

文章编号: 0258-7025(2008)04-0563-04

掺铒光纤中浓度效应对光脉冲群速的影响

叶建波 掌蕴东 邱 巍 徐焕文

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要 利用相干布居振荡技术在介质吸收光谱上产生烧孔, 孔宽大约为基态粒子数恢复时间的倒数。由增益理论分析得出不同抽运光强度对介质吸收状态的影响。在介质的吸收区域, 振荡导致光脉冲经历饱和和吸收, 脉冲传输延迟; 在介质的增益区域, 振荡又导致光脉冲经历增益饱和、脉冲传输超前。将此技术应用在掺铒光纤(EDOF)中实现了光速人为可控。根据布居振荡效应及增益理论, 由速率方程出发, 得到了探测光的群折射率的理论解析表达式。考虑掺铒浓度对光脉冲群速度的影响, 分别对四种浓度的光纤进行实验研究, 观测到的最慢群速分别为 3.45×10^2 m/s, 相应感生群折射率 8.7×10^5 。

关键词 光纤光学; 光谱烧孔; 相干布居振荡; 饱和吸收; 慢光

中图分类号 O 437 **文献标识码** A

Effect of Ion Density on Slow Light Propagation in Erbium-Doped Optical Fiber

Ye Jianbo Zhang Yundong Qiu Wei Xu Huanwen

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Optoelectronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract In the absorption spectrum of the medium, a burned hole is appeared by coherent population oscillation, and the linewidth of this feature is approximately the inverse of the ground state population recovery time. Based on the theoretical analysis of gain, the effect of absorption on the different pump powers is obtained. In the medium absorption range, the oscillation leads the pulse to experience absorption saturation and propagation delay; in the medium gain range, this effect induces the pulse to experience gain saturation and propagation advance. Making use of coherent population oscillation we can control the group velocity of light propagation in erbium-doped optical fiber. According to coherent population oscillation and gain theory, the analytic expression of the group index from rate equation is obtained. In the experiment the slowest group velocity was 3.45×10^2 m/s, and the corresponding group index was 8.7×10^5 . The simulation results are quantitatively coincident with the experimental data.

Key words fiber optics; spectral burning hole; coherent population oscillation; saturable absorption; slow light

1 引言

随着激光的出现以及激光技术的发展, 人们对光以及光与物质相互作用的本质有了更深入的理解, 光学也拓展到非线性领域, 这就使得向传统意义上的光速发起挑战成为可能。近年来, 控制光在介质中的传输速度已经成为光子学领域的一个热点课题。

1967 年 Schwartz 等^[1]通过求解密度矩阵的运动方程预言: 在用强光抽运介质的情况下用第二束光来探测时会产生光谱烧孔现象, 即使此时介质的加宽机制是常规的均匀加宽。当拍频频率小于或近似等于粒子弛豫时间的倒数时, 抽运光波可以有效地把瞬态调制的基态粒子散射到探测波上去, 从而限制了探测波的吸收, 在探测光的吸收线上出现烧

收稿日期: 2007-09-02; 收到修改稿日期: 2007-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(60478014, 60272075)资助项目。

作者简介: 叶建波(1982—), 男, 浙江人, 硕士研究生, 主要从事光速可控技术方面的研究。E-mail: yejianboh@hit.edu.cn

导师简介: 掌蕴东(1957—), 男, 辽宁人, 教授, 博士生导师, 主要从事量子光学、非线性光学和光速可控技术等方面的研究。E-mail: ydzhang@hit.edu.cn

孔,而且烧孔的宽度正比于粒子的弛豫时间。在介质的烧孔区域同时实现了高透射率和强色散。2003年,Boyd小组在室温条件下,利用光谱烧孔技术在红宝石和紫翠宝石晶体中观测到慢光及超光速传输现象^[2,3],标志着光控技术有可能走向实用。但在实现室温固体中光速可控的实验时,光波只能工作在特定波长,且需要特殊晶体,对实验条件要求较高。随着研究的不断深入,对光速可控的研究工作已逐渐转移到光纤介质中来。由于信号光工作在1550 nm波段,给通信方面的实际应用带来了更大的前景。Lepeshkin等^[4,5]在掺杂光纤中观测到慢光及超光速传输现象。

本文在红宝石等晶体中慢光^[6~8]和光纤中慢光及超光速^[9,10]理论和实验研究结果的基础上,采用低功率激光作为信号光源,利用光谱烧孔造成折射率急剧变化,在掺铒光纤(EDOF)中实现光脉冲群速可控,并分析了不同掺铒浓度(指单位体积内的铒离子个数)对光脉冲群速延迟的影响。

2 理论模型

由于粒子由激发态至亚稳态的弛豫时间远小于亚稳态到基态的弛豫时间,所以可以近似地认为激发态能级上粒子数为零,即 $N_3 = 0$ ($N_i, i = 1, 2, 3$ 为各能级上的粒子数分布)。Er³⁺可简化为二能级激光系统,设基态粒子数密度为 n_1 ,亚稳态粒子数密度为 n_2 ,给出速率方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_1}{\partial t} &= -R_{13}n_1 - W_{12}n_1 + W_{21}n_2 + \frac{\rho - n_1}{\tau}, \\ \frac{\partial n_2}{\partial t} &= W_{12}n_1 - W_{21}n_2 + R_{13}n_1 - \frac{n_2}{\tau}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $n_1 + n_2 \approx \rho$, ρ 为铒离子的密度, W 为与信号有关的跃迁概率, R 为与抽运有关的跃迁概率。在忽略掺铒光纤的散射及其他损耗的近似下,由跃迁概率方程

$$W_{12} = \frac{\tau_s \sigma_{12} P_s}{A}, \quad W_{21} = \frac{\tau_s \sigma_{21} P_s}{A}, \quad R_{13} = \frac{\tau_p \sigma_{13} P_p}{A},$$

和光传输方程(忽略损耗项)

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_p}{\partial z} &= -\tau_p \sigma_{13} n_1 P_p, \\ \frac{\partial P_s}{\partial z} &= -\tau_s \sigma_{12} n_1 P_s + \tau_s \sigma_{21} n_2 P_s, \end{aligned}$$

得

$$\frac{\partial}{\partial t}(An_1) = \frac{\partial}{\partial z} P_p + \frac{\partial}{\partial z} P_s + \frac{(\rho - n_1)A}{\tau}, \quad (2)$$

其中 A 为纤芯掺杂的有效面积, σ_{12}, σ_{13} 分别为基态

对信号光和抽运光的吸收截面, σ_{21} 为亚稳态的受激发射截面。

(2)式沿着 z 方向积分,并定义 $b_p = \frac{\Gamma_p \sigma_{13}}{A}, b_s = \frac{\Gamma_s(\sigma_{12} + \sigma_{21})}{A}, c_s = \Gamma_s \sigma_{21} \rho L$,其中 Γ_s, Γ_p 分别代表信号光和抽运光光模场与纤芯掺杂区的重叠积分因子。得到基态粒子数分布的一阶非线性微分方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} N_1 &= P_p(0, t)[\exp(-b_p N_1) - 1] + \\ &P_s(0, t)[\exp(-b_s N_1 + c_s) - 1] + \frac{N_0 - N_1}{\tau}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 N_1 为基态粒子数, N_0 为总粒子数。

对信号光进行功率调制, $P_s(0, t) = P_s^0(0)(1 + \mu \cos \omega t)$,其中 $P_s^0(0)$ 为未加调制时输入端信号光功率, ω 为调制频率, μ 为输入调制系数。

假设基态粒子数的分布为 $N_1(t) = N_1^0[1 + \delta \cos(\omega t + \phi)]$,其中 N_1^0 为未加调制时的稳态解。稳态情况(即 $\frac{\partial}{\partial t} N_1 = 0$ 时)下,由(3)式可得 N_1^0 近似解析表达式

$$N_1^0 = \frac{P_s^0(0)c_s + (N_0/\tau)}{P_p^0(0)b_p + P_s^0(0)b_s + (1/\tau)}, \quad (4)$$

再利用Newton-Raphso迭代法和(3)式的稳态表达式,经过五次以上的重复迭代,可确定未加调制时比较精确的稳态解 N_1^0 ,从而得到未加调制时输出端抽运光及信号光的强度表达式

$$\begin{aligned} P_p^0(L) &= P_p^0(0)\exp\{-b_p N_1^0\}, \\ P_s^0(L) &= P_s^0(0)\exp\{-b_s N_1^0 + c_s\}. \end{aligned} \quad (5)$$

定义 $\omega_{\text{eff}} = P_s^0(L)b_s + P_p^0(L)b_p + (1/\tau)$,对基态粒子数的分布 $N_1(t)$ 求导,保留一次谐波量,得到基态粒子数调制的相位和幅度表达式

$$\begin{cases} \tan \phi = -\frac{\omega}{\omega_{\text{eff}}} \\ N_1^0 \delta = \frac{\mu [P_s^0(L) - P_s^0(0)]}{\sqrt{\omega^2 + \omega_{\text{eff}}^2}} \end{cases} \quad (6)$$

把 $N_1(t) = N_1^0[1 + \delta \cos(\omega t + \phi)]$ 代入输出光信号强度表达式 $P_s(L, t) = P_s(0, t)\exp\{-b_s N_1 + c_s\}$,化简并保留一次谐波量,可得

$$\begin{aligned} P_s(L, t) &= \\ &P_s^0(L)[1 + \mu \cos \omega t - b_s N_1^0 \delta \cos(\omega t + \phi)] = \\ &P_s^0(L)[1 + \mu' \cos(\omega t - \theta_s)], \end{aligned} \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} \mu' = \sqrt{(\mu - b_s N_1^0 \delta \cos \phi)^2 + (b_s N_1^0 \delta \sin \phi)^2} \\ \tan \theta_s = \frac{b_s N_1^0 \delta \sin \phi}{\mu - b_s N_1^0 \delta \cos \phi} \end{cases},$$

若定义 $b_s [P_s^0(L) - P_s^0(0)] = \eta$, 可得到光信号的群折射率为

$$n_g = -\frac{c}{\omega L} \arctan \left[\frac{\omega}{(\omega_{\text{eff}}^2 + \omega^2) / \eta - \omega_{\text{eff}}} \right]. \quad (8)$$

3 实验研究

通过理论分析, 知道光纤中掺铒离子的浓度直

表 1 掺铒光纤参数表

Table 1 Parameters of erbium-doped optical fibers

Optical fiber	Erbium ion density / ($\times 10^{25} \text{ m}^{-3}$)	Core radius / μm	Absorption coefficient α_s / (dB/m)	Absorption coefficient α_p / (dB/m)	Emission coefficient β_s / (dB/m)
Nufern	0.5	1.66	2.826	3.715	4.318
Er-20	1.6	1.7	7.86	13.6	11.814
Er-40	3.2	1.5	16.477	26	24.767
Er-80	6.3	1.5	31.71	42.3	47.665

图 1 给出的是在探测光输入光纤前功率为 1.78 mW, 调制频率为 10 Hz 时, 光脉冲在不同浓度的光纤中的脉冲波形, 其中虚线为探测光, 实线为参考光。延迟分别为 (a) Nufern—2.75 ms; (b) Er-20—8 ms; (c) Er-40—8.75 ms; (d) Er-80—10.5 ms。

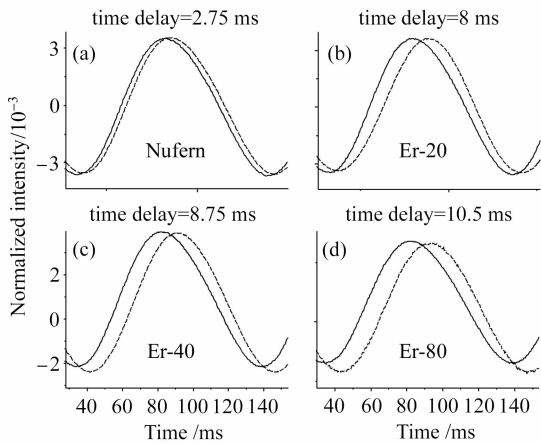


图 1 在探测光输入光纤前功率为 1.78 mW, 调制频率为 10 Hz 时, 光脉冲在不同浓度的光纤中的脉冲波形

Fig. 1 Measured waveforms of the input and output signals with different ions densities at the modulation frequency of 10 Hz with an input signal power of 1.78 mW

图 2 是光脉冲的群折射率与调制频率的关系。最慢群速分别为 $1.49 \times 10^3 \text{ m/s}$, $5.26 \times 10^2 \text{ m/s}$, $4.76 \times 10^2 \text{ m/s}$, $3.45 \times 10^2 \text{ m/s}$, 相应的感生群折射率分别为 2.01×10^5 , 5.7×10^5 , 6.3×10^5 ,

接影响信号延迟及相应的群速度(或群折射率), 因此在实验中, 选用不同浓度的光纤观察浓度效应对光脉冲群速的影响, 如表 1 所示。

吸收系数 α 和发射系数 β 与重叠积分因子、吸收截面以及发射截面存在下列关系: $\alpha_s = \Gamma_s \sigma_{12} \rho$, $\alpha_p = \Gamma_p \sigma_{13} \rho$, $\beta_s = \Gamma_s \sigma_{21} \rho$ 。实验所用的四根掺铒光纤长度均为 5 m。信号光波长为 1553 nm, 功率为 4.05 mW, 经分束器被分为两束光, 一束作为探测光, 经过光纤后入射到探测器 1; 另一束作为参考光, 直接入射到探测器 2 (两探测器与示波器相连)。

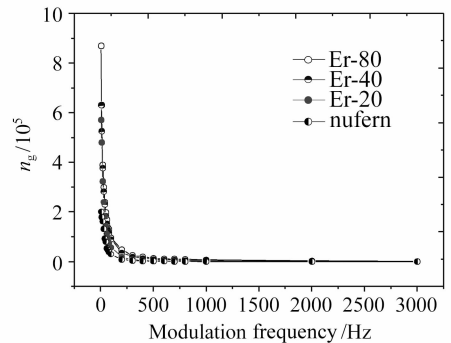


图 2 不同浓度光纤中光脉冲的群折射率与调制频率的关系

Fig. 2 Group index as a function of the modulation frequency in fiber with different ions densities

8.7×10^5 。

4 结论

通过实验发现在不同掺铒离子浓度的光纤中, 光脉冲的群速度是可控的, 而且在光纤长度一定的条件下, 掺铒浓度越高, 群延迟越大。因此, 可以通过调节铒离子浓度, 来得到任何大小的群延迟。但是随着掺杂浓度的提高, 吸收系数越来越大, 光脉冲功率急剧下降, 而探测器的探测能力有限, 即使使用精度高的探测器, 探测到微弱的光信号, 但此时光路中的噪声可与信号相比拟, 严重影响脉冲波形。所以在实际应用中, 只能在一定范围内达到光脉冲群速度可控。

参 考 文 献

- 1 S. E. Schwartz, T. Y. Tan. Wave interactions in saturable absorbers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1967, **10**(1):4~7
- 2 Matthew S. Bigelow, Nick N. Lepeshkin, Robert W. Boyd. Observation of ultraslow light propagation in a ruby crystal at room temperature [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(11):113903
- 3 Matthew S. Bigelow, Nick N. Lepeshkin, Robert W. Boyd. Superluminal and slow light propagation in a room-temperature solid [J]. *Science*, 2003, **301**(5630):200~202
- 4 Nick N. Lepeshkin, Aaron Schweinsberg, Matthew S. Bigelow *et al.*. Slow and fast light propagation in erbium-doped fiber [C]. *Proceedings of Quantum Electronics and Laser Science Conference*, 2005. 220~222
- 5 A. Schweinsberg, N. N. Lepeshkin, M. S. Bigelow *et al.*. Observation of superluminal and slow light propagation in erbium-doped optical fiber [J]. *Europhys. Lett.*, 2006, **73**(2):218~224
- 6 Fan Baohua, Zhang Yundong, Yuan Ping. Ultraslow light propagation in a solid [J]. *Chin. Phys. Sin.*, 2005, **54**(10):4692~4695
范保华, 掌蕴东, 袁 萍. 固体介质中光速减慢现象的研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(10):4692~4695
- 7 Zhang Yundong, Fan Baohua, Yuan Ping *et al.*. Reduction of light group velocity by coherent population oscillation in a ruby crystal [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(1):87~89
- 8 Yundong Zhang, Jianbo Ye, Wei Qiu. Optical amplification and slow light based on two-wave mixing at large modulation depth [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2007, **24**(5):1248~1251
- 9 Yundong Zhang, Wei Qiu, He Tian *et al.*. A tunable optical delay line based on slow light [C]. *Proceedings of International Conference OSA Headquarter*, 2006. 7 20
- 10 Wei Qiu, Yundong Zhang, Jianbo Ye *et al.*. Slowdown of group velocity of light using coherent population oscillation [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(2):489~492

《光学学报》、《中国激光》、*Chinese Optics Letters* 三刊联席编委会在沪召开

2008年3月20日,《光学学报》、《中国激光》、*Chinese Optics Letters*三刊联席编委会在中科院上海光机所召开,三刊编委共72人参加了会议。

会议由上海光机所副所长邵建达研究员主持,朱健强所长致欢迎词,并向三刊编委们介绍了上海光机所的情况,并阐述了作为国内权威光学期刊主办单位对于如何办好期刊的一些思路和做法。中国光学学会理事长,《中国激光》主编周炳琨院士代表光学学会向与会编委介绍了中国光学学会近期的主要工作,并指出期刊工作一直是学会的一项重要工作,学会成立了专门的期刊管理机构,坚持严格的管理标准,培育了国内最优秀的几种光学期刊。周理事长对三刊编辑部的工作给予了很高的评价,并希望在编委们的支持和帮助下,期刊坚持联合创新的方向,并开辟国际合作的天空。科技部副部长,《光学学报》主编曹健林用贺信形式对《光学学报》的工作加以肯定,并祝贺三刊联席编辑部成功召开。光学期刊联合编辑部主任杨蕾向编委们详细汇报了编辑部近几年来工作情况,并介绍了三刊取得的成绩、提出了努力的方向。



周炳琨院士在三刊编委联席会议上发言



三刊编委集体合影

在分会场讨论议程中,编委们就期刊的现状和发展展开了热烈的讨论,纷纷提出自己的意见和建议,为刊物的发展出谋划策。编委们对上届编委会卓有成效的工作表示肯定和感谢。对三刊编辑部联合发展的做法给予了高度赞扬,希望三刊能保持自己的特色,重视品牌优势,在稿源和审稿方面多下功夫,并瞄准前沿学科,跟踪交叉专业,克服困难,加大国际合作的力度。

会议还对编委会章程进行了讨论和修改,并就光学期刊联合编辑部如何充分发挥编委的学术把关作用、各期刊如何更加明确定位,以及设置栏目、吸引稿源等议题进行了热烈地讨论,并形成一致的决议。编委们纷纷表示,将会一如既往地关心和支持期刊的发展,并相信在大家的共同努力下,中国的光学期刊一定会越办越好。