守恒、动量守恒以及模式之间的交叠积分不为0。满足这些条件时,少模光纤中发生的非线性相互作用除了MI、PC和BS过程外,还存在四波混频过程 $2\omega_{pa} = \omega_{sa} + \omega_{ib}$ ^[22-23]和 $2\omega_{pa} = \omega_{sb} + \omega_{ib}$ ^[13],其相位匹配项可表示为

$$\beta_{sa} + \beta_{ib} - 2\beta_{pa} \approx \beta_{0_b} - \beta_{0_a} + (\beta_{1_a} - \beta_{1_b}) \Omega_s + \frac{\beta_{2_a} + \beta_{2_b}}{2} \Omega_s^2, \quad (7)$$

$$\beta_{sb} + \beta_{ib} - 2\beta_{pa} \approx 2(\beta_{0_b} - \beta_{0_a}) + (\beta_{2_a} + \beta_{2_b}) \Omega_s^2, \quad (8)$$

式中, β_{sm} 为 m 模式中信号的传播常数, β_{pm} 为 m 模式

中泵浦的传播常数, β_{im} 为 m 模式中闲频光的传播常数。从式(7)、式(8)可以发现,相互作用的相位匹配主要由 β_{0_a} 和 β_{0_b} 决定,但在不同传输模式中传播常数的差异很大,相互作用的相位匹配会发生在远离泵浦的位置^[14],基本不会影响泵浦附近的信号。从式(1)~式(6)可以发现,模式内四波混频的MI过程是参量放大的相互作用,模式间四波混频的PC、BS过程是少模光纤中产生串扰的主要原因。要想在少模光纤中实现参量放大,需要使泵浦和信号在少模光纤中主要发生模式内的四波混频MI过程,抑制模式间四波混频PC、BS过程;增强MI过程,就需要 β_{2_m} 尽可能小,然后使信号频率工作在泵浦附近;抑制PC和BS过程,就是让各个空间模式之间 β_{1_m} 的差距尽可能大,这也是设计少模光纤的理论依据。

3 光纤设计与分析

消除简并模中的模式耦合并使这些模式的零色散波长尽可能地落在C波段中,是设计少模光纤的两个主要问题。打破模式简并即让简并模式之间具有不同的传输常数是消除简并模式耦合的一个有效方法,常用的方法是设计椭圆芯光纤^[24]。关于零色散波长的问题,可通过设计渐变折射率光纤解决。因此,设计了一种少模椭圆芯渐变折射率光纤,其结构如图1(a)所示。该光纤可以传输五个模式(LP₀₁, LP_{11a}, LP_{11b}, LP₀₂, LP₂₁,其中,LP_{11a}和LP_{11b}表示LP₁₁模式两个正交的简并模式),其零色散波长均在1.55 μm附近,如图1(b)所示。光纤结构主要由两部分组成,中间为渐变折射率椭圆纤芯,包层为纯SiO₂。光纤椭圆纤芯长半轴和短半轴的长分别为 r_1 和 r_2 ,包层半径为 r ,优化后的 r_1 和 r_2 分别为7.65 μm和6.18 μm。少模光纤椭圆纤芯中心的折射率为1.5315,掺杂的GeO₂摩尔分数为60%(已有光纤中GeO₂的摩尔分数最高可达97%)^[25]。少模光纤的折射率分布是到椭圆中心距离的函数,假设椭圆芯中心在坐标轴原点,椭圆长轴与 x 轴重合,短轴与 y 轴重合,则少模光纤的折射率可表示为

$$n(r) = \begin{cases} n_0 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{r_1} \right)^\alpha} & , r \leq r_1 \\ n_{\text{SiO}_2} & , r > r_1 \end{cases}, \quad (9)$$

式中, $n_0=1.5315$ 为椭圆纤芯中心的折射率, n_{SiO_2} 为纯SiO₂的折射率, $\Delta = (n_0^2 - n_{\text{SiO}_2}^2) / 2n_0^2$ 为少模光纤纤芯与包层之间的折射率差, $\alpha=1.48$ 为决定折射

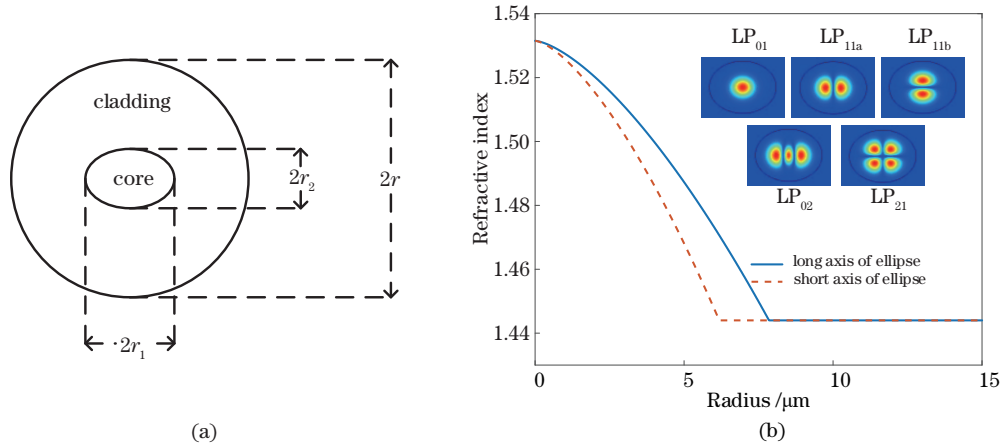


图 1 光纤的结构。(a)椭圆芯渐变折射率光纤的结构；(b)椭圆上的折射率分布

Fig. 1 Structure of the fiber. (a) Structure of the elliptical core graded-index fiber; (b) refractive index distribution on the ellipse

率分布形状的参数，椭圆纤芯中 $r = \sqrt{x^2 + (r_1 y / r_2)^2}$ 。为了表征光纤的色散特性，用 Sellmeier 方程将折射率描述为波长的函数，其中，Sellmeier 系数依赖于掺杂 GeO_2 的摩尔分数^[26]。相关参数通过 COMSOL 仿真软件进行扫描并手动优化得到，采用基于有限元方法的 COMSOL 仿真软件得到少模椭圆芯渐变折射率光纤允许的传输模式以及这些空间模式的传播常数和模场交叠积分 f_{mn} (f_{mn} 为空间模式 m 和空间模式 n 之间的模场交叠积分)，进而通过 Matlab 软件计算这些模式的非线性系数和群速度色散。模式交叠积分 f_{mn} 可表示为

$$f_{mn} = \frac{\iint |F_m(x, y)|^2 |F_n(x, y)|^2 dx dy}{\iint |F_m(x, y)|^2 dx dy \iint |F_n(x, y)|^2 dx dy} \quad (10)$$

通过 COMSOL 仿真软件得到五个模式的群速度色散和群时延，如图 2 所示。从图 2(a) 可以发现， LP_{01} 、 LP_{11b} 、 LP_{11a} 、 LP_{02} 和 LP_{21} 模式的零色散波长分别为 1550.8、1551.3、1550.6、1548.8、1550.1 nm，只需使这些模式的差分群时延大于 1 ps/m，就能有效抑制模式间的四波混频过程^[18]，从图 2(b) 可以发现，任何两个模式之间的差分群时延均大于 1 ps/m。先通过 COMSOL 仿真软件计算模式之间的交叠积分 f_{mn} ，然后通过式(3)计算模式间的非线性系数，结果如表 1 所示。

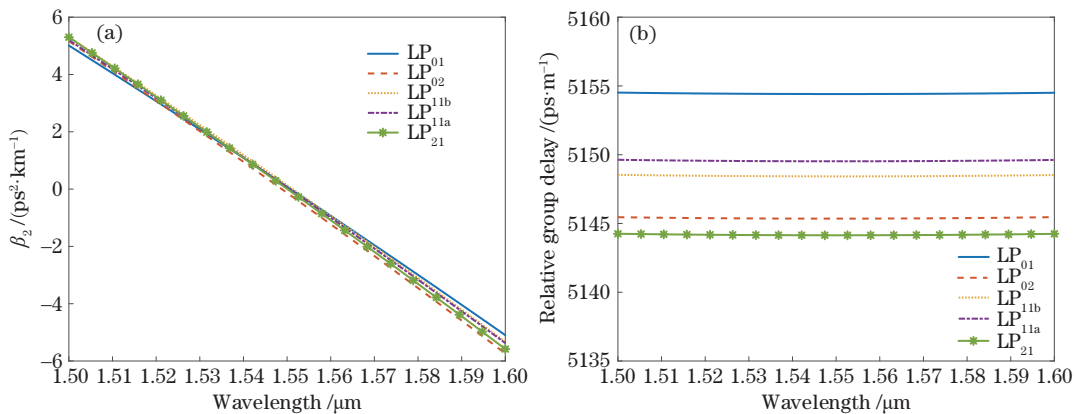


图 2 不同传输模式的群速度色散和相对群时延。(a)群速度色散；(b)相对群时延

Fig. 2 Group velocity dispersion and relative group delay for different transmission modes. (a) Group velocity dispersion;

(b) relative group delay

假设 FMOPA 的工作模式可以用相同频率的简并泵浦同时对 n 个空间模式的信号进行参量放大。通过 n 个空间模式的信号和闲频光求解式(1)和式

(2)，从而模拟该少模光纤中的模式传播(共 $3n$ 个非线性耦合方程)。为了准确描述空间模式在少模光纤中的传播情况，式(1)和式(2)考虑了所有满足相位匹

表 1 少模光纤的非线性耦合系数

Table 1 Non-linear coupling coefficient of few-mode fiber

Spatial mode	LP ₀₁	LP _{11b}	LP _{11a}	LP ₀₂	LP ₂₁
LP ₀₁	5.8269	2.9826	2.6994	2.0110	1.2122
LP _{11b}	2.9826	3.9205	1.5155	0.8916	1.9029
LP _{11a}	2.6994	1.5155	3.9618	2.1782	1.8776
LP ₀₂	2.0110	0.8916	2.1782	3.1962	1.1741
LP ₂₁	1.2122	1.9029	1.8776	1.1741	2.7501

配条件和空间模式重叠积分的情况,共求解了 15 个非线性耦合方程。对于相位匹配不在 C 波段的相互作用,在式(1)和式(2)中不进行考虑。对于信号距离泵浦位置较远的情况,式(5)和式(6)可认为是相等的,因此未描述 BS 过程,从而很大程度地简化了数值求解的复杂度。泵浦波长为 1551.9 nm 时 MI 和 PC 过程的相位失配随波长的变化情况如图 3 所示。可以发现,如果信号与泵浦的距离较远, $\Delta\beta^{PC}(\Delta\beta^{BS})$ 会远大于 $\Delta\beta^{MI}$,且 $\Delta\beta_{LP_{02}-LP_{01}}^{PC} \approx -\Delta\beta_{LP_{01}-LP_{02}}^{PC}$,与理论推导结果一致。其中, $\Delta\beta^{MI}$ 、 $\Delta\beta^{PC}$ 、 $\Delta\beta^{BS}$ 分别为 MI、PC、BS 过程的相位失配, $\Delta\beta_{LP_{02}-LP_{01}}^{PC}$ 为 LP₀₂ 模式对 LP₀₁ 模式在 PC 过程中的相位失配, $\Delta\beta_{LP_{01}-LP_{02}}^{PC}$ 为 LP₀₁ 模式对 LP₀₂ 模式在 PC 过程中的相位失配。

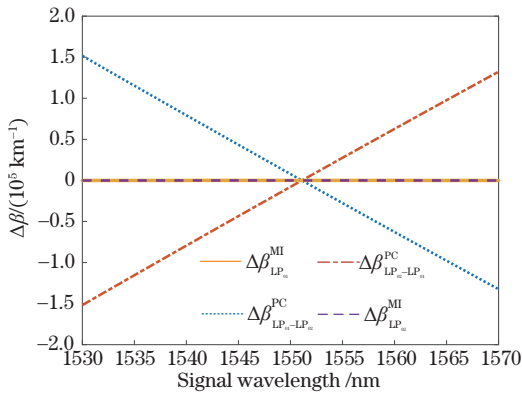


图 3 MI 和 PC 过程中相位失配随波长的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of phase mismatch with wavelength during MI and PC process

仿真过程中发现:对光纤色散影响最大的是纤芯中心材料的掺杂摩尔分数和决定折射率分布形状的参数 α ; 掺杂摩尔分数的增加会导致所有模式的零色散波长向长波长方向移动,而参数 α 的增加会导致零色散波长向短波长方向移动,但不能通过减小参数 α 间接减小纤芯的掺杂摩尔分数。 α 的最佳取值在 1.48 左右,最大不超过 1.5。椭圆长轴和短轴对零色散波长的影响较小,因此,在设计少模椭圆芯渐变折射率光纤时,先将椭圆度设置为 1.5,

找到最佳掺杂摩尔分数和参数 α 后,再微调椭圆纤芯的长轴和短轴,最终得到少模椭圆芯渐变折射率光纤。

4 仿真分析与半解析表达式

设计的少模椭圆芯渐变折射率光纤在 150 m 长、20 nm 的带宽内可以实现五个模式的参量放大。假设五个模式的泵浦和信号各自以相同的偏振态入射到少模光纤中,则五个模式的泵浦以相同频率传输,选择合适的泵浦功率可使这些模式在 C 波段上的增益分布尽可能相似,从而最小化差分模式增益(DMG)。在少模椭圆芯渐变折射率光纤中, LP₀₁、LP₀₂、LP_{11b}、LP_{11a} 和 LP₂₁ 模式的泵浦功率分别为 $P_a=1.87$ W, $P_b=3.10$ W, $P_c=2.83$ W, $P_d=2.70$ W 和 $P_e=3.77$ W。由于设计的是椭圆芯少模光纤,且纤芯和包层之间的折射率差异较大,打破了 LP_{11a} 和 LP_{11b} 模式之间的简并,使这两个模式具有不同的传播常数,因此,可以假设这两个模式不沿少模光纤线性耦合。

在少模椭圆芯渐变折射率光纤中,使泵浦波长为 1551.9 nm,通过数值仿真求解 15 个非线性耦合方程,得到每个模式增益分布随信号波长的变化如图 4(a)所示。为了满足少模参量放大的色散要求,需尽可能地增加模式内的四波混频作用,抑制模式间的四波混频作用,从而忽略少模光纤中的串扰。每个模式的增益分布可以用单模参量放大器的增益表达式近似描述,仿真结果如图 4(b)所示。单模参量放大器的增益^[24]可表示为

$$G_m = 1 + \left[\frac{\gamma_{mn} P_m}{g_m} \sinh(g_m L) \right]^2, \quad (11)$$

式中, L 为少模光纤的长度, G_m 为 m 模式信号的增益, $g_m = \sqrt{(\gamma_{mn} P_m)^2 - \kappa_m^2}$, $\kappa_m = \Delta\beta_m^{MI}/2 + \gamma_{mn} P_m$, P_m 为 m 模式的泵浦功率。从图 4 可以发现,数值解与式(11)描述的增益分布曲线比较吻合。在寻找每个模式的最佳功率、最小 DMG 时,为了减少运算,用式(11)计算每个模式的增益分布。结果表明:在 1542~1562 nm 波长范围内,最大 DMG 约为 0.7 dB,最小模式增益约为 5.06 dB;将光纤长度增加到 300 m 时,最优的功率组合为 $P_a=1.80$ W, $P_b=2.70$ W, $P_c=2.89$ W, $P_d=2.52$ W 和 $P_e=3.41$ W,此时,最大 DMG 约为 2.1 dB,最小模式增益约为 9 dB。

为了观察模式间串扰的相互作用过程,在数值仿真时只输入一个模式的信号,然后在其他模式的

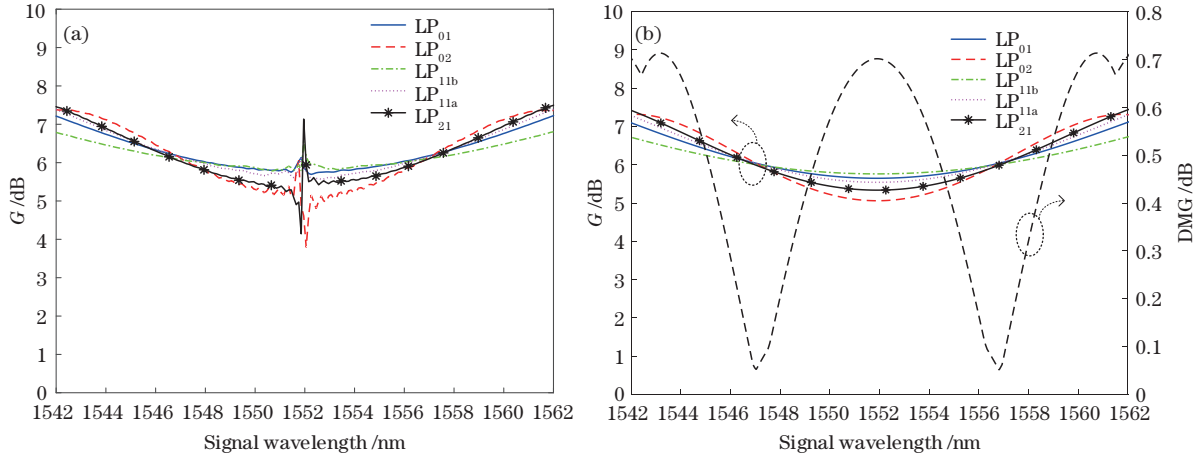


图4 不同模式的增益分布。(a)数值解得到的结果;(b)解析解得到的结果

Fig. 4 Gain distribution for different modes. (a) Results obtained from the numerical solution; (b) result obtained from the analytical solution

信号处检测输出结果,得到模式间的相互作用如图5所示。对比图4(a)和图4(b)中每个模式增益分布的解析解和数值解发现,可以合理假设每个传输模式受其他模式的影响很小、模式间四波混频造成的串扰很低,从侧面证实了设计的少模椭圆芯渐变折射率光纤内部发生的模式间四波混频相互作用的效率很低。对于少模光纤中每个模式的增益表达式,可以用单模参量放大器的增益表达式近似描述,从而为研究任意两个模式间的串扰提供了理论依据。对于串扰的产生,可以用一个物理过程简单描述,假设在 a 模式和 b 模式中同时输入一个信号光子,在 PC 过程的作用下, a 模式的信号光子会在 b 模式的闲频光频率处产生一个相对应的闲频光光子,该闲频光光子在 b 模式 MI 过程的作用下,又会在 b 模式的信号频率处产生一个对应的信号光子。在 BS 过程的作用下, a 模式的信号光子会直接在 b 模式的信号频率处产生一个相对应的信号光子,此时, PC 和 BS 过程在 b 模式作用下产生的信号光子就会对原始 b 模

式下的信号光子产生影响。通过该物理过程的描述,可以将产生串扰的非线性过程分阶段表示出来,最终得到关于两个模式间串扰的半解析表达式。

假设 m 模式对 n 模式产生串扰, m 模式的初始输入为 $B_{sm}(0)$ 和 $B_{im}(0)$, 其中, $B_{sm}(0)$ 为 m 模式的信号初始输入, $B_{im}(0)$ 为 m 模式的闲频光初始输入, 则串扰分布的半解析表达式为

$$B_1 = \frac{m_1 a_1 \left\{ \exp[(n_1 + g_m)L] - 1 \right\}}{n_1 + g_m} + \frac{m_1 b_1 \left\{ \exp[(n_1 - g_m)L] - 1 \right\}}{n_1 - g_m}, \quad (12)$$

$$B_2 = \frac{m_2 a_2 \left\{ \exp[(n_2 + g_m)L] - 1 \right\}}{n_2 + g_m} + \frac{m_2 b_2 \left\{ \exp[(n_2 - g_m)L] - 1 \right\}}{n_2 - g_m}, \quad (13)$$

$$B_3 = \frac{m_3 m_5 a_2 \left\{ \exp[(n_3 + n_5 + g_m)L] - 1 \right\}}{(n_3 + g_m) \times (n_3 + n_5 + g_m)} - \frac{m_3 m_5 a_2 [\exp(n_5 L) - 1]}{(n_3 + g_m) \times n_5} + \frac{m_3 m_5 b_2 \left\{ \exp[(n_3 + n_5 - g_m)L] - 1 \right\}}{(n_3 - g_m) \times (n_3 + n_5 - g_m)} - \frac{m_3 m_5 b_2 [\exp(n_5 L) - 1]}{(n_3 - g_m) \times n_5} + \frac{m_4 m_5 a_1 \left\{ \exp[(n_4 + n_5 + g_m)L] - 1 \right\}}{(n_4 + g_m) \times (n_4 + n_5 + g_m)} - \frac{m_4 m_5 a_1 [\exp(n_5 L) - 1]}{(n_4 + g_m) \times n_5} + \frac{m_4 m_5 b_1 \left\{ \exp[(n_4 + n_5 - g_m)L] - 1 \right\}}{(n_4 - g_m) \times (n_4 + n_5 - g_m)} - \frac{m_4 m_5 b_1 [\exp(n_5 L) - 1]}{(n_4 - g_m) \times n_5}, \quad (14)$$

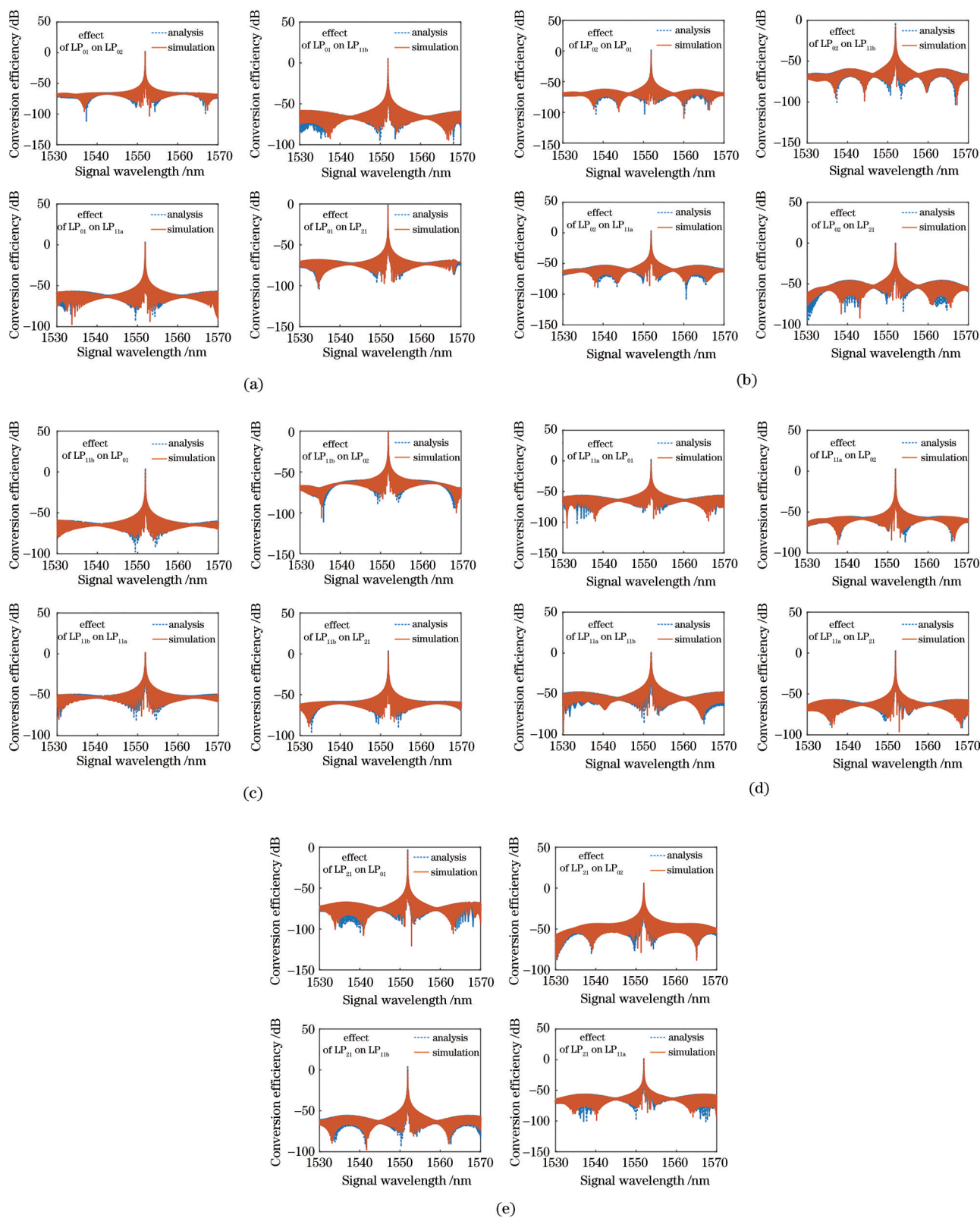


图 5 数值解与半解析解得到的串扰曲线。(a) LP_{01} 模式对其他模式的影响；(b) LP_{02} 模式对其他模式的影响；(c) LP_{11b} 模式对其他模式的影响；(d) LP_{11a} 模式对其他模式的影响；(e) LP_{21} 模式对其他模式的影响

Fig. 5 Crosstalk curves obtained from the numerical solution and semi-analytical solution. (a) Effect of LP_{01} mode on other modes; (b) effect of LP_{02} mode on other modes; (c) effect of LP_{11b} mode on other modes; (d) effect of LP_{11a} mode on other modes; (e) effect of LP_{21} mode on other modes

$$B_4 = B_1 + B_2 + B_3 \sqrt{G_n}, \quad (15)$$

$$G_{mn} = \left[\frac{B_4}{B_{sm}(0)} \right]^2, \quad (16)$$

$$\begin{cases} m_1 = 2i\gamma_{mn} A_{pn}(0) A_{pm}^*(0), & n_1 = \frac{-i\kappa_m}{2} - i\gamma_{mn} P_n + i\Delta\beta_{mn}^{BS} \\ m_2 = 2i\gamma_{mn} A_{pn}(0) A_{pm}(0), & n_2 = \frac{i\kappa_m}{2} - i\gamma_{mn} P_n + i\Delta\beta_{mn}^{PC} \\ m_3 = -2i\gamma_{mn} A_{pn}^*(0) A_{pm}(0), & n_3 = \frac{i\kappa_m}{2} + i\gamma_{mn} P_n + i\Delta\beta_{mn}^{BS} \\ m_4 = -2i\gamma_{mn} A_{pn}^*(0) A_{pm}^*(0), & n_4 = \frac{-i\kappa_m}{2} + i\gamma_{mn} P_n + i\Delta\beta_{mn}^{PC} \\ m_5 = i\gamma_{mn} A_{pn}^2(0), & n_5 = -i\kappa_n - 2i\gamma_{mn} P_n \end{cases}, \quad (17)$$

$$\begin{cases} a_1 = \frac{A_{sm}(0)}{2} \left(1 + \frac{i\kappa_m}{2g_m} \right) + \frac{i\gamma_{mn} P_m A_{im}^*(0)}{2g_m} \\ b_1 = \frac{A_{sm}(0)}{2} \left(1 - \frac{i\kappa_m}{2g_m} \right) - \frac{i\gamma_{mn} P_m A_{im}^*(0)}{2g_m} \\ a_2 = \frac{A_{im}^*(0)}{2} \left(1 - \frac{i\kappa_m}{2g_m} \right) - \frac{i\gamma_{mn} P_m A_{sm}(0)}{2g_m} \\ b_2 = \frac{A_{im}^*(0)}{2} \left(1 + \frac{i\kappa_m}{2g_m} \right) + \frac{i\gamma_{mn} P_m A_{sm}(0)}{2g_m} \end{cases}, \quad (18)$$

式中, G_{mn} 为 m 模式对 n 模式产生的串扰随波长变化的最终表达式。对比图 5 和图 4(b) 可以发现, 在距离泵浦至少 1 nm 的位置处, 任意两个模式之间的串扰要比单独模式的增益至少小 40 dB。根据 m 模式对 n 模式 BS 过程的能量守恒关系可知, B_1 描述的是 m 模式信号光子通过 BS 相互作用转化为 n 模式信号光子的过程; 根据 m 模式对 n 模式 PC 过程的能量守恒关系可知, B_2 描述的是 m 模式闲频光子通过 PC 相互作用转化为 n 模式信号光子的过程; 根据 m 模式对 n 模式 BS、PC 过程的能量守恒关系以及 n 模式 MI 过程的能量守恒关系可知: B_3 描述的是 m 模式信号光子和闲频光子先通过 PC 和 BS 过程转化为 n 模式闲频光子, n 模式闲频光子再通过 MI 相互作用转化为 n 模式信号光子的过程; B_4 描述的是 m 模式对 n 模式产生的总影响。由于通过 B_3 描述的 n 模式信号光子还要参与 n 模式模内的参量放大过程, 因此要将 B_3 乘以 $\sqrt{G_n}$ 。

通过描述串扰发生的物理过程, 得到关于串扰分布的表达式, 即式 (16)。可以发现, 半解析解描述的任意两个模式之间的串扰, 可以近似表达直接数值求解 15 个非线性耦合方程得到的串扰。图 5 存在一些不重合的地方, 原因是求解半解析表达式时假设 m 模式的信号不受 n 模式的影响, 只有模式内四波混频作用的发生, 与实际情况不符; 当 n 模式

的信号和闲频光处开始产生光子时, 也会通过 PC 和 BS 过程对 m 模式的信号和闲频光产生影响。此外, 解析法得到的增益分布曲线更平滑, 而数值求解结果的曲线存在波动, 且该波动的影响非常小, 可近似认为半解析解和数值解的结果相同, 求解串扰的半解析解时, 可以忽略这个微小的波动, 即忽略 n 模式对 m 模式的影响。在设计少模光纤时, 求解串扰的半解析表达式可以很大程度地提高计算效率, 更快寻找到设计少模光纤的最优参数, 且半解析表达式能较好地匹配数值解的结果, 也验证了其对于串扰产生解释的正确性。式 (16) 描述的是任意两个模式之间的串扰, 并不仅仅局限于讨论的五个模式, 任意多模式的少模光纤内部以及任意两个模式之间的串扰都可以用该公式近似求解, 对于少模光纤的设计具有重要意义。

5 结 论

研究了 FMOPA 的光纤设计和串扰特性, 利用单频率简并泵浦的方式进行参量放大。设计了一种少模椭圆芯渐变折射率光纤, 通过 COMSOL 仿真软件优化少模光纤参数, 可以进行五个模式的参量放大。在 150 m 长的少模光纤上, 合理设置五个模式的泵浦功率能实现最大 DMG 为 0.7 dB, 最小模式增益为 5.06 dB 的工作模式, 为少模光纤的设计提供了一种新思路。在探究少模光纤模式间串扰本质的过程中, 得到了一个关于任意两个模式之间串扰的半解析表达式, 可以近似表达数值求解的结果, 从而更好地理解串扰产生的物理机制, 指导少模光纤的设计。

参 考 文 献

[1] Essiambre R J, Kramer G, Winzer P J, et al.

- Capacity limits of optical fiber networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(4): 662-701.
- [2] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 354-362.
- [3] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, et al. Mode-division multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(4): 521-531.
- [4] Li G F, Bai N, Zhao N B, et al. Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2014, 6(4): 413-487.
- [5] Youngquist R C, Brooks J L, Shaw H J. Two-mode fiber modal coupler[J]. *Optics Letters*, 1984, 9(5): 177-179.
- [6] Sorin W V, Kim B Y, Shaw H J. Phase-velocity measurements using prism output coupling for single- and few-mode optical fibers[J]. *Optics Letters*, 1986, 11(2): 106-108.
- [7] 谢艳秋, 武保剑, 文峰. 少模光纤中折射率微扰对模式消光比的影响 [J]. *光学学报*, 2020, 40(23): 2306005.
- Xie Y Q, Wu B J, Wen F. Influence of refractive index perturbation on mode extinction ratio in few-mode fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2306005.
- [8] 裴丽, 李祉祺, 王建帅, 等. 空分复用光纤放大器增益均衡技术研究进展 [J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0106001.
- Pei L, Li Z Q, Wang J S, et al. Review on gain equalization technology of fiber amplifier using space division multiplexing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0106001.
- [9] Ryf R, Sierra A, Essiambre R J, et al. Mode-equalized distributed Raman amplification in 137-km few-mode fiber[C]//2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication, September 18-22, 2011, Geneva, Switzerland. New York: IEEE Press, 2011: 12346080.
- [10] Eftekhar M A, Wright L G, Mills M S, et al. Versatile supercontinuum generation in parabolic multimode optical fibers[J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 9078-9087.
- [11] Li J X, Wang L L, Du J B, et al. Experimental demonstration of a few-mode Raman amplifier with a flat gain covering 1530-1605 nm[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(18): 4530-4533.
- [12] Guasoni M. Generalized modulational instability in multimode fibers: wideband multimode parametric amplification[J]. *Physical Review A*, 2015, 92(3): 033849.
- [13] Pourbeyram H, Nazemosadat E, Mafi A. Detailed investigation of intermodal four-wave mixing in SMF-28: blue-red generation from green[J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): 14487-14500.
- [14] Nazemosadat E, Pourbeyram H, Mafi A. Phase matching for spontaneous frequency conversion via four-wave mixing in graded-index multimode optical fibers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, 33(2): 144-150.
- [15] Friis S M M, Begleris I, Jung Y, et al. Inter-modal four-wave mixing study in a two-mode fiber[J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 30338-30349.
- [16] Dupiol R, Bendahmane A, Krupa K, et al. Far-detuned cascaded intermodal four-wave mixing in a multimode fiber[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1293-1296.
- [17] Guo C, Zhang Z Z, Zhao N B, et al. Design of elliptical few-mode fibers for mode-coupling-free parametric amplification[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, 35(3): 545-551.
- [18] Nazemosadat E, Lorences-Riesgo A, Karlsson M, et al. Design of highly nonlinear few-mode fiber for C-band optical parametric amplification[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(14): 2810-2817.
- [19] 邢焕兴, 武保剑, 万峰, 等. 椭圆纤芯少模光纤参量放大器设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(11): 110603.
- Xing H X, Wu B J, Wan F, et al. Design of elliptical-core few-mode fiber optical parametric amplifiers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 110603.
- [20] Mafi A. Pulse propagation in a short nonlinear graded-index multimode optical fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(17): 2803-2811.
- [21] Agrawal G P. 非线性光纤光学[M]. 5版. 贾东方, 译. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*[M]. 5th ed. Jia D F, Transl. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2019.
- [22] Stolen R H, Bjorkholm J E, Ashkin A. Phase-matched three-wave mixing in silica fiber optical waveguides[J]. *Applied Physics Letters*, 1974, 28(7): 308-310.
- [23] Stolen R, Bjorkholm J. Parametric amplification and frequency conversion in optical fibers[J]. *IEEE Journal of*

Quantum Electronics, 1982, 18(7): 1062-1072.

- [24] Ip E, Milione G, Li M J, et al. SDM transmission of real-time 10 GbE traffic using commercial SFP+ transceivers over 0.5 km elliptical-core few-mode fiber[J]. Optics Express, 2015, 23(13): 17120-17126.
- [25] Mashinsky V M, Neustruev V B, Dvoyrin V V, et al.

Germania-glass-core silica-glass-cladding modified chemical-vapor deposition optical fibers: optical losses, photorefractivity, and Raman amplification [J]. Optics Letters, 2004, 29(22): 2596-2598.

- [26] Fleming J W. Dispersion in GeO₂-SiO₂ glasses[J]. Applied Optics, 1984, 23(24): 4486-4493.