

文章编号: 0258-7025(2004)07-0789-04

掺钕光纤放大器非线性折射率的分析

孔 勇, 郭明秀, 陆雨田

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 利用描述光纤放大器非线性折射率的公式,通过数值模拟的方法模拟了输入信号功率、抽运功率、信号波长以及增益效应和克尔效应等变量对掺钕光纤放大器非线性折射率的影响,结果表明无论是增加抽运光功率或信号光功率,当信号光的波长小于 1064 nm 时,掺钕光纤放大器的非线性折射率的数值在此波段附近所对应的值为正值,大于此值所对应的值为负值;抽运功率较小时增益效应对非线性折射率的影响较大,而抽运功率较大时克尔效应对非线性折射率的影响较大,这主要是增益饱和所导致的结果;当信号光频率一定时,随抽运功率的增加非线性折射率逐渐增加并达到饱和。

关键词 光电子学;掺钕光纤放大器;克尔效应;非线性折射率;相位

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

Research on the Nonlinear Refractive Index of Nd-Doped Fiber Amplifier

KONG Yong, GUO Ming-xiu, LU Yu-tian

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract This paper gives a numerical research on the Nd-doped fiber amplifier nonlinear refractive index and phase changing with the input signal power, pump power, signal wavelength, gain effect and Kerr effect. The results show that when the signal or pump power increases, the nonlinear refractive index is positive for the signal wavelength being smaller than 1064 nm, and negative for the signal wavelength being bigger than 1064 nm. When the signal wavelength hold a certain value, the nonlinear refractive index increases with the pump power. When the pump is low, the gain effect have more influence on the change of nonlinear refractive index, and when the pump is high, the Kerr effect have more influence on the change of nonlinear refractive index, which caused mainly by gain saturation.

Key words optoelectronics; Nd-doped fiber amplifier; Kerr effect; nonlinear refractive index; phase

1 引 言

光纤放大器非线性折射率依赖于掺杂浓度、抽运功率、信号功率等参数的变化对非线性、噪声系数、色散等参量的影响,为短波传输、级联光纤、孤子传输等方面的优化设计带来重要的指导意义^[1,2]。非线性折射率在光开关、信号处理系统、信号放大等方面也得到了广泛的重视^[3~5]。而由非线性折射率引起的相位变化对于设计光纤环形锁模激光器^[1],多根光纤放大器的相干放大输出^[6]等应用方面也是

相当重要的。在相关的实验研究方面,Betts 等^[3]利用一根双芯光纤(一个芯区掺有钕粒子而另一个是普通光纤),根据干涉法对掺钕光纤折射率进行了测量,梁铨廷^[7]利用单芯掺钕光纤构成一个环形谐振器,根据输出光强的变化对掺钕光纤的折射率进行了测量。Ghisler 等^[6]从实验上研究了掺钕光纤放大器的相位变化。

掺钕光纤放大器在 1300 nm 波段处具有很强的激发态吸收^[8],限制了它在 1300 nm 波段通信上的应用,但是在 1064 nm 波段处的掺钕光纤放大器

收稿日期:2003-01-02;收到修改稿日期:2003-05-21

基金项目:国家 863 计划资助课题。

作者简介:孔 勇(1977—),男,山东人,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事锁模激光器和光纤放大器的研究。E-mail:kongyong@sohu.com

能够为半导体激光器抽运的 Nd:YAG 激光光源提供紧凑耐用和偏振态无关的信号放大,它没有像掺铒、掺铒镱光纤放大器那样严重的受激吸收现象,可以达到量子噪声系数的极限,这是因为内包层可比单模芯区的面积大 100 多倍,适用于较大面积的激光二极管抽运,从而可以得到大功率信号的输出。而掺铒、掺铒镱光纤放大器内包层直径只能比单模芯区直径大几倍。另外掺铒光纤放大器还具有抽运阈值低、噪声系数小、掺杂浓度高等优点,近年来在空间通信和高功率放大等应用中得到了广泛重视^[9~11]。文献[12]分析了信号光对掺铒光纤非线性折射率的影响,[13]分析了抽运光对掺铒光纤非线性折射率的影响,他们都是利用 Kramers-Kronig 关系在实验上研究了信号光功率、波长和抽运光功率对掺铒光纤非线性折射率的影响,分析过程较为复杂,本文利用宋开等^[1]推导的掺杂光纤非线性折射率的公式,对输入信号功率、抽运功率、信号波长等参量的变化对掺铒光纤放大器非线性折射率的影响进行了数值模拟。

2 理 论

掺杂光纤折射率为^[1]

$$n(\nu) = n_0(\nu) + \frac{(\nu - \nu_{i0})}{K_0 \Delta \nu_{i0}} g(\nu, \nu_{i0}) + \bar{n}_2 [I(\nu_{i0}) + 2I(\nu_{j0})] \quad i, j = p, s \quad i \neq j \quad (1)$$

式中 K_0 为在频率 ν_0 处的波数, ν_{i0} 为第 i 个能级中的电子跃迁至基态能级时的光谱中心频率, $\Delta \nu_{i0}$ 为其光谱线宽, $g(\nu, \nu_{i0})$ 表示在中心频率附近的净增益系数。 \bar{n}_2 为非线性折射率系数, $I(\nu_{i0})$ 和 $I(\nu_{j0})$ 为抽运光强和信号光强, $n_0^2(\nu) = 1 + \chi_f^{(1)}(\nu)$, $\chi_f^{(1)}(\nu)$ 为石英光纤的一阶电极化率。由非线性折射率导致的相位差变化 $\Delta \phi$ 为

$$\Delta \phi = \frac{2\pi \Delta n L}{\lambda} \quad (2)$$

光纤出射端的相位差变化为

$$\phi(L) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^L \Delta n(z) dz \quad (3)$$

对于要分析的掺铒离子是四能级分布,掺铒光纤放大器的信号功率、抽运功率传输方程和粒子分布速率方程满足以下速率方程^[11]

$$\frac{\partial p_s}{\partial z} = (N_3 \sigma_s^e \Gamma_s - N_2 \sigma_s^a \Gamma_s) \times p_s \quad (4)$$

$$\frac{\partial p_p}{\partial z} = (N_1 \sigma_p^e \Gamma_p - N_4 \sigma_p^a \Gamma_p) \times p_p \quad (5)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = \omega_p (N_1 - N_4) - A_{43} N_4 \quad (6)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \omega_s (N_2 - N_3) + A_{43} N_4 - A_{32} N_3 \quad (7)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \omega_s (N_3 - N_2) - A_{21} N_2 + A_{32} N_3 \quad (8)$$

$$N_1 = N_0 - N_2 - N_3 - N_4 \quad (9)$$

公式中 $P_p, P_s, N_0, N_i (i = 1 \sim 4)$ 分别表示为抽运功率、信号功率、总粒子数和各能级粒子数, $\sigma_s^e, \sigma_s^a, \sigma_p^e, \sigma_p^a, \omega_s, \omega_p, A_{ij}, \Gamma_s, \Gamma_p$ 分别表示信号光吸收截面、信号光发射截面、抽运光吸收截面、抽运光发射截面、受激辐射率、抽运率、各能级自发跃迁几率、信号光与粒子数分布的重叠因子、抽运光与粒子数分布的重叠因子。

在稳态下 N_2 和 N_4 的数值可忽略不计^[11],由以上公式可得出

$$N_1 = N_0 \frac{1 + \omega_s \tau}{1 + \tau(\omega_p + \omega_s)} \quad (10)$$

$$N_3 = N_0 \frac{\omega_p \tau}{1 + \tau(\omega_p + \omega_s)} \quad (11)$$

式中 $\omega_p = \left(\frac{\sigma_p}{h\nu_p A} P_p \Gamma_p \right)$, $\omega_s = \left(\frac{\sigma_s}{h\nu_s A} P_s \Gamma_s \right)$, A, ν_s, ν_p, τ 分别表示为抽运有效截面、信号频率、抽运频率和三能级到二能级的自发辐射时间,将上两式代入(10),(11)两式可得

$$N_1 = \frac{1 + \tau \left(\frac{\sigma_s}{h\nu_s A} P_s \Gamma_s \right)}{1 + \tau \left(\frac{\sigma_s}{h\nu_s A} P_s \Gamma_s + \frac{\sigma_p}{h\nu_p A} P_p \Gamma_p \right)} \quad (12)$$

$$N_3 = \frac{\tau \left(\frac{\sigma_p}{h\nu_p A} P_p \Gamma_p \right)}{1 + \tau \left(\frac{\sigma_s}{h\nu_s A} P_s \Gamma_s + \frac{\sigma_p}{h\nu_p A} P_p \Gamma_p \right)} \quad (13)$$

模拟中的数据采用以下数值:抽运波长为 808 nm,信号波长为 1064 nm,随波长变化的抽运吸收截面、发射截面和信号光吸收截面、发射截面的数值参考文献[11]中的数据,三能级荧光寿命为 0.5 ms,掺铒离子浓度 $N_0 = 4 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, $\Gamma_s = 0.6$, $\Gamma_p = 1$,抽运功率为 100 mW,信号功率为 1 mW,纤芯半径为 3 μm ,光纤长 3 m,非线性折射率系数 $\bar{n}_2 = 2 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{W}^2$ 。

3 模拟结果及分析

图 1 为信号光输入端面处在不同抽运功率和信号功率下光纤非线性折射率随信号波长的变化。从图 1(a)可以看出随抽运光功率的增加非线性折射

率将增加,变化较为明显,在波长较短处非线性折射率为正值,而波长较长处非线性折射率为负值,非线性折射率的最大值并不在 1064 nm 波段,而是稍微

小于此值所对应的值;从图 1(b)中可以看出随信号光功率的增加,非线性折射率的变化不如抽运光功率影响的那么明显。

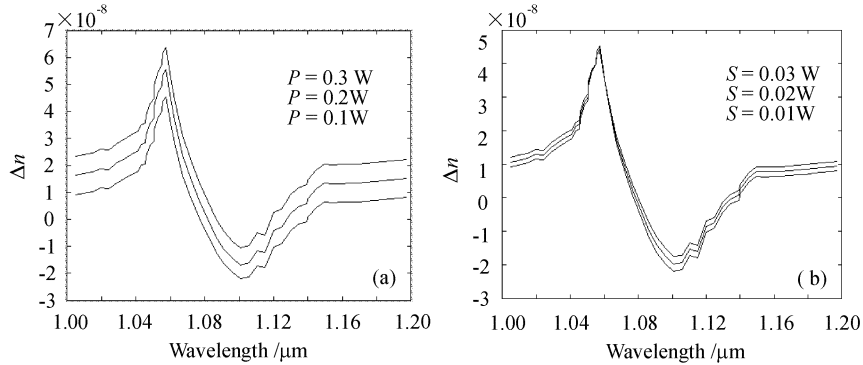


图 1 在不同的抽运功率(a)和信号功率(b)下光纤非线性折射率随信号波长的变化

Fig. 1 Fiber nonlinear refractive index versus wavelength (a) in the different input pump power cases and (b) in the different input signal power cases

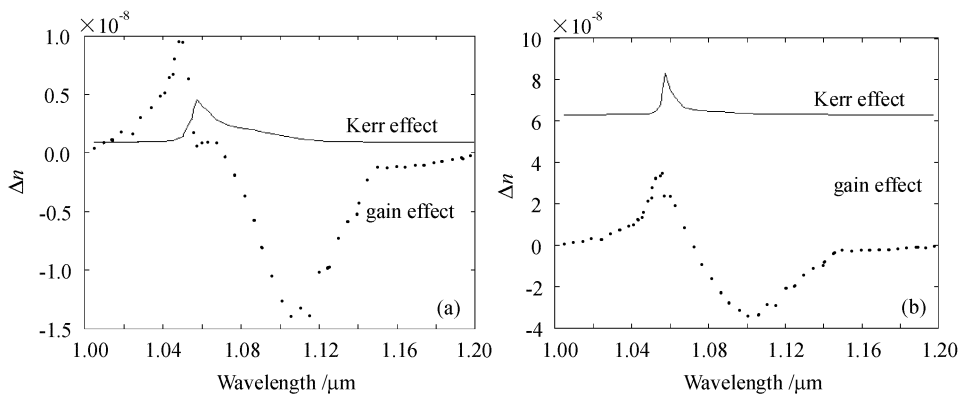


图 2 不同抽运功率时光纤端面处的非线性折射率随信号波长的变化

抽运功率为:(a) 0.1 W;(b) 1 W(实线是克尔效应引起光纤非线性折射率的变化,虚线是增益效应引起的光纤非线性折射率的变化)

Fig. 2 Fiber nonlinear refractive index versus signal wavelength at the end of the fiber

(a) pump power is 0.1 W; (b) pump power is 1 W (the solid line is change of the nonlinear refractive index caused by the Kerr effect and the dotted line is the change of the nonlinear refractive index caused by the gain effect)

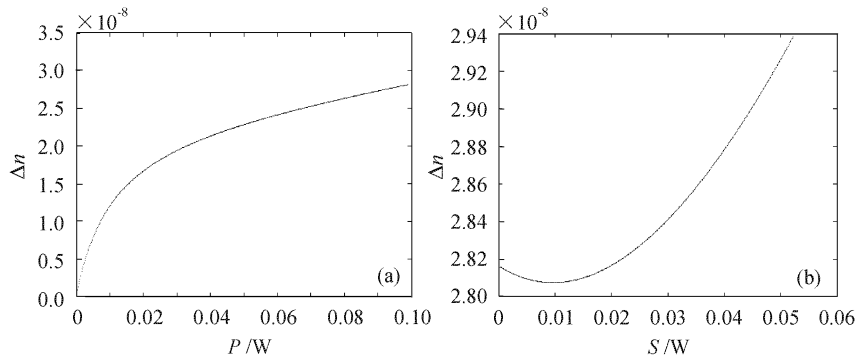


图 3 光纤非线性折射率随入射抽运功率(a)和信号功率(b)的变化

Fig. 3 Nonlinear fiber refractive index versus (a) input pump power and (b) input signal power

图 2 为信号光输出端面在不同抽运功率下克尔效应和增益效应对光纤非线性折射率的影响。从图

2(a)可见,当抽运功率为 0.1 W 时,增益效应对光纤非线性折射率带来较大的影响,而克尔效应对光

纤非线性折射率的影响较小。从图 2(b)可见,当抽运功率为 1 W 时,克尔效应对光纤非线性折射率带来较大的影响,而增益效应对光纤非线性折射率的影响较小,这主要是随抽运功率的增加增益达到了饱和,而克尔效应对光纤非线性折射率的影响是随抽运功率的增加逐渐增加的,克尔效应的产生是因为光纤受强光抽运时,石英介质的三阶电极化率所引起的,它使光纤的折射率发生了变化,其值等于公式(1)中的最后一项。

图 3 为信号光输入端抽运光功率和信号光功率对光纤非线性折射率的影响。从图 3(a)可见,随抽运光功率的增加非线性折射率逐渐增大并趋于饱和,从图 3(b)中可以看出随信号光功率的增加非线性折射率先减小而后增大。当然光纤的非线性折射率还应受光纤的结构常数如:长度、掺杂浓度、数值孔径、掺杂半径等,及温度、组成、拉力、损耗^[14]等因素的影响。

4 结 论

无论是增加抽运光功率或信号光功率,掺铒光纤放大器的非线性折射率的数值小于波长 1064 nm 波段附近所对应的值为正值,大于此值所对应的值为负值;抽运功率较小时增益效应对非线性折射率的影响较大,而抽运功率较大时克尔效应对非线性折射率的影响较大;随抽运功率的增加非线性折射率逐渐增加并达到饱和,随信号光功率的增加先降低而后增加。

参 考 文 献

- 1 Song Kai, Li Ling, Ye Peida. Nonlinear refractive index in Er^{3+} -doped optical fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(8): 1024~1027
- 2 Kazuro Kikuchi. Enhancement of optical-amplifier noise by nonlinear refractive index and group-velocity dispersion of optical fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(2): 221~223
- 3 R. A. Betts, T. Tjugiarto, Y. L. Xue *et al.*. Nonlinear refractive index in erbium-doped optical fiber: Theory and experiment [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(4): 908~913
- 4 S. J. Frisken. Transient Bragg reflection gratings in erbium-doped fiber amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **17**(24): 1776~1778
- 5 Steffen Reichel, Remigius Zengerle. Effects of nonlinear dispersion in EDFA's on optical communication systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(7): 1152~1157
- 6 Ch. Ghisler, W. Lüthy, H. P. Weber. Phase shifts in a Nd^{3+} fiber amplifier [J]. *Appl. Phys. B*, 1993, **57**: 99~102
- 7 Liang Quanting. Nonlinear refractive index of erbium doped fiber and its measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1995, **24**(6): 531~534
梁铨廷. 掺铒光纤的非线性折射率测量[J]. *光子学报*, 1995, **24**(6): 531~534
- 8 O. Lumholt, M. Obro, A. Bjarklev *et al.*. Optimum placement of filters in 1300 nm Nd-doped amplifiers [J]. *Opt. Commun.*, 1992, **89**(1): 49~51
- 9 Tetsuya Miyazaki, Keizo Inagaki, Yoshio Karasawa *et al.*. Nd-doped double-clad fiber amplifier at 1.06 μm [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(4): 562~564
- 10 Yoshihito Hirano, Yasuhiro Shoji, Kenji Tatsumi *et al.*. Double clad Nd doped fiber amplifiers for transmitter of Inter-orbit communications [C]. *SPIE*, 1997, **2990**: 232~234
- 11 Etienne Rochat. High power optical fiber amplifiers for coherent inter-satellite communication [D]. Doctor Thesis, Universite de Neuchatel, Institut de Microtecnica, 2000. 10~15
- 12 Mark Janos, Stephen C. Guy. Signal-induced refractive index changes in erbium-doped fiber amplifier [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(4): 542~548
- 13 Carsten Thirstrup, Yuan Shi, Bera Palsdottir. Pump-induced refractive index modulation and dispersion in Er^{3+} -doped fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(5): 732~738
- 14 Cai Chunping. Dependent factor refractive index in fibers [J]. *Applied Optics*, 2000, **21**(5): 13~18
蔡春平. 光纤折射率的依赖因素[J]. *应用光学*, 2000, **21**(5): 13~18