

室温掺铒光纤放大器中实现参量控制 无损光速减慢传输*

邱巍[†] 马英驰 吕品 刘典 徐晓娟 张程华

(辽宁大学物理学院, 沈阳 110036)

(2011年7月4日收到; 2011年8月29日收到修改稿)

本文对掺铒光纤放大器中的光速减慢传输系统进行深入研究, 提出一种直接利用掺铒光纤放大器中抽运光强度和掺铒光纤长度, 通过优化控制参量来降低信号光强度损耗系数, 从而可以实现无强度损耗光速减慢传输, 研究表明: 当抽运光功率为 3.5 mW 时, 信号光强度损耗系数近似为零; 当抽运光关闭时, 掺铒光纤长度为 0.1 m 时, 信号光强度损耗系数近似为零.

关键词: 掺铒光纤放大器, 参量控制, 相干布居振荡, 慢光

PACS: 42.25.Bs, 42.70.Nq

1 引言

从认识光与电磁波的相互关联, 测量光的传播速度, 到改变光在介质中的群速度, 实现光的群速度可控, 反映了人类对光与物质相互作用本质了解的逐渐深入, 而且也表明人类驾驭自然的能力不断的增强. 通过光速可控的研究, 人们将对光与介质的相互作用的本质有更深入的理解, 更进一步发现内在物理规律. 除在全光通信网中的应用外, 极慢光速可以用于光开关、全光信号处理, 量子计算机, 射频光子学(比如相阵天线)等领域. 全光缓存器是全光通信网的关键部件, 当不同用户竞争同一个通道时, 光缓存器能有效地解决互联网拥塞. 因此, 全光缓存器是对高速光信息处理的前提. 利用介质系统中光速减慢原理制作的光缓存是一个非常有竞争力的方案, 同时追求极慢的光速也成为当前光信息技术的一个热点问题^[1-5].

掺杂晶体和原子蒸气等慢光介质对实验装置要求较高, 难以实现设备小型化、集成化. 随着研究的深入, 光速减慢研究工作已逐渐转移到光纤介质中来^[6-10]. 2005年瑞士和美国研究人员分别

在实验上实现了光纤中基于 SBS 的可控慢光. 瑞士 Luc Thévenaz 实验小组对脉宽为 100 ns 的探测脉冲进行延时, 当增益为 30 dB 时得到最大延迟时间 30 ns, 相对延时为 0.3. 2006年, Schweinsberg 等人利用光谱烧孔技术在掺铒光纤中观测到光速减慢传输^[11]. 2008年, 哈尔滨工业大学研究小组也对掺铒光纤中的光速减慢进行研究, 同时对掺铒光纤中的损耗控制条件进行初步讨论, 实现了较低损耗状态下的光速减慢传输^[12,13].

在光纤中对光脉冲的传输速度进行操控有非常高的实用价值, 其显著特点是成本低、可以工作在通信波段、而且波长可以调节、并且相互作用距离可控^[14]. 因此, 利用光纤材料系统基于光速减慢原理制成的光缓存器研究具有巨大的经济效益和意义. 但同时光纤介质具有强烈的吸收特性, 在实现光波群速减慢传输时, 必然会导致信号光强度的损耗严重, 这使得慢光信号传输失真严重、测量精度低、光速减慢传输技术在实际中难以得到真正的应用. 因此, 对实现无强度损耗条件下的光速减慢传输进行研究具有重要的现实意义. 本文简化低损耗条件下的光速减慢传输系统, 直接利用掺铒

* 辽宁大学国家级项目预申报基金(批准号: 2009LDGY06), 辽宁大学博士启动基金和国家自然科学基金(批准号: 10874062)资助的课题.

[†] E-mail: qiuwei1202@yahoo.com.cn

光纤放大器中的抽运光强度和掺铒光纤长度, 通过优化控制参量来降低信号光强度损耗系数, 从而可以实现无强度损耗光速减慢传输, 研究结果对于光速减慢技术的应用具有重要意义.

2 理论研究

应用掺铒光纤放大器的理论模型^[15], Er^{3+} 可简化为二能级激光系统, 若基态粒子数密度为 n_1 , 亚稳态粒子数密度为 n_2 , 速率方程可表示为

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

$$\frac{\partial n_2}{\partial t} = W_{12}n_1 - W_{21}n_2 + R_{13}n_1 - \frac{n_2}{\tau},$$

其中, $n_1 + n_2 \approx \rho$, ρ 为铒离子的密度, W 表示与信号有关的跃迁概率, R 表示与抽运有关的跃迁概率. 由亚稳态速率方程可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} N_2 = & P_s(0, t) [1 - \exp\{B_s N_2 - C_s\}] \\ & + P_p(0, t) [1 - \exp\{B_p N_2 - C_p\}] - \frac{N_2}{\tau}, \end{aligned} \quad (2)$$

此处定义 $B_p = \frac{\Gamma_p \sigma_{13}}{A}$, $C_p = \Gamma_p \sigma_{13} \rho L$, $B_s = \frac{\Gamma_s (\sigma_{12} + \sigma_{21})}{A}$, $C_s = \Gamma_s \sigma_{12} \rho L$, 经推导可得

$$N_2^0 = \frac{C_p P_p^0(0) + C_s P_s^0(0)}{B_p P_p^0(0) + B_s P_s^0(0) + \frac{1}{\tau}}, \quad (3)$$

其中, A 表示纤芯掺杂的有效面积, Γ_s , Γ_p 代表信号光和抽运光模场与纤芯掺杂区的重叠积分因子, 其值随掺杂半径而变. 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. 引入随时间改变的余弦功率信号作为传输信号 (或者抽运) 的调制 $P_s(0, t) = P_s^0(0) (1 + m_s \cos \omega t)$, $N_2(t) = N_2^0 [1 + \delta \cdot \cos(\omega t + \phi)]$, 此式中 δ 和 ϕ 待定, 经推导可得

$$\begin{aligned} & -N_2^0 \delta \omega \sin(\omega t + \phi) \\ = & P_s^0(0) [1 - \exp\{B_s N_2^0 - C_s\}] \\ & \times (1 + B_s N_2^0 \delta \cos(\omega t + \phi)) \\ & + P_s^0(0) m_s \cos \omega t \\ & \times [1 - \exp\{B_s N_2^0 - C_s\}] \\ & + P_p^0(0) \cdot [1 - \exp\{B_p N_2^0 - C_p\}] \\ & \times (1 + B_p N_2^0 \delta \cos(\omega t + \phi)) \end{aligned}$$

$$-N_2^0 \frac{1 + \delta \cdot \cos(\omega t + \phi)}{\tau}. \quad (4)$$

光纤输出端输出信号光功率为 $P_s(L, t) = P_s^0(L) [1 + m'_s \cos(\omega t + \theta_s)]$, 令 $\omega_{\text{eff}} = P_s^0(L) B_s + P_p^0(L) B_p + \frac{1}{\tau}$, $B_s [P_s^0(0) - P_s^0(L)] = \kappa$, 经推导最后可以得到

$$\begin{aligned} \tan \theta_s &= \frac{-\frac{\omega \cdot \kappa}{\sqrt{\omega_{\text{eff}}^2 + \omega^2}}}{\sqrt{\omega^2 + \omega_{\text{eff}}^2} + \frac{\omega_{\text{eff}} \cdot \kappa}{\sqrt{\omega_{\text{eff}}^2 + \omega^2}}} \\ &= -\frac{\omega}{\omega_{\text{eff}} + \frac{\omega_{\text{eff}}^2 + \omega^2}{\kappa}}. \end{aligned} \quad (5)$$

信号光强度损耗系数 $\gamma = \ln \frac{P_s s^0(0)}{P_s^0(L)}$, 由此可见当 $\gamma \approx 0$ 时, 入射信号光功率和输出信号光功率近似相等, 输出信号光损耗越小, 损耗系数越小; 输出信号光损耗越大, 损耗系数越大, 采用不同的实验条件及技术手段尽量来降低损耗系数.

由掺铒光纤放大器的模型及慢光理论分析可知: 当掺铒光纤放大器中的抽运光源关闭时, 掺铒光纤放大器中的铒光纤处于强吸收状态, 此时调制后的信号光入射到掺铒光纤放大器中, 根据克拉默斯-克勒尼希色散关系可知, 由于量子相干布居振荡效应, 当调制频率小于或近似等于粒子数弛豫时间的倒数时, 探测光吸收的突然降低, 群折射率也在同样的很窄的频率范围内急剧增强, 这样群速度会变得非常的小, 实现光速减慢传输, 但信号光的强度损耗很大, 此时信号光损耗系数很大, 这使得慢光信号传输失真严重、测量精度低, 不利于实际的应用; 当掺铒光纤放大器中的抽运光强度一定时 (低于慢光到超光速转变的临界值), 掺铒光纤处于较弱的吸收状态, 此时调制后的信号光入射到掺铒光纤放大器中, 根据克拉默斯-克勒尼希色散关系可知, 群速度会相应减小, 但信号光的强度得到一定的增益放大. 这样, 在实现光速减慢传输的同时, 信号光的强度得到放大, 由理论分析可知, 掺铒光纤放大器中的抽运光功率的大小及铒光纤的长度是此系统的关键, 这样我们通过控制掺铒光纤放大器中的抽运光源强度和掺铒光纤的长度可以降低信号光的损耗系数, 从而进一步优化参量可以达到信号光损耗系数为零. 这种强度增益的方法也给我们进一步实现慢光信号的长距离传输指出的新的思路, 即通过中继放大的方法来实现慢光信号的长距离传送.

本文设定入射信号光功率为 4.0 mW, 通过光衰

减器连续可调 (0—4.0 mW) 掺铒光纤放大器中的抽运光功率连续可调 (0—40mW), 铒光纤长度可以连续改变. 计算过程中所需的各参数由光纤公司提供, 信号光波长为 1550 nm, 抽运光波长为 980 nm, 铒离子典型的弛豫时间 τ 为 10.5 ms.

3 仿真计算

我们选用强度为 1 mW 的信号光进行理论仿真计算, 抽运光功率连续可调. 图 1 为信号光损耗系数和输出信号光强度与铒光纤长度的关系, 此时抽运光源关闭. 图 2 为掺铒光纤为 0.2 m 时所对应的时间延迟及相应的群速度, 由图可知可以实现的最大的时间延迟为 0.07 ms, 相应的群速度为 2.91×10^3 m/s. 由图 1 可见, 当掺铒光纤长度为 0.1 m 时, 信号光最高输出强度可以达到 0.983 mW, 此时对应的损耗系数为 0.017, 此值已经很接近于 0. 由图 1、图 2 可见, 在采用短掺铒光纤的掺铒光纤放大器 (浓度: 5.4×10^{24}) 的情况下, 输出信号光的功率较强, 信号光损耗系数很小, 近似为零, 但此时由于相互作用距离很短, 慢光信号的时间延迟较小, 光速减慢有限. 同时, 为了研究掺铒光纤放大器中铒光纤的浓度的影响, 应用高浓度的 EDFA (浓度: 3.2×10^{25}) 进行了同样的研究, 研究结果由图 3、图 4 所示, 我们具体计算了输出信号光功率和损耗系数, 计算了 0.2 m 长的掺铒光纤所对应的时间延迟和群速度. 由图 3 可见, 当选用高浓度的掺铒光纤放大器时, 掺铒光纤为 0.1 m 时, 信号光最高输出强度可以达到 0.915 mW, 此时对应的损耗系数为 0.088, 由此可见高浓度直接使得输出信号光功率降低和损耗系数增强. 图 4 给出了当掺铒光纤为 0.2 m 时的时间延迟和所对应的群速度的计算结果, 由图可知可以实现的最大的时间延迟为 0.352 ms, 相应的群速度为 567.37 m/s. 由图 3 和图 4 的分析可知选用高浓度的掺铒光纤虽然损耗系数有所提高, 但其光速减慢增强.

不同输入信号光功率下的输出强度和损耗系数由图 5 所示. 由图 5 可见, 掺铒光纤长度一定的情况下, 不同的输入信号光功率对应不同的输出信号光功率及损耗系数, 我们应该选用损耗系数低的输入信号光功率. 由以上图 1、图 3、图 5 可知: 在掺铒光纤放大器中, 实现无损耗信号光损耗是可行的, 选择合适的光纤长度及掺铒光纤浓度及入射信

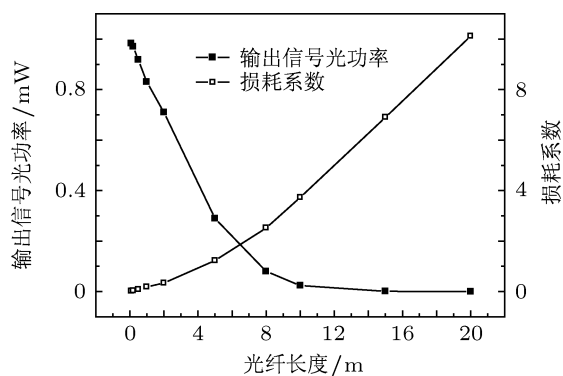


图 1 输出信号光强度及损耗系数与掺铒光纤长度的关系 (抽运光关闭)

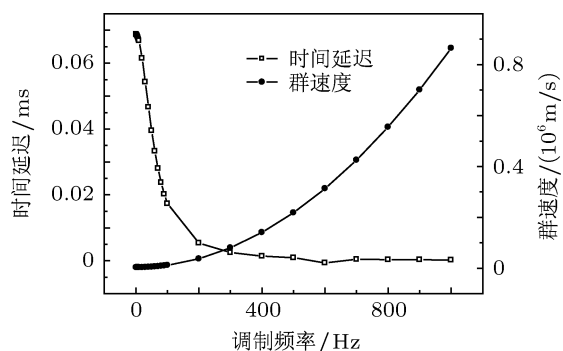


图 2 低浓度掺铒光纤为 0.2 m 时, 实现的时间延迟和相应的群速度

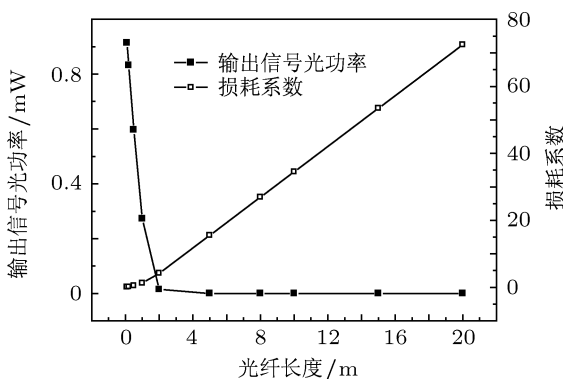


图 3 输出信号光强度及损耗系数与掺铒光纤长度的关系 (抽运光关闭)

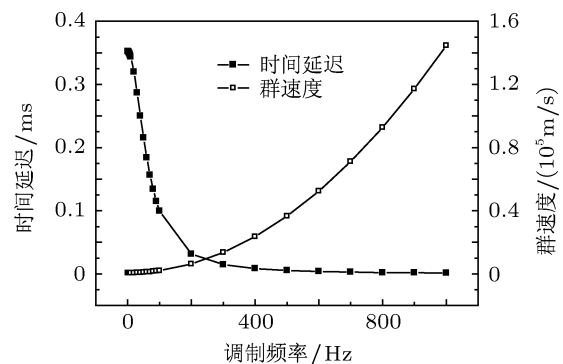


图 4 高浓度掺铒光纤为 0.2 m 时, 实现的时间延迟和相应的群速度

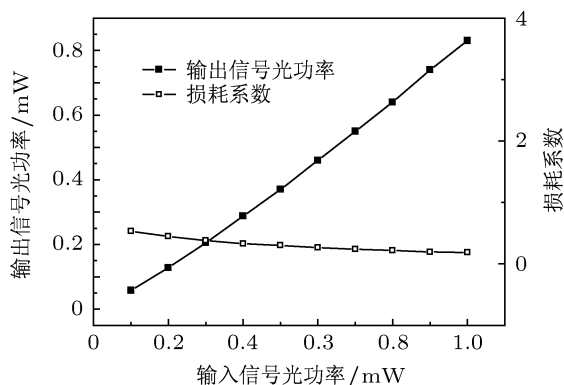


图5 输出信号光强度及损耗系数与输入信号光功率的关系 (抽运光关闭)

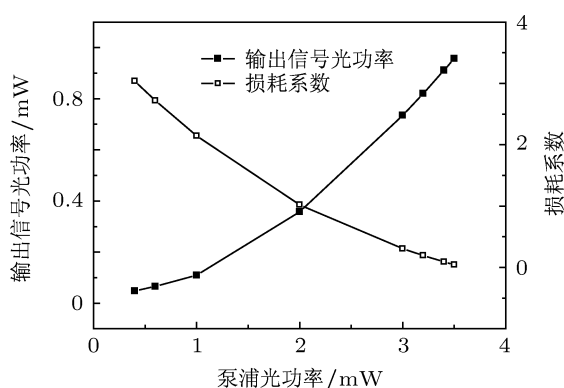


图6 输出信号光强度及损耗系数与抽运光功率的关系

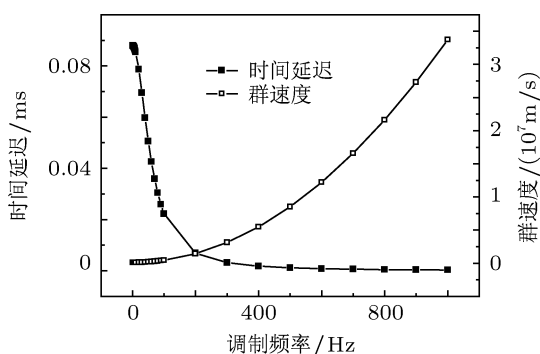


图7 当抽运光功率为 3.5 mW 时, 实现的时间延迟和相应的群速度

号光功率, 优化考虑各系数之间的配比关系.

在以上的讨论中, 设定抽运光源关闭, 下面具体计算当抽运光源打开时, 不同的抽运光条件下, 所实现的近似零损耗下的慢光传输. 此处我们设定信号光强度为 1mW, 掺铒光纤长度为 10 m, 计算不同抽运光功率下的输出信号光功率及损耗系数. 由图 6 可见, 随着抽运光功率的增强, 输出信号光的功率增强, 损耗系数减小, 当抽运光功率达到 3.5 mW 时, 输出的信号光功率为 0.957, 损耗系数为 0.043, 此时的信号光强度损耗已经很小, 接近于零. 图 7 为抽运光功率为 3.5 mW 时所实现的时间延迟及相应的群速度, 此时最大的时间延迟为 0.09 ms, 相应的群速度为 113.72×10^3 m/s. 由图 6 及图 7 的分析可知, 控制抽运光功率的大小是实现无损耗信号光强度下光速减慢传输的一种有效的技术手段, 但由于抽运光的大小与掺铒光纤的吸收状态相关联, 由增益理论分析可知: 当抽运光功率达到一定数值时, 铒光纤处于增益状态, 光脉冲将经历增益饱和, 此时实现慢光到超光速的转变, 所以实现慢光传输的前提是系统处于在铒光纤的吸收区域. 通过理论分析可知, 不同的掺铒光纤长度对应不同的饱和抽运功率, 长的相互作用距离对应着较高的饱和功率.

4 结论

光纤介质具有强烈的吸收特性, 在实现光波群速减慢传输时, 必然会导致信号光强度的损耗严重, 这使得慢光信号传输失真严重、测量精度低、光速减慢传输技术在实际中难以得到真正的应用. 因此, 本文简化以前的理论及实验模型, 利用简单的装置实现无信号光损耗条件下的光速减慢传输. 研究表明: 有效的利用掺铒光纤放大器, 控制其铒光纤长度、入射信号光强度和抽运光功率均可实现近似零损耗下的光速减慢传输, 本文中所得到的最低损耗系数为 0.017.

[1] Su H, Kondratko P, Chuang S L 2006 *Opt. Express* **14** 4800
 [2] Zhang G, Bo F, Dong R, Xu J 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 133903
 [3] Podivilov E, Sturman B, Shumelyuk A, Odoulov S 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 083902
 [4] Spielmann C, Szipöcs R, Stingl A, Krausz F 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 2308
 [5] Harris S E, Field J E, Imamoglu A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 1107
 [6] Song K Y, Herráez M G, Thévenaz L 2005 *Opt. Lett.* **30** 1782
 [7] Song K Y, Herráez M G, Thévenaz L 2005 *L. Opt. Express* **13** 82
 [8] Okawachi Y, Bigelow M S, Sharping J E, Zhu Z M, Schweinsberg A, Gauthier D J, Boyd R W, Gaeta A L 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 153902
 [9] Sharping J E, Okawachi Y, Gaeta A L 2005 *Opt. Express* **13** 6092
 [10] Janner D, Galzerano G, Della Valle G 2005 *Physical Review E*

72 1

- [11] Schweinsberg A, Lepeshkin N N, Bigelow M S 2006 *Europhys. Lett.* **73** 218
- [12] Qiu W, Zhang Y D, Ye J B, Tian H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2242 (in Chinese) [邱巍, 掌蕴东, 叶建波, 田赫 2008 物理学报 **57** 2242]
- [13] Qiu W, Zhang Y D, Ye J B, Tian H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7009 (in Chinese) [邱巍, 掌蕴东, 叶建波, 田赫 2007 物理学报 **56** 7009]
- [14] Christodoulides D N, Joseph R I 1989 *Phys. Rev. Lett.* **62** 1746
- [15] Novak S, Gieske R 2002 *J. Lightwave Technol.* **20** 975

Slowdown of group velocity of light pulse in erbium-doped optical fiber amplifier under no absorption loss at a room temperature*

Qiu Wei[†] Ma Ying-Chi Lü Pin Liu Dian Xu Xiao-Juan Zhang Cheng-Hua

(Department of Physics, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

(Received 4 July 2011; revised manuscript received 29 August 2011)

Abstract

Because of the absorption of erbium-doped optical fiber, the group velocity of the optical pulse propagation is slowed down and the intensity of signal is reduced, which brings more difficulties to the actual measurement of slow light and its application in communications, such as the distortion and the low measurement. Therefore only after the group velocity slowdown of light pulse in erbium-doped optical fiber under no absorption loss is realized, can the slow light technology really have the practical application. We investigate the erbium-doped optical fiber amplifier deeply and develop a technology, in which the different pump powers and fiber lengths are used to reduce the signal loss through theoretical calculation and realize the group velocity slowdown of light pulse. The results show that no absorption loss is realized at a pump power of 3.5 mW, and we realize the slow light with a fiber length of 0.1 m when the pump power is zero.

Keywords: erbium-doped optical fiber amplifier, controllable parameter, coherent population oscillation, slow light

PACS: 42.25.Bs, 42.70.Nq

* Project supported by the National Foundation in Advance of Liaoning University (Grant No. 2009LDGY06), the Liaoning University Doctor Startup Fund, and the National Natural Science Funds (Grant No. 10874062).

[†] E-mail: qiuwei1202@yahoo.com.cn