

文章编号: 1000-7032(2016)02-0197-05

基于布居振荡效应实现掺铥光纤中光波群速度减慢传输

邱 巍^{1*}, 高 波², 王丽波¹, 王誉达¹, 韩晓鹏¹, 范晓星¹, 蒋秋莉¹

(1. 辽宁大学 物理学院, 辽宁 沈阳 110036;

2. 中国科学院 低温工程学重点实验室(理化技术研究所), 北京 100190)

摘要: 从稳态条件下铥离子光纤的速率方程出发, 得到掺铥光纤中光速减慢传输的时间延迟和相对调制衰减的数值解析表达式, 利用数值求解法分别模拟计算了在大功率信号和小功率信号条件下的光速减慢传输。相对于小功率信号, 大功率信号情况下的相对时延、时间延迟和群折射率都比较大, 同时最大相对时延也向高频处移动。

关 键 词: 掺铥离子光纤; 布居效应; 慢光传输

中图分类号: O431.2 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20163702.0197

Controllable Group Velocity Slowdown Based on The Coherent Population Oscillation in Tm³⁺-doped Optical Fiber

QIU Wei^{1*}, GAO Bo², WANG Li-bo¹, WANG Yu-da¹,

HAN Xiao-peng¹, FAN Xiao-xing¹, JIANG Qiu-li¹

(1. Department of Physics, Liaoning University, Shenyang 110036, China;

2. Key Laboratory of Cryogenics, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

* Corresponding Author, E-mail: qiuwei801122@163.com

Abstract: According to the transition rates equation of Tm ion under stable condition, the analytical expression of time delay and the relative modulation attenuations was established. The time delay and fractional delay of slow light under different input power were calculated based on the numerical analysis. It is concluded that the larger time delay, the fractional delay and group refractive index can be obtained under high input power of signal. It is also observed that the peak position of the maximum fractional delay moves to high frequency.

Key words: Tm³⁺-doped optical fiber; coherent population oscillation; slow light

1 引 言

在光学通信领域中, 通信技术在不断提高, 然而控制光的传输速度也愈发重要。实现光速减慢传输不仅能够应用在光通信领域中, 还可应用于全光信号处理、光开关、射频光子学(如相阵天线)、量子计算机等领域^[1-5]。1999年, 美国 Har-

vard 大学的 Hau 科研小组利用电磁感应透明技术(EIT)在 BEC 状态下实现光速减慢到 17 m/s^[6], 从而掀起了对极慢光速研究的热潮。2004年, 南开大学张国权教授在室温情况下, 在 Bi₁₂SiO₂₀ 晶体中得到了极慢的光速^[7-8], 速度达到 0.05 m/s。2005年, Janner 等在实验室中利用 Moire 光纤光栅实现了 1.5 μm 光通信波段的光速减慢, 将脉

收稿日期: 2015-11-09; 修订日期: 2015-12-20

基金项目: 中国科学院低温工程学重点实验室开放项目(CRYO201513)资助

冲延迟了 1 ns^[9]。2006 年,清华大学 Wang 等在高非线性光子晶体光纤中发现了 10 ns 的慢光延迟^[10]。2010 年,Lauro 等在掺铥 YAG 晶体中观察到了光速减慢现象^[11]。2011 年,西班牙科学家 Sonia Melle 等对掺铥光纤中的慢光及超光速的脉宽依赖性进行了研究^[12]。2013 年,Enrique Gómez Pablo 等^[13]研究了 1 064 nm 泵浦掺铥光纤中的慢光和超光的传输。在上述研究背景下,我们结合掺铥 YAG 晶体中观察到的光速减慢现象,对掺铥光纤中的光速减慢传输进行了研究。

本文在掺铥 YAG 晶体中实现光速减慢的基础上,对掺铥光纤中光波群速可控进行研究,首次得到掺铥光纤中光速减慢传输的时间延迟和相对调制衰减的数值解析表达式,利用数值求解法分别模拟计算了在大功率信号和小功率信号条件下的光速减慢传输。相对于小信号功率,大功率信号情况下的相对时延、时间延迟和群折射率都比较大。

2 理论分析

图 1 所示为 Tm^{3+} 能级的示意图。因为 $^3\text{F}_4$ 能级寿命(9.0 ms)远大于 $^3\text{H}_4$ 能级寿命(1.53 ms),所以实现粒子数反转很难。我们采用上转换泵浦的方式实现了粒子数反转。基态($^3\text{H}_6$)粒子基态吸收(GSA)泵浦光,一个光子从基态($^3\text{H}_6$)跃迁到激发态 $^3\text{H}_5$,由于该能级的不稳定性,粒子弛豫衰减快速转移到亚稳态($^3\text{H}_4$)。由于 $^3\text{F}_2$ 能级或者 $^3\text{F}_3$ 能级与亚稳态 $^3\text{H}_4$ 之间的距离恰好等于 1 064 nm,所以处于亚稳态($^3\text{H}_4$)的粒子激发吸收(ESA)再次跃迁到了更高的激发态 $^3\text{F}_2$ 或者 $^3\text{F}_3$,同样粒子又弛豫衰减快速转移到 $^3\text{F}_4$ 能级。

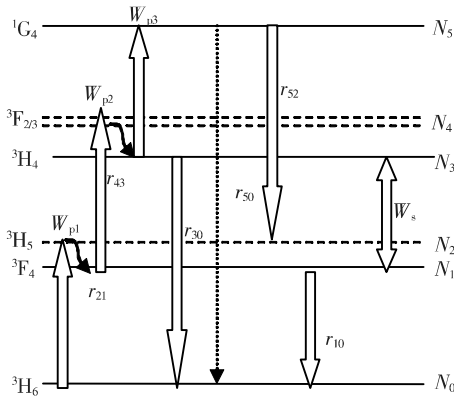


图 1 铥离子能级图

Fig. 1 Energy level diagram of Tm^{3+}

在泵浦光的作用下,低能级 $^3\text{H}_4$ 的粒子数不断地减少,高能级 $^3\text{F}_4$ 的粒子数增加,在 $^3\text{H}_4$ 能级和 $^3\text{F}_4$ 能级之间形成了粒子数反转。

设 $n_i = n_i(r, \phi, z, t)$, $i = 0, 1, \dots, 5$ 分别代表各个能级的粒子数密度, N 表示总粒子数,图 1 中 N_0 、 N_1 、 N_3 、 N_4 、 N_5 表示相对应能级的粒子数。分析 Tm^{3+} 的能级跃迁,可以得到各能级粒子的速率方程:

$$\begin{aligned} \frac{dn_0}{dt} &= -W_{p1}n_0 + r_{10}n_1 + r_{30}n_3 + r_{50}n_5 \\ \frac{dn_1}{dt} &= -(r_{10} + W_{p2} + W_s)n_1 + r_{21}n_2 + W_s n_3 \\ \frac{dn_2}{dt} &= W_{p1}n_0 - r_{21}n_2 + r_{52}n_5 \\ \frac{dn_3}{dt} &= W_s n_1 - (r_{30} + W_s + W_{p3})n_3 + r_{43}n_4 \\ \frac{dn_4}{dt} &= W_{p2}n_1 - r_{43}n_4 \\ \frac{dn_5}{dt} &= W_{p3}n_3 - (r_{50} + r_{52})n_5 \end{aligned} \quad (1)$$

处于 $^3\text{F}_2$ 和 $^3\text{H}_5$ 能级的粒子寿命远小于其他能级,会很快被衰减掉,所以可认为 $^3\text{F}_2$ 和 $^3\text{H}_5$ 能级的粒子数近似为 0,可以忽略不计。由此总粒子数 N 可表示为

$$N = N_0 + N_1 + N_3 + N_5, \quad (2)$$

在忽略损耗的情况下,其传输方程可以表示为

$$\begin{aligned} \frac{dI_s}{dz} &= (\sigma_s^e n_3 - \sigma_s^a n_1)I_s \\ \frac{dI_p}{dz} &= -(\sigma_{p1}^a n_0 + \sigma_{p2}^a n_1 + \sigma_{p3}^a n_3)I_p \end{aligned} \quad (3)$$

I_p 和 I_s 分别代表着泵浦光和信号光的功率密度, σ_s^e 代表受激吸收截面, σ_s^a 代表受激发射截面, σ_{p1}^a 、 σ_{p2}^a 、 σ_{p3}^a 分别代表 $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_5$ 、 $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{F}_2$ 、 $^3\text{H}_4 \rightarrow ^1\text{G}_4$ 的受激吸收截面。式(3)与简化的速率方程联立得到

$$P_s(L, t) = P_s(0, t) \exp\{-b_s N_1 + c_s\}, \quad (4)$$

$$P_p(L, t) = P_p(0, t) \exp\{-b_p N_1 + c_p\}, \quad (5)$$

式(4)为输出端信号光的解析表达式,式(5)为泵浦光功率的解析表达式。

$$\text{公式中定义 } b_s = 2 \frac{\Gamma_s \sigma_s}{A_c}, c_s = \frac{\Gamma_s \sigma_s}{A_c} (N - N_0 - N_5),$$

$$b_p = -\frac{\Gamma_p}{A_c} (\sigma_{p2}^a - \sigma_{p3}^a),$$

$$c_p = \frac{\Gamma_p}{A_c} \sigma_{p3}^a (N_5 - N) + \frac{\Gamma_p}{A_c} (\sigma_{p3}^a - \sigma_{p1}^a) N_0,$$

其中, A_c 表示纤芯掺杂的有效面积, 同时有 $N_i = A_c n_i L, i=0, 1, \dots, 5$; Γ_s 和 Γ_p 代表信号光和泵浦光的重叠积分因子。由此进一步可以得到 N_1 能级粒子数分布的一阶非线性微分方程。对输入信号光强度进行余弦调制, 有

$$P_s(0, t) = P_s^0(0) (1 + m_s \cos \omega t), \quad (6)$$

其中, $P_s^0(0)$ 是未加调制时输入的信号光强度, m_s 是输入的调制系数, ω 为调制频率。针对未加调制稳态, N_1 能级的粒子数为 N_1^0 ; 引入调制后, N_1 能级的粒子数为

$$N_1(t) = N_1^0 [1 + \delta \cos(\omega t + \phi)], \quad (7)$$

式中 δ 和 ϕ 待定。调制频率是抽运光以及探测光的拍频, 对式(7)求导, 并由 N_1 能级粒子数、分布的一阶非线性微分表达式及方程(6)可得

$$\begin{aligned} -N_1^0 \delta \omega \sin(\omega t + \phi) &= \frac{1}{\hbar v_s} P_s^0(0) (1 + m_s \cos \omega t) \cdot \\ &\{ \exp\{-b_s N_1^0 (1 + \delta \cos(\omega t + \phi))\} + c_s\} - 1\} + \\ &\frac{1}{\hbar v_p} P_p^0(0) \{ \exp\{-b_p N_1^0 (1 + \delta \cos(\omega t + \phi))\} + \\ &c_p\} - 1\} + (r_{10} - 2r_{30}) N_1^0 (1 + \delta \cos(\omega t + \phi)) + \\ &2r_{30} N - 2r_{30} N_0 + (3r_{50} + 2r_{52} - 2r_{30}) N_5, \end{aligned} \quad (8)$$

同时, 定义有效频率 $\chi = \frac{1}{\hbar v_s} P_s^0(L) b_s + \frac{1}{\hbar v_p} P_p^0 b_p + 2r_{30} - r_{10}$, 并在保留一次谐波近似下通过三角函数转换, 最后得到 $z=L$ 处的输出信号光功率的表达式

$$P_s(L, t) = P_s^0(0) [1 + \lambda \cos(\omega t - \theta_s)], \quad (9)$$

λ 为输出调制系数。令 $\frac{b_s [P_s^0(L) - P_s^0(0)]}{\hbar v_s} = \varepsilon$, 得到

$$\lambda = \frac{m_s}{\sqrt{\omega^2 + \chi^2}} \sqrt{\omega^2 + (\chi - \varepsilon)^2}, \quad (10)$$

$$\tan \theta_s = \frac{\omega}{\chi - \frac{\chi^2 + \omega^2}{\varepsilon}}, \quad (11)$$

由相对调制衰减定义, 最后可以得到

$$A(\delta) = \ln \frac{(\omega^2 + \chi^2)^{\frac{1}{2}}}{\left\{ \omega^2 + \left\{ \chi - \frac{b_s [P_s^0(L) - P_s^0(0)]}{\hbar v_s} \right\}^2 \right\}^{\frac{1}{2}}}. \quad (12)$$

3 仿真模拟

利用解析表达式进行仿真计算, 粒子数浓度 $N = 2.0 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, 长度设定为 50 m, 大信号功率为 1 mW, 小信号功率为 $1.0 \times 10^{-7} \text{ W}$ 。图 2(a) 和(b) 分别表示在不同泵浦光功率条件下, 大信号的相对调制衰减和小信号的相对调制衰减随调制频率的变化关系。

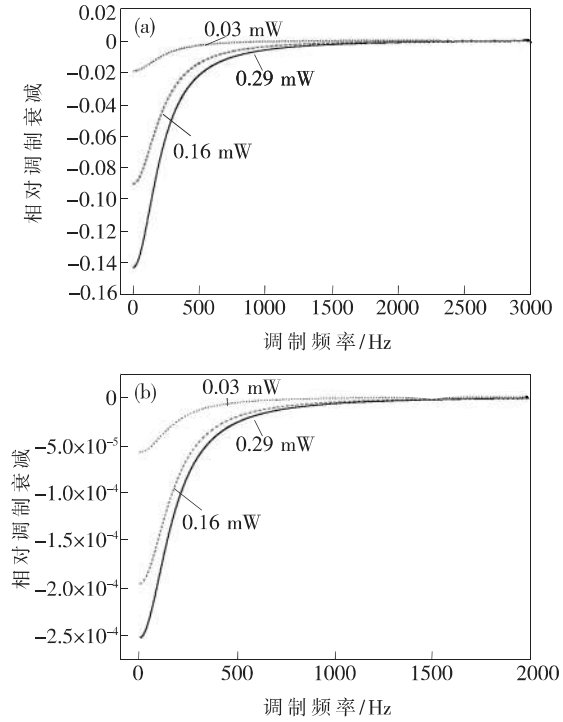


图2 在不同的泵浦光功率情况下, 相对调制衰减和调制频率的变化关系。(a) 大信号; (b) 小信号。

Fig. 2 Relative modulation attenuation vs. modulation frequency under different pump power. (a) Large signal. (b) Small signal.

随着调制频率的不断变化, 相对调制衰减显示, 吸收光谱中烧孔的孔宽大约为 $1/(2\pi T_1)$ 。烧孔导致探测光经历很大的群折射率改变, 从而降低了光波的传输速度。随着泵浦光功率的增加, 光谱烧孔有加宽的趋势。从色散角度考虑, 窄的烧孔(该频谱区域介质的吸收系数急剧变化)必然会伴随着强烈的色散变化。根据色散介质中光波群速度的解析式可知, 掺铋光纤的这种特性大大限制了光脉冲的传输速度。泵浦光功率增加, 光谱烧孔也有功率加宽的趋势。图 3(a) 和(b) 分别代表泵浦功率为 $2.9 \times 10^{-5} \text{ W}$ 时, 大信号功率为 1 mW 和小信号功率为 $1.0 \times 10^{-6} \text{ mW}$ 情况下的相对时延迟和调制频率的变化关系。

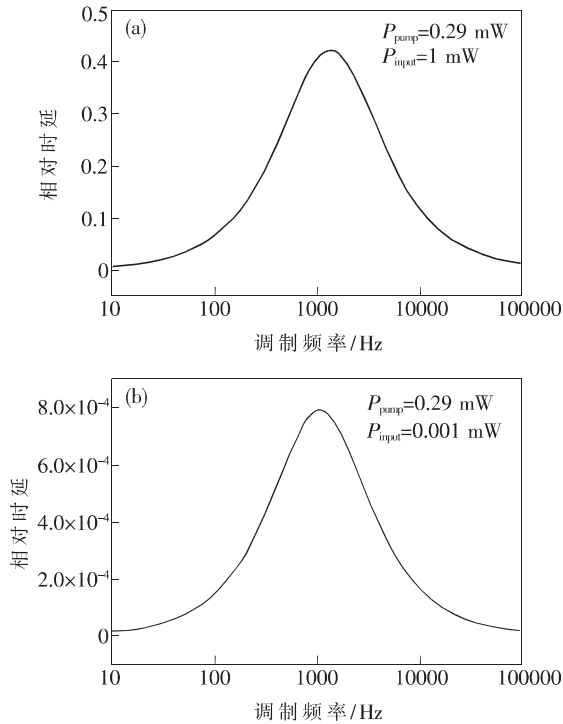


图 3 泵浦光功率为 0.29 mW 时,相对时延与调制频率的关系。(a)大信号;(b)小信号。

Fig. 3 Fractional delay vs. modulation frequency under pump power of 0.29 mW. (a) Large signal. (b) Small signal.

由图 3 可知当入射信号光为大信号时,最大相对延迟出现在调制频率为 1 336 Hz 处,所对应的最大相对时延为 4.2×10^{-1} 。入射信号光为小信号时,最大相对延迟出现在调制频率为 1 081 Hz 处,最大相对时延为 7.93008×10^{-4} 。由此可知,不论入射信号光为大信号还是小信号,在掺铋光纤中均可以实现光速减慢传输,大信号情况下出现的相对时间延迟比较大。

图 4(a) 和(b) 分别为泵浦光的功率在 2.9×10^{-5} W 时,入射信号光的功率分别为大信号和小信号时的时间延迟和群速度与调制频率的关系。由图 4 可知,光信号经历的时间延迟及相对应的光波的群速度依赖调制频率,时间延迟随着调制频率的增加而减小,低频率处获得的时间延迟较大。在理论仿真计算中,当调制频率为 1 Hz 时,大信号情况下得到的时间延迟最大为 1.06×10^{-1} ms,此时相应的群速度为 4.67×10^5 m/s;小信号情况下得到的时间延迟最大为 2.33×10^{-1} μ s,相对应的群速度为 1.25×10^8 m/s。对比可知,在其他条件相同的情况下,入射信号光功率为大信号时的光速减慢传输的时间延迟更大。

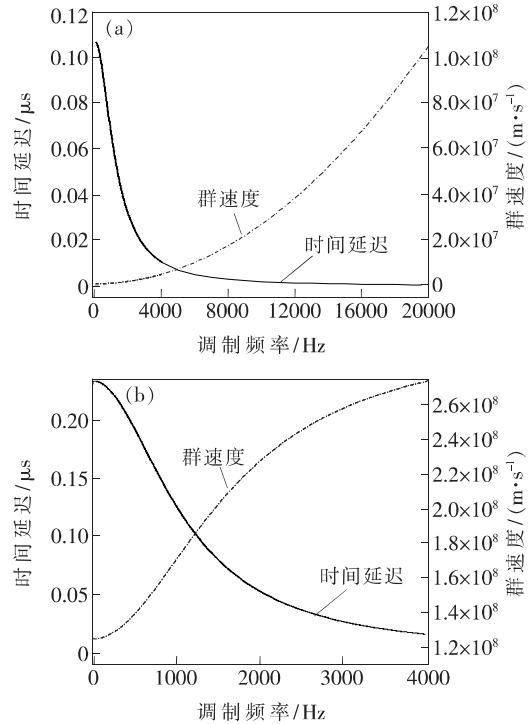


图 4 泵浦光功率为 0.29 mW 时,时间延迟和群速度与调制频率变化的关系。(a)大信号;(b)小信号。

Fig. 4 Time delay and group velocity vs. modulation frequency under pump power of 0.29 mW. (a) Large signal. (b) Small signal.

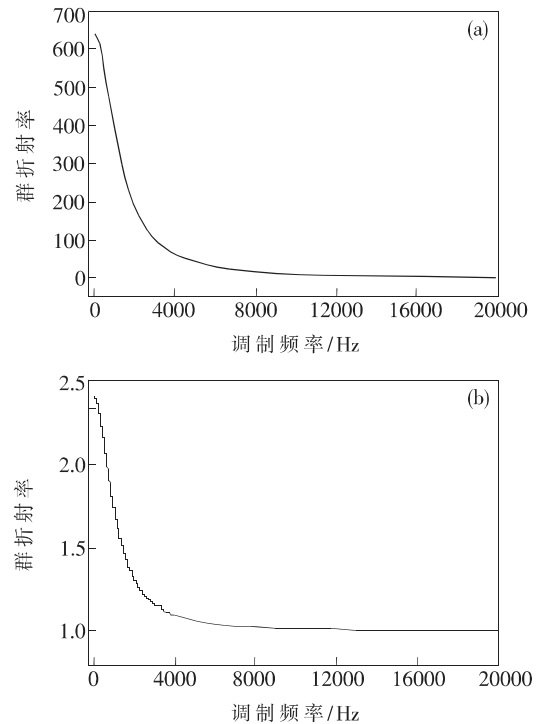


图 5 群折射率随调制频率的变化。(a)大信号;(b)小信号。

Fig. 5 Group refractive index vs. modulation frequency. (a) Large signal. (b) Small signal.

根据群速度表达式 $v_g = \frac{c}{n_g}$, 可得群折射率为 $n_g = \frac{c}{v_g}$ 。据此可知光速减慢传输时的感应群折射率的变化。图 5(a) 和 (b) 分别是在入射信号光功率为大信号和小信号两种条件下, 群折射率与调制频率的关系。由图 5 可知, 群折射率随着调制频率的增加而逐渐减小, 入射信号光功率为大信号时的感应群折射率较大。

4 结 论

从稳态条件下的铥离子速率方程出发, 得到掺铥光纤中光速减慢传输的时间延迟和相对调制衰减的数值解析表达式, 利用数值求解法分别模拟计算了在大功率信号和小功率信号条件下的光速减慢传输。相对于小功率信号, 大功率信号下的相对时延、时间延迟和群折射率都比较大, 同时最大相对时延也向高频处移动。

参 考 文 献:

- [1] SU H, KONDRATKO P, CHUANG S L. Variable optical delay using population oscillation and four-wave-mixing in semiconductor optical amplifiers [J]. *Opt. Express*, 2006, 14(11):4800-4807.
- [2] GAO F, XU J J, QIAO H J, *et al.*. Observation of superluminal and slowdown light propagation in doped lithium niobate crystals [J]. *Opt. Commun.*, 2006, 257(1):185-190.
- [3] YELLESWARAPU C S, PHILIP R, ARANDA F J, *et al.*. Slow light in bacteriorhodopsin solution using coherent population oscillations [J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(13):1788-1790.
- [4] KOBAYAKOV A, SAUER M, CHOWDHURY D. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers [J]. *Adv. Opt. Photon.*, 2010, 2(1):1-59.
- [5] 邱巍, 掌蕴东, 叶建波, 等. 损耗可控条件下掺铥光纤中光速减慢现象的研究 [J]. *物理学报*, 2008, 57(4):2242-2247.
 QIU W, ZHANG Y D, YE J B, *et al.*. Research on group velocity slowdown in erbium-doped optical fiber under controllable absorption loss [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2008, 57(4):2242-2247. (in Chinese)
- [6] HAU L V, HARRIS S E, DUTTON Z, *et al.*. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas [J]. *Nature*, 1999, 397(6720):594-598.
- [7] ZHANG G Q, BO F, DONG R, *et al.*. Phase-coupling-induced ultraslow light propagation in solids at room temperature [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 93(13):133903-1-4.
- [8] ZHANG G Q, DONG R, BO F, *et al.*. Slowdown of group velocity of light by means of phase coupling in photorefractive two-wave mixing [J]. *Appl. Opt.*, 2004, 43(5):1167-1173.
- [9] GONZÁLEZ-HERRÁEZ M, SONG K Y, THÉVENAZ L. Optically controlled slow and fast light in optical fibers using stimulated Brillouin scattering [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87(8):081113.
- [10] WANG Y, ZHANG W, HUANG Y D, *et al.*. SBS slow light in high nonlinearity photonic crystal fiber [C]. *Conference on Optical Fiber Communication and The National Fiber Optic Engineers Conference, Anaheim*, 2007:1-3.
- [11] LAURO R, CHANELIÈRE T, LE GOUÉT J L. Slow light using spectral hole burning in a Tm^{3+} -doped yttrium-aluminum-garnet crystal [J]. *Phys. Rev. A*, 2009, 79(6):063844-1-6.
- [12] ARRIETA-YÁÑEZ F, CABRERA-GRANADO E, EZQUERRO J M, *et al.*. Pulse-width-dependent subluminal and superluminal propagation in highly doped erbium fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2011, 28(5):1172-1179.
- [13] PABLO E G, SÁNCHEZ M P, STEPANOV S. Slow and fast light via two-wave mixing in ytterbium-doped fiber at 1 064 nm [J]. *Opt. Commun.*, 2013, 300:45-50.



邱巍(1977 -), 女, 辽宁阜新人, 博士, 副教授, 2008 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 主要从事非线性光学及光速可控方面的研究。
 E-mail: qiuwei801122@163.com