

光速调控中的信息速度问题研究

王 号 张春光* 李 晖

(福建省光子技术重点实验室, 医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建师范大学物理与光电信息科技学院,
福建 福州 350007)

摘要 利用不同的技术手段实现光速的调控是最近几年的研究热点问题之一。伴随光速调控技术的深入研究,在慢光以及超光速情况下信息速度的问题也成为人们关注的重要方面。利用非解析点的方法研究了在红宝石晶体中慢光情况下,以及 C_{60} 中超光速情况下信息的传递速度。研究表明,无论在慢光情况下还是超光速情况下,在实验测量的精度范围内信息的传播速度都小于真空中光速 c 。这说明观察到的超光速现象并不违反因果关系,虽然群速度超过真空中光速,但信息的传递速度不受群速度的影响。

关键词 非线性光学;信息速度;光速调控;饱和吸收;反饱和吸收

中图分类号 O436.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.031902

Information Speed in Controllable Light Velocity

Wang Hao Zhang Chunguang Li Hui

(Fujian Provincial Key Laboratory for Photonics Technology, Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine of Ministry of Education, School of Physics and Optoelectronics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China)

Abstract In recent years, researches about the controllable group velocity using different methods arouse great interest among researchers. With the development of controllable slow and fast light propagation, discussions about the information speed under abnormal light velocity have been reported. In this work, the information speed in ruby crystal and C_{60} solution under the slow and fast light conditions are discussed respectively. The results demonstrate that, in our experiment, the information speed is smaller than light speed in a vacuum, although the light group velocity may exceed the light speed in a vacuum. This result is in accordance with the causality.

Key words nonlinear optics; information speed; controllable light velocity; saturated absorption; reverse saturated absorption

OCIS codes 190.0190; 270.0270; 260.2030

1 引言

在过去的几年中,利用不同的技术手段调控介质中的光速成为相关领域的研究热点^[1~9]。在应用领域,利用慢光技术的全光缓存器可以克服传统光学缓存器体积庞大,信号损失严重并且灵活性等缺点,大大提升光学缓存的效率^[10]。另外应用光速可控技术的光学干涉仪的灵敏度相比传统的光学干涉仪也有明显的提升^[11,12]。光速调控的实现也把一些基本的物理问题摆到进行相关研究的学者面前,其中之一就是在实现光速调控的同时信息的传递速度是否有变化。如果有,这种变化是怎样的? L. J. Wang 等^[2]的超光速实验中利用反常色散效应在铯蒸气中观察到负群速传播现象。该结果被形象地看成在入射光脉冲的峰还没有进入介质中时已经从介质的另一端输出了。该结果似乎与因果关系相违背,但是他们认为虽然实验观测到负群速传播的现象,但是该现象的产生是由于入射光中不同频率成分经历色散之后的相位重组现象,并不违背因果关系。在他们的工作最后还提出了用只有几个光子的光脉冲来检测超光速情况下信息速度的可能手段。

收稿日期: 2010-08-20; 收到修改稿日期: 2010-11-03

基金项目: 福建省自然科学基金(2010J05131, 2010J05129)资助课题。

作者简介: 王 号(1978—),男,博士,讲师,主要从事非线性光学、生物医学光子学等方面的研究。

E-mail: haowang@fjnu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: cgzhang@fjnu.edu.cn

但实际上利用该方法进行信息速度的测量很困难,因为如此弱的脉冲能量很难用于慢光或者超光速实验,另外,在探测手段上也受到制约。在 L. J. Wang 等工作之后,很多学者都开展了信息速度的研究和测量。2003 年 M. D. Stenner 等^[13]利用非解析点的方法在共振介质中超光速情况下测量了信息速度,利用快速的光开关来获得信号脉冲上的非解析点,并通过测量非解析点的传播速度来获得信息的传播速度。实验结果证明,在测量精度范围内,群速度和信息速度(非解析点的传播速度)不相同,虽然群速度可以超光速,但是信息的传播速度仍然小于真空光速。2005 年 M. D. Stenner 等^[14]报道了利用非解析点的方法在共振慢光介质中群速度小于真空光速的情况下信息的传播速度,实验结果表明,虽然群速度远低于真空光速,但信息的传播速度与真空光速相当并且小于真空光速,又一次证明了群速度和信息速度无关。事实上对于信息速度的定义并没有公认的观点^[15],有的学者认为定义波前半高度传播速度为信息速度,但从目前已有的实验结果来看,该定义意味着信息速度可以超光速,显然与因果关系相违背。有的学者认为应该定义信号波前速度为信息速度,但是信号的波前很难探测。而非解析点的方法来定义信息速度是有其合理性的,因为信号脉冲上的非解析点表示对信号脉冲的调制,该调制信号表示加载在光脉冲上的信息。如果能准确测量非解析点的传播速度也就测量了信息的传播速度。M. D. Stenner 等^[13,14]的工作在共振介质中利用高速光开关获得非解析点并进行了信息速度的测量。由于实验中要利用高速的光开关,所以测量装置比较复杂,并且由于光开关的影响对于信息速度的测量会带来影响。针对这一不足,我们提出了利用调制的方式直接在载波信号上添加非解析点,通过跟踪非解析点的传播情况来测量信息速度,该方法简单易行并可以推广到相似的系统中。与 M. D. Stenner 等工作的另一不同是,M. D. Stenner 等工作是在共振介质中进行的,我们的工作是在饱和以及反饱和吸收介质中进行的,并证明在慢光和超光速情况下信息速度不会超过真空光速。

2 实验设计

图 1 给出了在红宝石晶体和 C_{60} 中测量信息速度的原理图。实验中采用的光源为连续光 Nd:YAG 激光器,波长为 532 nm,通过高速光电调制获得实验所需正弦信号以及添加了非解析点的信号波形。图 1(a)中所用的红宝石晶体为长度为 5 cm 的红宝石棒,通过对比经过红宝石晶体后的延迟信号和参考信号可以测量信号的延迟时间、相应的群速度以及非解析点在经过慢光介质后的变化。图 1(b)中所用的为 C_{60} 甲苯溶液,质量浓度为 1 mg/mL,样品的厚度为 1 mm。通过测量信号光相比参考光的超前时间,可以获得信号在 C_{60} 中的群速度,对比信号光和参考光上非解析点的位置可以测量超光速情况下的信息速度。

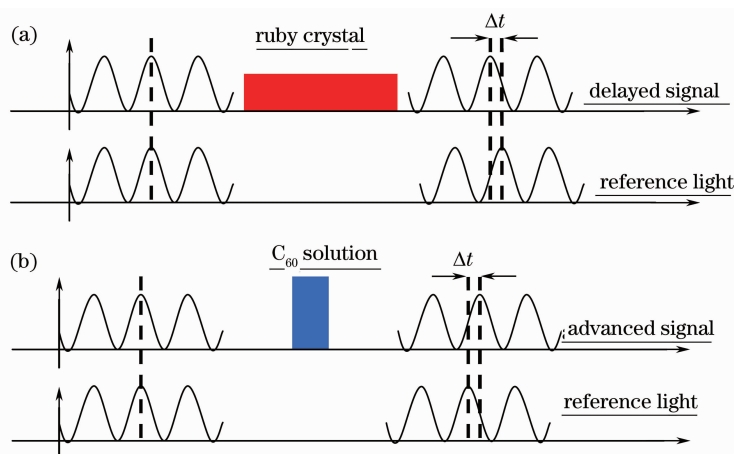


图 1 利用非解析点方法测量信息速度的实验装置简图。(a)在红宝石晶体中慢光情况下,(b)在 C_{60} 中超光速情况下

Fig. 1 Experimental setup for the measurement of information speed in a ruby crystal under slow light condition (a), C_{60} solution under fast light condition (b)

3 实验结果与分析

首先,在红宝石晶体中获得了正弦调制信号的慢光传播,如图 2 所示。相比于 M. S. Bigelow 等^[3]的结

果,我们利用的信号光波长为 532 nm,另外,实验中获得的信号延迟量更大,这样有利于更清楚地跟踪非解析点的变化。在信号调制频率为 20 Hz,入射光功率为 80 mW 的情况下,实验观测到经过红宝石晶体后的信号相比于在自由空间传输的信号延迟了 3.2 ms,利用

$$t_{\text{del}} = \frac{L}{v_g} - \frac{L}{c}, \quad (1)$$

可以计算此时信号在红宝石晶体中的群速度为 15.6 m/s。式中 t_{del} 为信号的延迟时间, L 为红宝石晶体的长度, c 为真空中光速, v_g 为红宝石晶体中慢光传播的群速度。

为了进一步测量在慢光情况下信息的传递速度,利用高速电光调制器,在正弦信号上添加了非解析点,该非解析点相当于对正弦载波信号进行了强度调制,如图 3 所示。该非解析信号在强度和时间上相比于正弦载波都很小,所以对信号整体的影响不大,利用该信号仍旧可以观察到慢光现象,并且信号经过红宝石晶体后的延迟时间也没有明显变化。从图 3 可见,由于慢光信号在红宝石晶体中经历了强烈的吸收和色散,另外还受到散射等噪声的影响,出射后非解析的调制信号部分相对于自由空间信号有了较大的形变。但仍可以比较清楚地看出非解析点的位置,如图 3(b) 所示。虽然载波信号经过红宝石晶体后获得了很明显的时间延迟,但是非解析部分相对于参考信号并没有时间上的延迟。这说明,在红宝石晶体中非解析点的传递速度并不比自由空间中非解析点的传递速度慢,即群速度变慢并不会使信息的传递速度变慢,二者没有直接的联系。

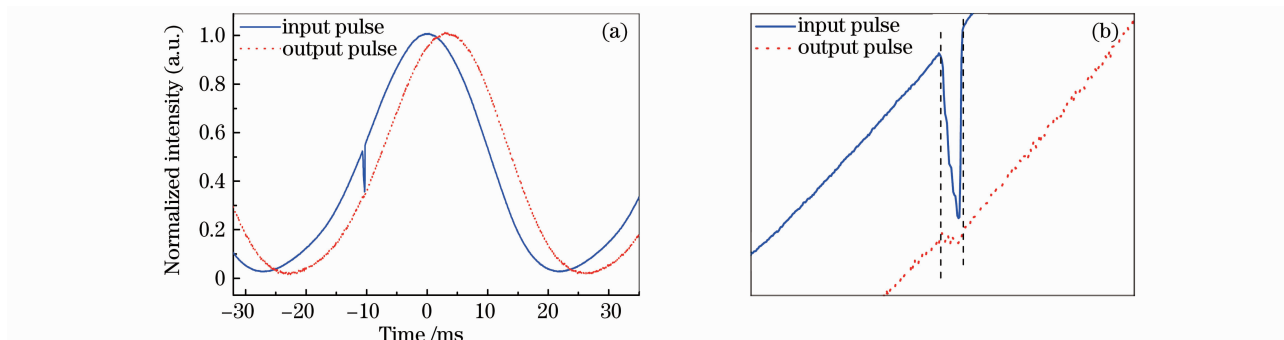


图 3 红宝石晶体中利用包含非解析点的正弦信号观测的慢光结果。(a)归一化的观测结果,(b)图(a)中非解析点部分的局部放大

Fig. 3 Slow light in a ruby crystal with sinusoidal modulated optical signal including nonanalytical points.

(a) normalized amplitude, (b) local enlargement of Fig. 3(a)

为了进一步证明群速度的改变并不影响信息的传递速度,在 C_{60} 中信号群速度超光速的情况下利用非解析点的方法对信息速度进行了测量。实验中,利用正弦调制信号获得的超光速结果如图 4 所示,这一结果与文献中的结果相当^[7]。后面的实验观测都是在相同的实验条件下进行的,保证始终工作在 C_{60} 的超光速区域。在信号调制频率为 100 Hz,信号功率为 90 mW 时,实验观测到的信号超前时间为 0.24 ms,利用(1)式可以计算得到信号的群速度为 -4.2 m/s。

测量信息速度的实验中,利用高速电光调制器,在正弦信号上添加了非解析信号,调制后带有非解析点的信号波形如图 5 所示。该非解析信号在强度和时间上相比

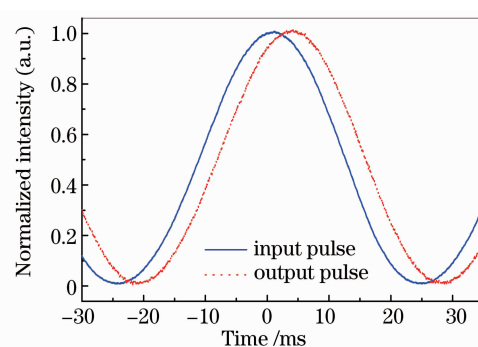


图 2 利用正弦调制信号在红宝石晶体中观测到的慢光现象

Fig. 2 Slow light in a ruby crystal with sinusoidal modulated optical signal

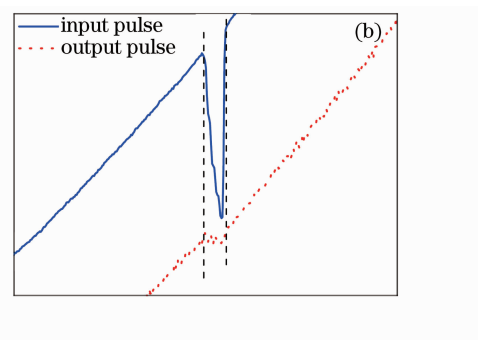


图 4 利用正弦调制信号在 C_{60} 中观测到的超光速现象
Fig. 4 Fast light in C_{60} with sinusoidal modulated optical signal

于正弦载波都很小,所以对信号整体的影响不大,利用该信号仍旧可以观察到超光速传播现象,比较相同实验条件下利用正弦调制信号观测的结果,包含非解析点信号的超前时间几乎没有变化,这也说明了非解析点对信号传播的群速度几乎没有影响。为了更清楚地观察非解析点在群速度超光速的情况下的传递速度,将信号中非解析点的部分进行了局部放大,结果如图 5(b)所示。从放大后的非解析点的情况可以看出,虽然载波信号经过 C_{60} 后有群速度超光速的现象发生,但是载波上的非解析点相对于参考信号并没有超前现象。说明在 C_{60} 中非解析点的传递速度没有超过真空中光速 c ,即群速度超光速并不会使信息的传递速度变快,群速度超光速并不违反狭义相对论的因果关系,因为在群速度超光速的情况下信息的传递速度并没有超过光速。

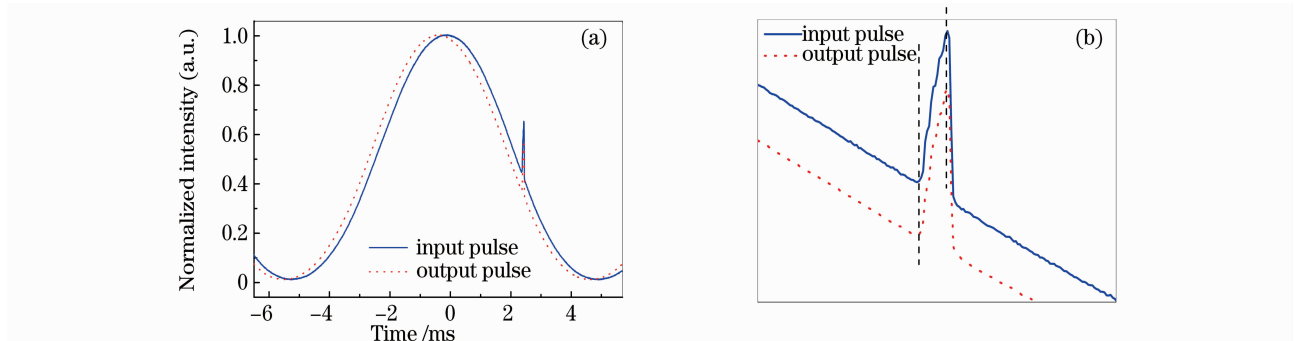


图 5 C_{60} 中利用包含非解析点的正弦信号观测的超光速结果。(a)归一化的观测结果,
(b)图(a)中非解析点部分的局部放大

Fig. 5 Fast light in C_{60} with sinusoidal modulated optical signal including nonanalytical points.
(a) normalized amplitude, (b) local enlargement of Fig. 5(a)

4 结 论

在红宝石晶体慢光情况以及在 C_{60} 中超光速情况下利用包含非解析点的调制信号测量了信息的传递速度,结果表明在实验测量的精度范围内无论是在慢光情况下还是在超光速情况下,信息的传递速度都不会超过真空中光速。另外,本实验结果也表明信息速度和群速度没有关系,也就是说慢光情况下信息的传递速度也不会变慢。当然这里要强调的是,目前关于信息速度的定义还没有一致的观点,本文中关于信息速度的测量都是基于信息速度的非解析点的定义方式。

参 考 文 献

- 1 L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton *et al.*. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas[J]. *Nature*, 1999, **397**(6720): 594~598
- 2 L. J. Wang, A. Kuzmich, A. Dogariu. Gain-assisted superluminal light propagation[J]. *Nature*, 2000, **406**: 277~279
- 3 M. S. Bigelow, N. N. Lepeshkin, R. W. Boyd. Observation of ultraslow light propagation in a ruby crystal at room temperature[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(11): 113903
- 4 M. S. Bigelow, N. N. Lepeshkin, R. W. Boyd. Superluminal and slow light propagation in a room-temperature solid[J]. *Science*, 2003, **301**(5630): 200~202
- 5 Z. L., Y. Dong, Q. Li. Slow light in multi-line brillouin gain spectrum[J]. *Opt. Express*, 2006, **15**(4): 1871~1877
- 6 G. Zhang, F. Bo, R. Dong *et al.*. Phase-coupling-induced ultraslow light propagation in solids at room temperature[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(3): 133903
- 7 H. Wang, Y. Zhang, N. Wang *et al.*. Observation of superluminal propagation at negative group velocity in C_{60} solution [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(12): 121107
- 8 Y. Zhang, H. wang, L. Ma *et al.*. Direct observation of signal evolution of slow and fast light in media with saturated and reverse saturated absorption[J]. *Appl. Phys. B: Laers Opt.*, 2007, **89**(2-3): 141~143
- 9 H. Wang, Y. Zhang, J. Ye *et al.*. Direct observation of signal evolution of slow and fast light in Erbium-doped optical

- fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1938~1942
- 10 L. Yosef Mario, M. Koy Chin. Optical buffer with higher delay-bandwidth product in a two-ring system[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 1796~1807
- 11 Z. Shi, R. W. Boyd, D. J. Gauthier *et al.*. Enhancing the spectral sensitivity of interferometers using slow-light media [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(8): 915~917
- 12 Z. Shi, R. W. Boyd, R. M. Camacho *et al.*. Slow-light fourier transform interferometer[J]. *Phy. Rev. Lett.*, 2007, **99**(24): 240801
- 13 M. D. Stenner, D. J. Gauthier, M. A. Neifeld. The speed of information in a 'fast-light' optical medium[J]. *Nature*, 2003, **425**(6959): 695~698
- 14 M. D. Stenner, D. J. Gauthier, M. A. Neifeld. Fast causal information transmission in a medium with a slow group velocity[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(5): 053902
- 15 L. Brillouin. Wave propagation and group velocity[M]. New York: Academic Press, 1960. 1~3