

掺铒光纤中亚稳态粒子振荡和慢光 时间延迟关系研究*

邱巍^{1)†} 高波²⁾ 林鹏²⁾ 周婧婷¹⁾ 李佳¹⁾ 蒋秋莉¹⁾ 吕品¹⁾ 马英驰¹⁾

1) (辽宁大学物理学院, 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)

(2013年6月24日收到; 2013年7月18日收到修改稿)

由于光纤慢光在实际中的应用价值引起广泛关注. 技术手段上利用相干布居振荡效应实现光速可控更具有优势. 本文主要介绍了利用相干布居振荡效应(CPO)实现掺铒光纤中的光速减慢传输, 通过改变掺杂浓度、光纤长度、入射信号光及抽运光功率等参量, 具体研究了亚稳态粒子振荡和时间延迟的关系. 研究表明: 选择高浓度光纤、增加光纤长度、关闭抽运光源, 选择适当强度的信号光可以有效地增大时间延迟.

关键词: 掺铒光纤, 时间延迟, 相干布居振荡, 慢光

PACS: 42.50.Md, 42.25.Dd

DOI: 10.7498/aps.62.214205

1 引言

随着光纤通信技术的不断发展, 控制光的传输速度愈发重要. 光信息技术目前在五个方面——信息的采集、传输、处理、存储和显示有着较大的发展空间. 其中光的采集、传输和显示的技术相对于电子信息技术已占据主导地位. 而在光信息的处理和储存技术方面却明显滞后, 已不能够与前三种光信息技术相匹配. 虽然目前电的路由器已经可以达到亚太比特每秒级, 但却只有光纤容量的百分之一, 从而造成网络信息堵塞. 而且电路器技术已趋于饱和, 并且光—电、电—光转换增加的设备的复杂性, 降低了系统可靠性及稳定性, 信号失真容易发生. 为了充分利用光纤通信的带宽优势, 全光网(AON)成为了从根本上解决网络速率瓶颈的方案. 光路由是全光网络中的关键技术, 主要用于完成光节点处任意光纤端口间的光信号交换. 全光网有着带宽优势、传输透明及降低接口成本等优点. 鉴于上述优点, 光路由器研制被人们所重视, 但目前亟待解决的问题是, 人们并未研制出全光缓存

器, 而没有光缓存的交换技术当多个数据同时竞争同一通道时必定会导致一部分数据丢失或错误路由, 路由器响应时间增加, 信息误码率上升. 所以全光缓存器又成为了全光通信网发展的关键^[1-5].

2006年, Schweinsberg等人在掺铒光纤中观测到基于相干布居振荡过程的极慢光速和超光速现象^[6]. 2007年, 掌蕴东科研小组对掺铒光纤慢光进行的深入研究^[7]. 2010年, Sonia Melle等人对1550 nm和980 nm激光同时注入到掺铒光纤放大器中所实现的慢光及超光速进行研究^[8]. 2010年, Bencheikh等人对环形掺铒光纤激光器(REDF)中的慢光进行研究, 得到1360 m/s的慢光传输^[9]. 2011年 Sonia Melle等人再对掺铒光纤中慢光及超光速的脉宽依赖性进行研究讨论^[10]. 2011年, Qian等人利用交叉增益调制技术对掺铒光纤中的群速度操控进行深入研究, 在掺铒光纤中得到了慢光和超光速传输^[11]. 上述研究均是利用CPO技术在掺铒光纤中实现慢光减慢传输, 但对于布居粒子数振荡对慢光传输的具体影响并没有做讨论.

本文在上述研究成果的基础上, 具体研究了亚稳态粒子振荡和时间延迟的关系, 研究表明:

* 中国科学院低温工程学重点实验室开放项目(批准号: CRYO201321)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: qiuwei801122@163.com

选择高浓度光纤、增加光纤长度、关闭抽运光功率, 选择适当的信号光功率可以有效地使时间延迟增大. 此项研究结果对于提高掺铒光纤中的慢光传输及利用慢光大的相对时延来提高慢光介质对信息存储的能力有着重要的意义.

2 理论研究

由于铒离子能级激发态上粒子数近似为零, Er^{3+} 可简化为二能级体系, 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 [7]

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

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:

$$\begin{aligned} B_p &= \frac{\Gamma_p \sigma_{13}}{A}, \quad C_p = \Gamma_p \sigma_{13} \rho L, \\ B_s &= \frac{\Gamma_s (\sigma_{12} + \sigma_{21})}{A}, \quad C_s = \Gamma_s \sigma_{12} \rho L, \end{aligned}$$

积分代入得亚稳态粒子的稳态解

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

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, 等到光纤输出端输出信号光功率为

$$P_s(L, t) = P_s^0(L)[1 + m'_s \cos(\omega t + \theta_s)],$$

其中

$$\begin{aligned} m'_s &= \sqrt{(m_s - b_s N_1^0 \delta \cos \phi)^2 + (b_s N_1^0 \delta \sin \phi)^2}, \\ \tan \theta_s &= \frac{b_s N_1^0 \delta \sin \phi}{m_s - b_s N_1^0 \delta \cos \phi}. \end{aligned} \quad (4)$$

令 $\omega_{\text{eff}} = P_s^0(L)B_s + P_p^0(L)B_p + \frac{1}{\tau}$, $B_s[P_s^0(0) - P_s^0(L)] = \kappa$, 可得信号光延迟的解析表达式

$$\Delta t = (2\pi/\omega) \arctan \frac{-\frac{\omega \cdot \kappa}{\sqrt{\omega_{\text{eff}}^2 + \omega^2}}}{\sqrt{\omega^2 + \omega_{\text{eff}}^2} + \frac{\omega_{\text{eff}} \cdot \kappa}{\sqrt{\omega_{\text{eff}}^2 + \omega^2}}}. \quad (5)$$

3 仿真计算

仿真计算中所用到的光纤参数如表 1 所示.

选定上述四种浓度的掺铒光纤, 入射信号光功率设定为 1 mW, 关闭抽运光源, 理论上仿真计算稳态粒子数与掺铒光纤长度的关系, 如图 1 所示.

从对图 2 的分析可知: 随着光纤长度的增加, 稳态粒子数存在饱和现象, 且饱和状态下的稳态粒子数基本相同. 对比四种不同浓度光纤, 浓度越高, 出现饱和现象所需要的光纤长度越小. 对于每种掺杂光纤中分别选取三个长度, 计算亚稳态粒子数随时间的变化, 布居振荡效应如图 2 所示.

从图 2 我们可以看出, 随着光纤浓度的增大, 亚稳态粒子数的振荡幅度越来越大且趋于一致. 低掺杂浓度时, 光纤长度对粒子数振荡带来的影响显著; 高掺杂浓度时, 光纤长度对粒子数振荡带来的影响微弱. 同时, 对光纤 1 进行具体分析, 调制频率设定为 10Hz, 通过连续调节光纤长度观察其对亚稳态粒子数振荡的影响, 结果如图 3 所示.

由图 3 我们可以看出: 亚稳态粒子数对于时间的振荡曲线随光纤长度的增大越来越接近, 即逐渐达到饱和状态. 选取图 3 中的 4 m, 8 m, 12 m 和 16 m 光纤长度, 分析此时粒子数振荡对时间延迟的

表 1 四种光纤及其参数

光纤型号	掺杂浓度/ m^{-3}	吸收系数 α_s /(dB/m)	吸收系数 α_p /(dB/m)	发射系数 β_s /(dB/m)
光纤 1	0.54×10^{25}	2.826	3.715	4.318
光纤 2	1.6×10^{25}	7.861	13.623	11.814
光纤 3	3.2×10^{25}	16.477	26.065	24.767
光纤 4	6.3×10^{25}	31.712	42.323	47.665

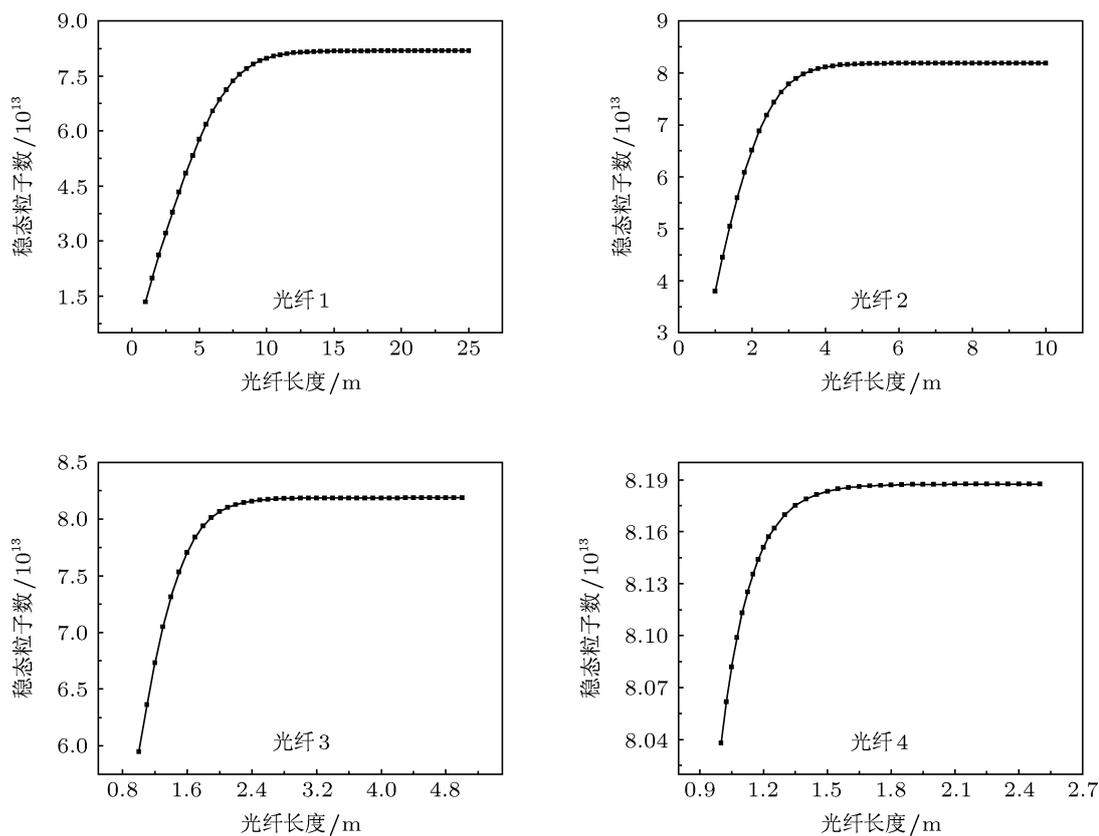


图 1 不同浓度掺铒光纤稳态粒子数随光纤长度的变化

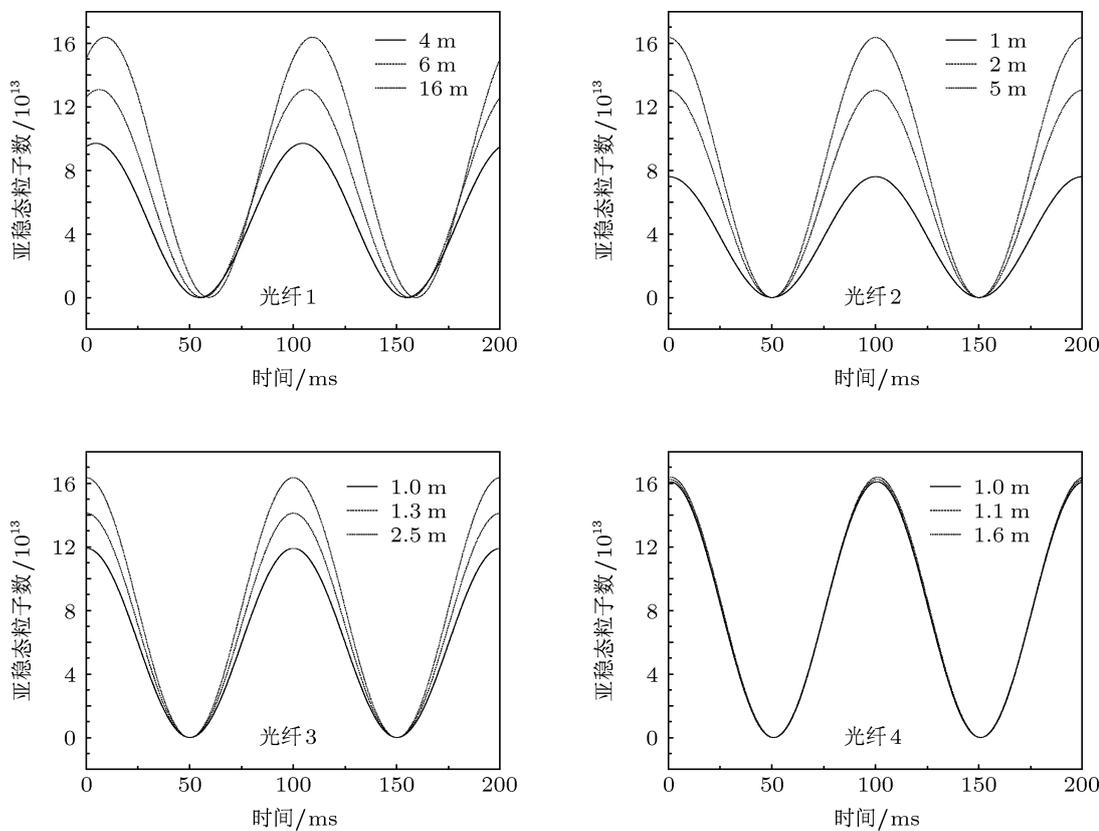


图 2 不同浓度掺铒光纤亚稳态粒子数在不同长度下随时间的变化

影响,如图4所示.当光纤长度为4 m时,时间延迟为2.01 ms,当光纤长度为8 m时,时间延迟为5.18 ms,光纤长度为12 m时,时间延迟为6.45 ms,光纤长度为16 m时,时间延迟为6.59 ms.

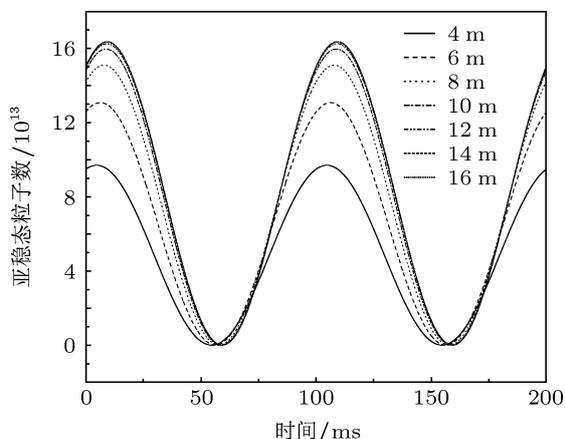


图3 光纤长度对亚稳态粒子数振荡的影响

由图4分析可知,通过对光纤长度的改变,可以调节光脉冲的时间延迟.当光纤长度变大时,时间延迟也随之增大并逐步趋于饱和.结合图3和图4可以看出,当亚稳态粒子振荡存在饱和趋势的同

时,时间延迟也相应的出现了饱和现象.选定四种浓度的掺铒光纤,光纤长度为5 m,关闭抽运光源,调制频率设定为10 Hz.理论上计算了入射信号功率和稳态粒子数的关系,如图5所示.

从图5所示,随着信号光功率的增大,稳态粒子数逐渐趋于饱和状态.低掺杂浓度,达到饱和状态时所需的信号光功率较小;高掺杂浓度,达到饱和状态时所需的信号光功率较大.在每种光纤中分别选取三个入射信号光功率,来计算亚稳态粒子数相对于时间的变化趋势,如图6所示.

从图6可以看出,随着浓度的增大,亚稳态粒子数的振荡幅度增大.计算亚稳态粒子数振荡随信号光功率变化的趋势,选取光纤1,长度为5 m,关闭抽运光源,调制频率设定为10 Hz,计算结果如图7所示.

由图7可以看出,亚稳态粒子数对于时间的振荡曲线随入射信号光功率的增大越来越接近,即逐渐趋于饱和状态.选取图7中的入射信号光功率0.1 mW,0.7 mW,1.3 mW和1.9 mW,分析粒子数振荡对时间延迟的影响,如图8所示.

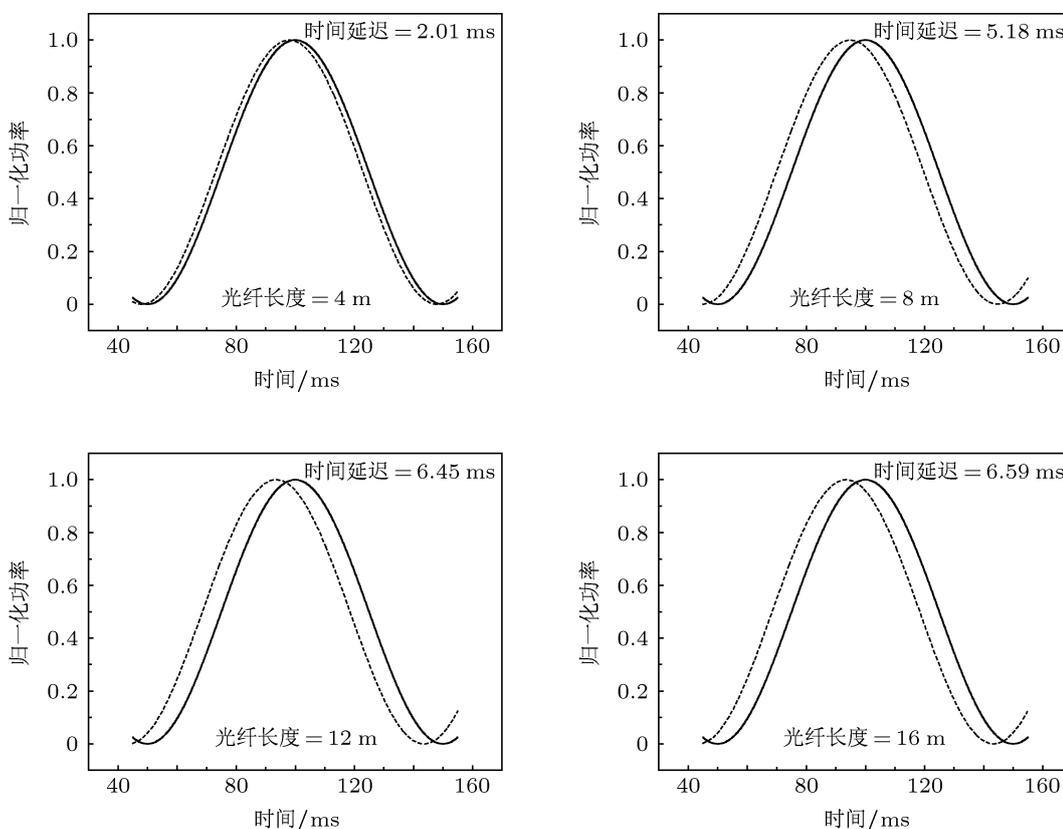


图4 光纤长度对时间延迟的影响

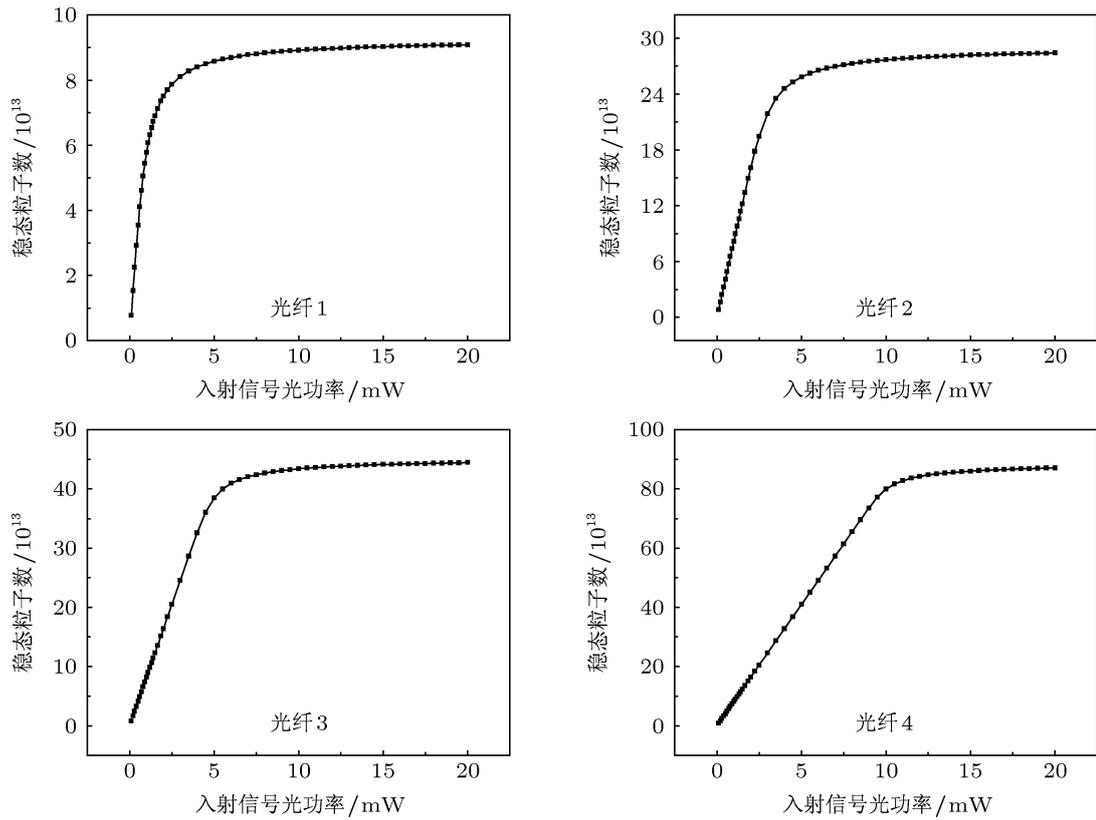


图5 不同浓度掺铒光纤稳态粒子数随入射信号光功率的变化

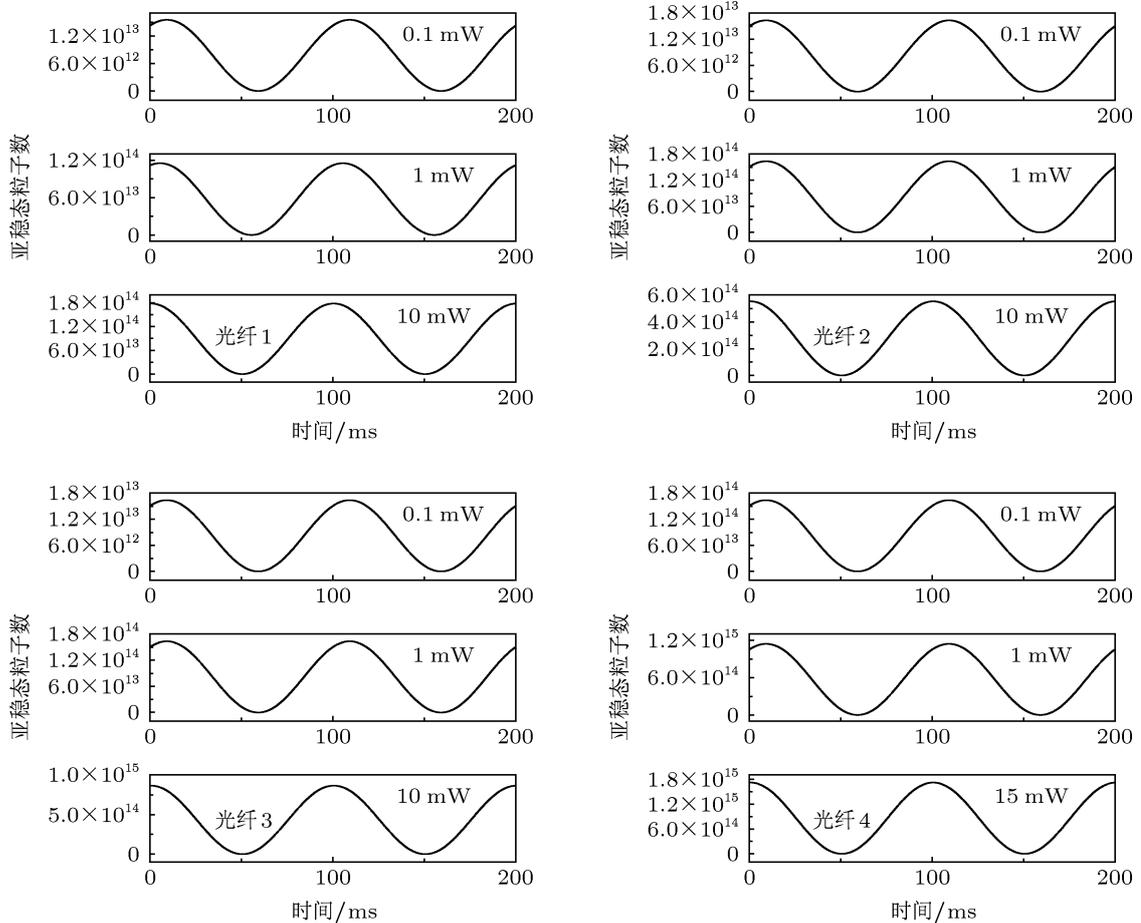


图6 不同浓度掺铒光纤亚稳态粒子数在不同入射信号光功率下随时间的变化

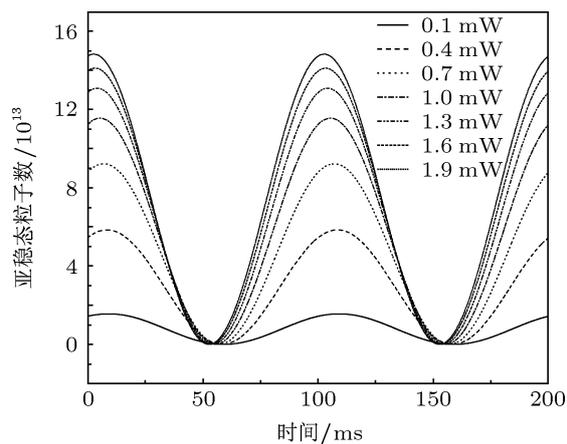


图7 入射信号光功率对亚稳态粒子数振荡的影响

由图8可知, 时间延迟先随着入射信号光的增大而增加, 逐渐达到最大值, 然后随着入射信号光的增大而减小, 逐渐趋于一个定值. 当信号光功率为 0.1 mW 时, 时间延迟为 1.64 ms, 当信号光功率为 0.7 mW 时, 时间延迟为 3.6 ms, 当信号光功率为 1.3 mW 时, 时间延迟为 1.20 ms, 当信号光功率为 1.9 mW 时, 时间延迟为 1.20 ms. 结合图3、图4、图7, 我们可以得出: 在亚稳态粒子数振荡趋于饱和

的同时, 时间延迟也出现了饱和现象.

选定四种浓度的掺铒光纤, 光纤长度为 5 m, 入射信号光功率为 1 mW, 调制频率分别设定为 10 Hz. 理论上计算了抽运光功率与稳态粒子数的关系, 如图9所示.

从图9中可以看出: 随着抽运光功率的增大, 稳态粒子数也逐渐增大. 在每种掺杂光纤中分别选取三个抽运光功率, 来计算亚稳态粒子数相对于时间的变化趋势, 如图10所示.

从图10中我们可以看出, 随着浓度的增大, 亚稳态粒子数的振荡幅度增大. 以光纤1为例, 选取光纤1, 长度5 m, 信号光功率设定为 1 mW, 调制频率设定在 10 Hz, 理论仿真计算亚稳态粒子数振荡随抽运光功率变化的趋势, 如图11所示.

由图11所示, 亚稳态粒子数对于时间的振荡幅度随抽运光功率的增大而增大, 随着抽运光的进一步增大, 实现了慢光到超光的转变, 即时间延迟为负. 选取图11中的抽运光功率分别为 0.1 mW, 0.5 mW, 0.9 mW 和 1.3 mW, 分析粒子数振荡对时间延迟的影响, 如图12所示.

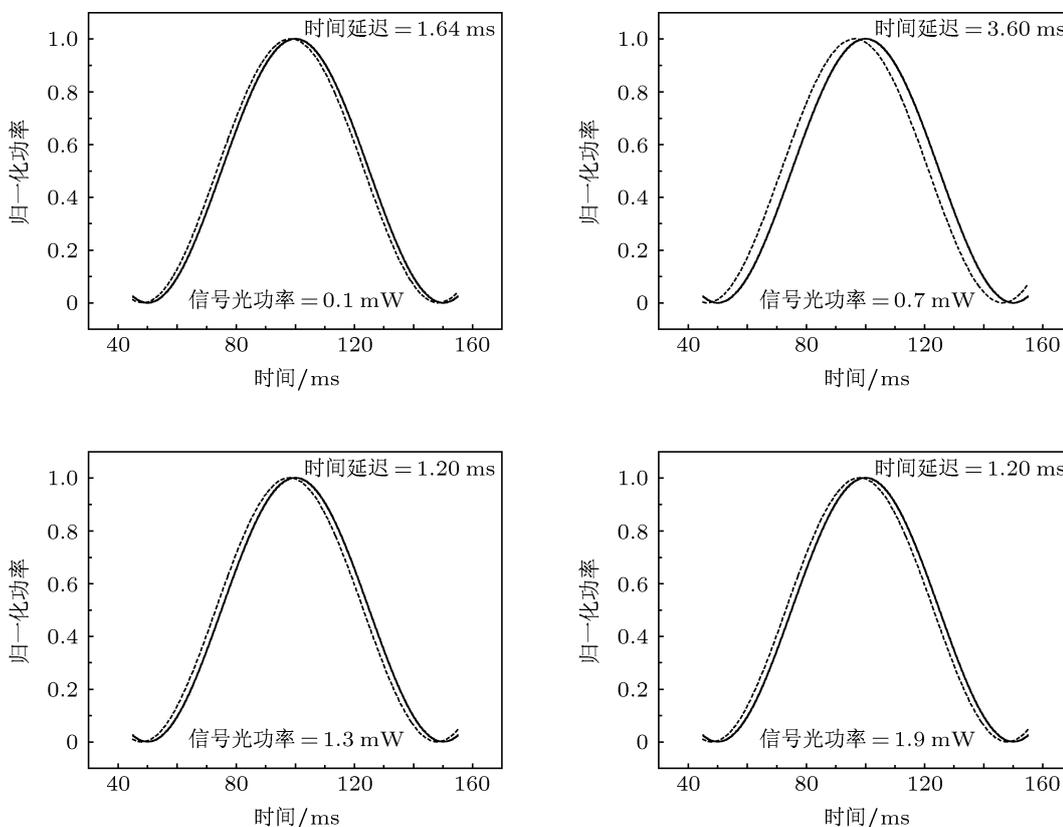


图8 时间延迟随信号光功率的变化

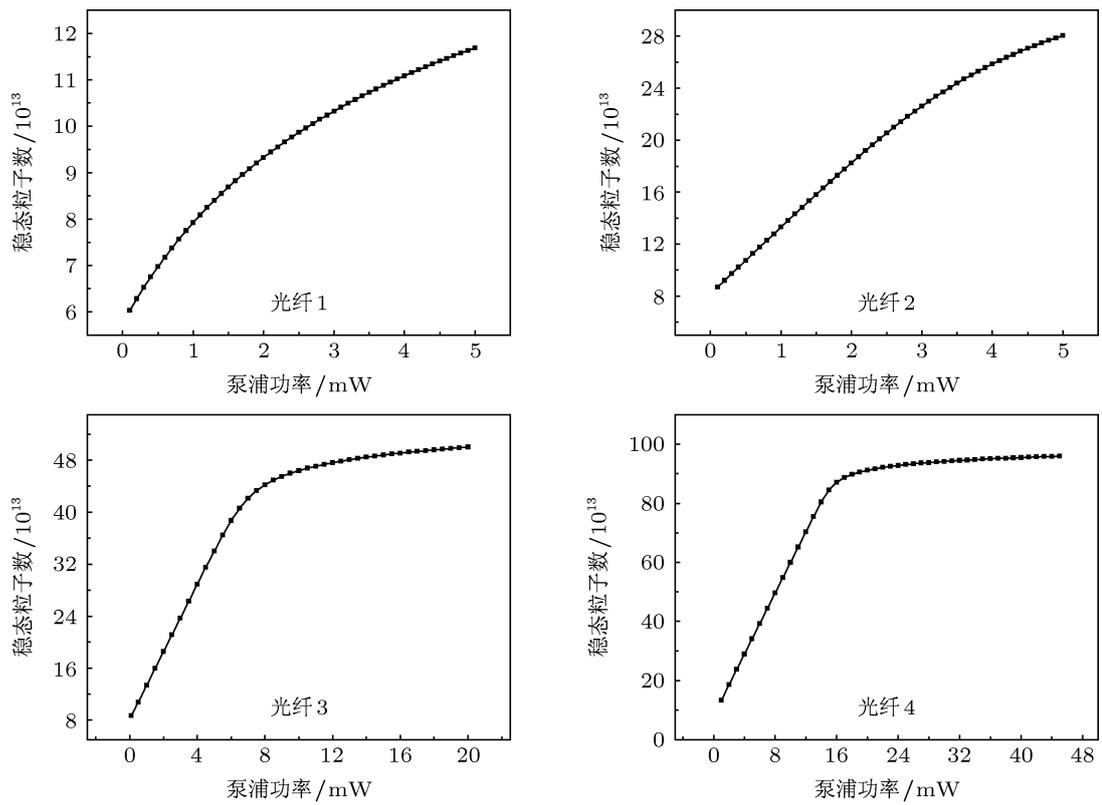


图9 不同浓度掺铒光纤稳态粒子数随抽运光功率的变化

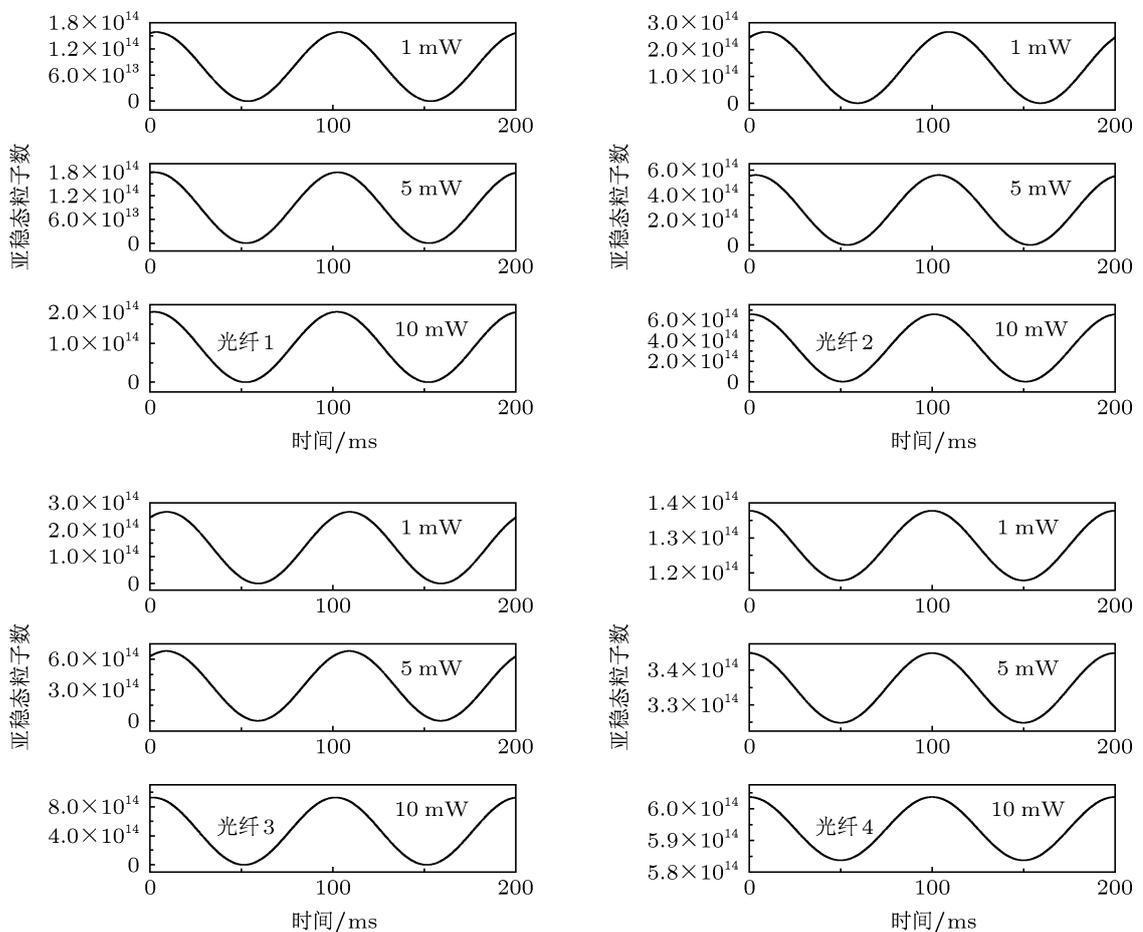


图10 不同浓度掺铒光纤亚稳态粒子数在不同抽运光功率下随时间的变化

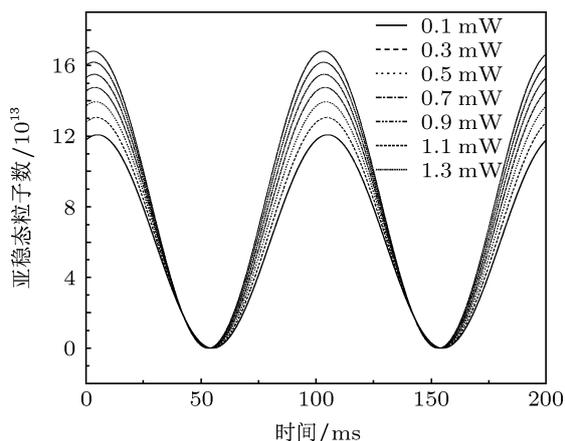


图 11 抽运光功率对亚稳态粒子数振荡的影响

根据图 12, 时间延迟随着抽运功率的增加而减小, 当抽运光功率为 0.1 mW 时, 时间延迟为 2.55 ms, 当抽运光功率为 0.5 mW 时, 时间延迟为 1.75 ms, 当抽运光功率为 0.9 mW 时, 时间延迟为 1.10 ms, 当信号光功率为 1.3 mW 时, 时间延迟为 0.59 ms. 并且随着抽运光功率的进一步增加, 实现了超光速传输, 即时间延迟为负. 为了实现大的时间延迟, 降低抽运光功率或者关闭抽运光源是可行的方案.

4 结论

本文研究了亚稳态粒子数振荡及时间延迟与掺杂浓度、光纤长度及入射光信号光功率和抽运光功率的关系. 通过以上参量具体对光速减慢进行操控, 当光纤长度为 4 m 时, 时间延迟为 2.01 ms, 当光纤长度为 8 m 时, 时间延迟为 5.18 ms, 光纤长度为 12 m 时, 时间延迟为 6.45 ms, 光纤长度为 16 m 时, 时间延迟为 6.59 ms; 当信号光功率为 0.1 mW 时, 时间延迟为 1.64 ms, 当信号光功率为 0.7 mW 时, 时间延迟为 3.6 ms, 当信号光功率为 1.3 mW 时, 时间延迟为 1.20 ms, 当信号光功率为 1.9 mW 时, 时间延迟为 1.20 ms; 当抽运光功率为 0.1 mW 时, 时间延迟为 2.55 ms, 当抽运光功率为 0.5 mW 时, 时间延迟为 1.75 ms, 当抽运光功率为 0.9 mW 时, 时间延迟为 1.10 ms, 当信号光功率为 1.3 mW 时, 时间延迟为 0.59 ms. 基于以上的研究分析表明: 选择高浓度光纤、增加光纤长度、关闭抽运光功率, 选择适当的信号光功率可以有效地使时间延迟增大.

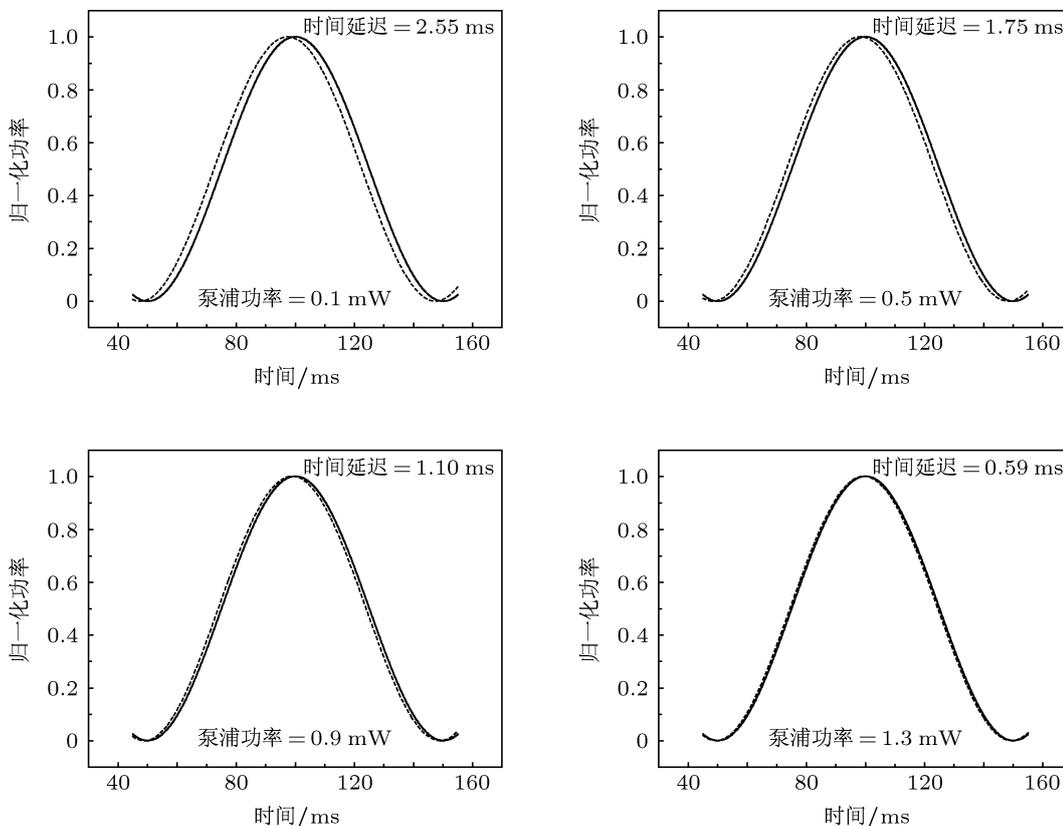


图 12 时间延迟随抽运光功率的变化

- [1] Chu S, Hollberg L, Bjorkholm J E, Gauthier D 2005 *Phys. World* **18** 30
- [2] Chang-Hasnain C J, Chuang S L 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 4642
- [3] Boyd R W, Gauthier D J, Gatta A L, Willner A E 2005 *Phys. Rev. A* **71** 023801
- [4] Milonni P W 2002 *J. Phys. B* **35** R31
- [5] Wang N, Zhang Y D, Yuan P 2011 *Chin. Phys. B* **20** 074207
- [6] Schweinsberg A, Lepeshkin N N, Bigelow M S, Boyd RW, Jarabo S 2006 *Europhys. Lett.* **73** 218
- [7] Qiu W, Zhang Y D, Ye J B 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7009 (in Chinese) [邱巍, 掌蕴东, 叶剑波 2007 物理学报 **56** 7009]
- [8] Sonia M, Marcelo M 2010 *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.* **43** 215401
- [9] Bencheikh K, Baldit E, Briaudeau S 2010 *Opt. Express* **18** 25642
- [10] Francisco A Y, Eduardo C G, Sonia M 2011 *J. Opt. Soc. Am. B* **28** 1172
- [11] Qian K Z, Zhang L, Zhu Z Q, Peng J S 2011 *Opt. Lett.* **36** 2185

Study on the relationship between the population of metastable state and time delay in an erbium-doped optical fiber*

Qiu Wei^{1)†} Gao Bo²⁾ Lin Peng²⁾ Zhou Jing-Ting¹⁾ Li Jia¹⁾
 Jiang Qiu-Li¹⁾ Lü Pin¹⁾ Ma Ying-Chi¹⁾

¹⁾ (Department of Physics, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

²⁾ (Key Laboratory of Cryogenics, TIPC, CAS, Beijing 100190, China)

(Received 24 June 2013; revised manuscript received 18 July 2013)

Abstract

The slow light propagation in optical fiber has attracted much attention because of its practical applications. Use of coherent population oscillation to produce slow light propagation has many advantages over other methods. We investigate the reduction of the group velocity propagation by the coherent population oscillation in erbium-doped optical fiber, and also the relationship between the population of metastable state and the time delay by changing the doping concentration, the length of the fiber, the input power, and the pump power. The results show that we can select a high doping concentration of erbium in the fiber, increase the length of the fiber, decrease the pump power and select the appropriate power of the signal light to increase the time delay.

Keywords: erbium-doped fiber, time delay, coherent population oscillation, slow light

PACS: 42.50.Md, 42.25.Dd

DOI: 10.7498/aps.62.214205

* Project supported by the Key Laboratory of Cryogenics, TIPC, CAS (Grant No. CRYO201321).

† Corresponding author. E-mail: qiuwei801122@163.com