

文章编号 1004-924X(2009)02-0237-09

慢光产生的新机理及其应用

赵 勇,赵华玮,张馨元,原 博,张 硕
(东北大学 信息科学与工程学院,辽宁 沈阳 110004)

摘要:通过对比和研究电磁感应透明、相干布居振荡、受激布里渊散射和光子晶体波导等几种使光速变慢的主要技术,论述了近 10 年中的慢光技术重要理论和技术上的发展以及这些发展对慢光性能的改善及存在的问题与不足,重点介绍了近几年慢光产生的一些新技术及初步应用,并预测了慢光技术今后的发展趋势及潜在应用。本文的研究表明,慢光在光纤传感以及其它领域中将会有越来越重要的应用价值。

关键词:慢光;光纤;电磁感应透明;受激布里渊散射;掺铒光纤;光子晶体

中图分类号:O43 **文献标识码:**A

Research on some new mechanisms of slow light and its applications

ZHAO Yong, ZHAO Hua-wei, ZHANG Xin-yuan, YUAN Bo, ZHANG Shuo

(Northeastern University, College of Information Science and Engineering, Shenyang 110004, China)

Abstract: The last decade is of great significance for the development of slow light technology. In order to study on the slow light technology deeply, several kinds of slowing light technologies, such as Electromagnetically Induced Transparency (EIT), Coherent Population Oscillation (CPO), Stimulated Brillouin Scattering (SBS) and photonic crystal waveguide, were contrasted and analyzed. Also some important theoretical and technical developments to improve performance of slow light in last decade were introduced, and then problems and shortcomings existing in slowing technology were discussed. Finally, this paper focuses on some novel technologies of slowing down light velocity and their primary applications. Moreover, it forecasts the future developing trends of slow light and its potential applications. Through research on slow light, results show that slow light will realize more and more significant application values in the field of optical fiber sensing and other fields.

Key words: slow light; optical fiber; Electromagnetically Induced Transparency (EIT); Stimulated Brillouin Scattering (SBS); Erbium Doped Fiber (EDF); photonic crystal

1 引 言

光作为信息的载体,在当前信息领域中发挥

着越来越重要的作用。近年来,人们意识到如果能使光速变慢,会得到更好的光学性质,比如将其应用于光缓冲器和光传感器中,它们的存储容量和精度都会大大增加。所以,如何使光速变慢并

收稿日期:2008-05-21;修订日期:2008-07-23.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA09Z102);国家自然科学基金资助项目 (No. 60704026);国家自然科学基金资助项目 (No. 50575111)

且将其实际应用于全光通信中的光存储器、光缓冲器及光传感器等成为近 10 年来光学领域的热点研究问题之一。

1999 年 Harvard 大学 Hau 等人^[1]利用电磁感应透明(EIT)技术在 450 nK 的超冷原子中实现了 17 m/s 的极慢光速。但 EIT 技术有其显而易见的缺点。首先,它对实验条件和装置的要求较高,常温下很难实现;其次,实验耗资巨大。所以实际应用价值不大。但毕竟 EIT 技术是第一种产生慢光的技术,它对慢光技术的发展有着不可磨灭的贡献和深远的影响。

在 Hau 等人实现慢光之后的几年间,慢光技术迅猛发展,人们逐渐把目光转向如何能在室温下产生慢光而使其具有更现实和广泛的应用。2004 年哈尔滨工业大学掌蕴东研究小组^[2-3]利用相干布居振荡(CPO)产生光谱烧孔的现象在常温下红宝石晶体中实现了慢光,这使慢光的研究更具实用意义。光谱烧孔产生慢光的实质是用烧孔效应造成折射率的剧烈变化而使光速变慢,在该试验中观察到的延时为 (2.314 ± 0.005) ms,推断出光速值为 (43.215 ± 0.094) m/s。

近几年,光纤由于其传输距离长、损耗小、抗电磁干扰、耐高温等特点,在通信和传感中的应用越来越广泛,科学家们又将兴趣移至如何在光纤系统中产生慢光的问题上。2005 年 Kwang Yong Song 等人^[4]第一次在光纤中用受激布里渊散射(SBS)使得 100 ns 的光脉冲延迟了 30 ns。2007 年,Zhaoming Zhu 等^[5-6]利用 SBS 将光纤中的慢光带宽提高到了 12.6 GHz,并且将 75 ps 的光脉冲延迟到了 47 ps。与此同时,Kwang Yong Song 研究小组^[7]将光纤中 SBS 慢光的波长提高到了 25 GHz,并且将 37 ps 的光脉冲延迟到了 10.9 ps。随后,他们又实验性地证明了用泵浦加宽技术在传统光纤中可得到任意带宽的布里渊慢光^[8]。

2 慢光产生原理

一般而言,光在介质中的速度和介质折射率有关,而光的传播速度又可以分为单一频率光波传播的相速和许多频率成分组成的光波波包传播的群速。本文中讨论的是光波传播的群速度。由光波群速度的公式 $v_g = d / dk = c / n_g$, 可得出光

波在介质中传播的群速 v_g 的表达式:

$$v_g = d / dk = \frac{c}{n + \frac{dn}{d}}, \quad (1)$$

其中, ω 为光波频率, c 为光在真空中的传播速度, n 为介质的折射率, k 为传播常数。由于折射率 n 的变化范围有限,所以仅靠增加折射率来减小群速 v_g 的办法并不可取,而如果有办法使得折射率 $dn/d\omega$ 的变化率很大,则群速度会发生剧烈的变化,且当 $dn/d\omega \gg 1$ 时,群速度会变得很小,这时就产生了慢光。

另外,一些新型的慢光产生技术使得慢光产生原理也有所变化。2006 年南开大学张国权小组^[9]利用光波位相耦合的色散效应在室温下的 $\text{Bi}_{12}\text{SO}_{20}$ 晶体中实现了极慢光速。在有位相耦合效应存在的情况下,光波的群速度 v_g 表示为:

$$v_g = \frac{c}{n + \frac{dn}{d} + c \frac{d\phi_{ph}}{d}}. \quad (2)$$

这时光在介质中的群速度不仅与介质的折射率变化率有关,而且与位相耦合系数 ϕ_{ph} 的色散特性有关。而当位相耦合效应的色散特性很强时,光波的群速度 v_g 主要由位相耦合系数 ϕ_{ph} 的色散特性决定,所以可以使位相耦合系数具有正色散斜率来产生慢光。他们在常温条件下测得光经过晶体后延迟了 110 ms,相当于光在晶体中传播的群速为 0.05 m/s。

随着人们对慢光原理认识的不断深入以及对慢光产生机制的不断探索,越来越多实用的慢光产生原理和机制已被人们所认识。本文主要介绍新颖的掺铒光纤(EDF)中利用 CPO 产生慢光、光子晶体波导中产生慢光和微球体中产生慢光的基本原理,以及基于慢光技术的一些实际的和潜在的应用。

3 EDF 中的慢光

2006 年,SCHWEINSBERG 等人^[10-11]第一次在室温下 EDF 中观测到了极慢光速。这是人们首次将慢光技术和光纤相结合,使慢光在光纤通信和光纤传感领域中的应用成为可能。

实验指出,慢光可在 EDF 中通过 CPO 过程产生。一个波长为 980 nm 的可变功率泵在掺铒光纤中发射出一个波长为 1 550 nm 的信号,观测

到的最大小数延迟为 0.089,这种效果在正弦调制信号和高斯脉冲中都能出现。此外,实验还证明了掺铒光纤中的慢光光速可以通过改变泵功率来调节。

另外,2007 年哈尔滨工业大学邱巍等人^[13]用类似的方法在 EDF 中实现了光速的可控。在 EDF 中观测到了光速为 2.857×10^3 m/s 的慢光。实验系统如图 1 所示。该实验以 CPO 及增益理论为基础,实验所用 EDF 长度为 30 m。波长为 1 550 nm 的信号光经调制后通过光衰减器 (Attenuator),再由分束器 (Splitter) 分为两束,其中一部分作为参考信号直接由探测器接收并送入示波器;另一部分作为主光路光信号经隔离器 (Isolator) 后进入 EDF。同时,980 nm 泵浦激光经波分复用器 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 后也进入 EDF。信号光经 WDM 的输出端口进入同一探测器被接收,并将探测器的信号也输入示波器。最后,通过比较示波器上主光路和参考光路的信号在时域上的位置变化就可以确定通过 EDF 的光信号所发生的时间延迟。

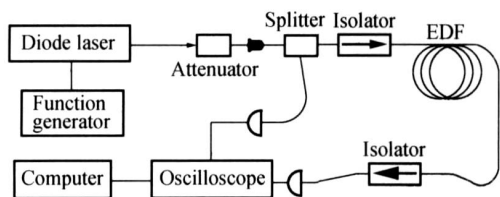


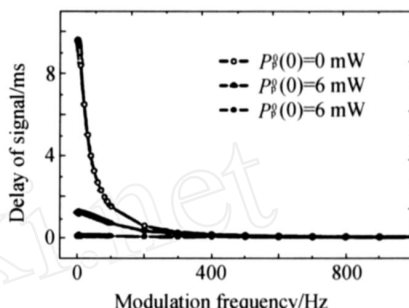
图 1 EDF 中光群速可控实验结构框图^[12]

Fig. 1 Experimental setup of slow light in EDF^[12]

图 2 为信号光的延迟与调制频率之间的关系,其中 P_p 为抽运功率。由图可知,当抽运功率 < 12.5 mW 时,介质处于吸收状态,此时光脉冲信号延迟,且时间延迟为正,如图 2(a),时间延迟随着调制频率的增大而减小,当调制频率 > 400 Hz 时,时间延迟减小到零。当抽运功率 > 12.5 mW 时,光脉冲信号超前,且时间延迟为负,如图 2(b),时间延迟随着调制频率的增大而增大,且当调制频率 $> 3 000$ Hz 时,时间延迟增大到 0。通过这种外加抽运激励光源的方法来改变介质的吸收状态,就可以有效地控制光脉冲信号在 EDF 中的传输。

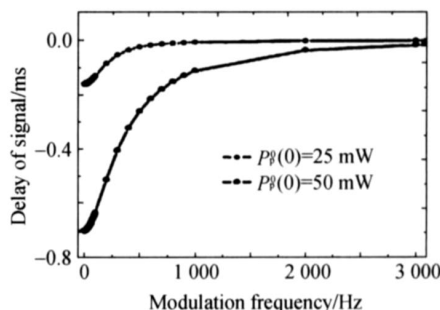
图 3 为信号光功率恒定时,不同调制频率时的信号光相位延迟与外加抽运功率的关系,其中

为调制频率。由图 3 可以看出,在不改变信号光功率和调制频率的情况下,仅仅通过不断调节抽运功率就可以获得不同的时间及相位延迟,从而实现光速连续可控。



(a) 抽运功率 < 12.5 mW

(a) Pump power less than 12.5 mW



(b) 抽运功率 > 12.5 mW

(b) Pump power, more than 12.5 mW

图 2 信号光的时间延迟与调制频率的关系^[13]

Fig. 2 Relations between delay of signal and modulation frequency^[13]

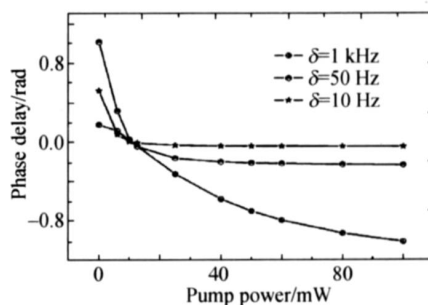


图 3 相同信号光功率下,不同调制频率时的信号相位延迟与外加抽运功率的关系^[13]

Fig. 3 Relation between phase delay in different modulation frequencies and pump power^[13] in the same signal power

以上所介绍的两个 EDF 中慢光产生的实验机理大同小异,都是通过 CPO 在 EDF 中实现了

慢光的人为可控。由此,不仅成功的在室温下使光速减慢,而且还实现了慢光和光纤之间的结合,并最终实现光速的人为可控,这种实验机理有着巨大的潜在应用价值。但从实际应用来看,CPO的带宽很低,所以如何扩展CPO的带宽使EDF慢光系统更加实用化是当前有待解决的问题。

4 光子晶体波导中的慢光

光子晶体波导产生慢光与其它慢光产生机制相比,其优势在于能够在室温下产生任意波长、带宽很大的慢光,而且光子晶体波导慢光系统的体积小、器件种类少、结构紧凑,在全光缓存、光通信、光传感等领域具有广阔的应用前景,因此受到各国科学家的广泛关注。其中最有意义的是IBM公司的科学家Yurii A. Vlasov^[14]用硅芯片上的硅光子晶体波导实现了光波群速度的有效控制。

从材料结构上看,光子晶体是一种在光学尺度上具有周期性介电结构的人工设计和制造的晶体。光子晶体具有能带结构,能带与能带之间有带隙,即光子带隙,能量处在光子带隙内的光子不能进入该晶体,从而光子带隙结构控制着光在光子晶体中的运动。人们可以通过设计和制造光子晶体及其器件,达到控制光运动的目的。

光子晶体从空间分布上看有一维、二维和三维,其中二维光子晶体由于制作相对简单并且具有三维光子晶体的某些特性而被广泛应用于产生慢光^[15-17]。

图4表示一个典型的光子晶体带隙结构图,横坐标代表电磁波入射晶体的方向,纵坐标表示频率,中间部分的灰色区块即为带隙,频率在这段区域内的电磁波都不能穿透。当频率落在带隙中的电磁波由外部入射至光子晶体区域时,由于在光子晶体中没有与其对应的传播模式,因此电磁波会被完全地反射回去。

由式(1)可知,光脉冲的群速度 $v_g = c/n_g$,其中 n_g 为材料的群折射率,它控制着材料的色散和光速减慢的程度。反常色散时, n_g 很大,此时群速度 v_g 就会变得很小甚至为零。

目前为止,国内外已有了很多用光子晶体产生慢光的实验^[19-20],Saint Andrews大学的Settle, M. D.^[21]等人论证了带宽为2.5 THz的慢光

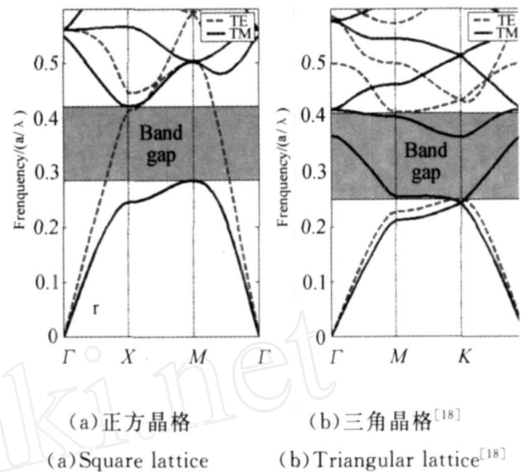


图4 二维光子晶体能隙图

Fig. 4 Two dimensional photonic crystal band gap

产生机理。Stanford大学的Shanhui Fan教授在动态光子晶体中将光脉冲延迟了更长的时间^[22-23]。2006年清华大学Yin Wang等人^[24]在25 m长的高非线性光子晶体光纤中将SBS慢光延迟到了14 ns。

光子晶体波导产生慢光的机制目前还存在一些有待解决的问题,如色散、带宽受限和损耗过大等等。但随着对光子晶体相关理论和技术研究的不断深入和完善,光子晶体波导慢光系统会越来越接近实用化,并随之带来巨大的实用价值。

5 微球体中的慢光

自从EIT、SBS、CPO和光子晶体波导技术先后被用于产生慢光后,越来越多的新型慢光产生机理被人们所认识。

2007年,日本Shizuoka大学的Kouki Tot-suka等人^[25]研究了当光脉冲通过光纤光锥耦合到极高 Q 值的微球体系统中产生慢光和快光的机理。

众所周知,微球体系统中的色散强烈依赖于光纤和微球体的耦合强度及球体中的环路损耗。在欠耦合的状态下,耦合程度比损耗小,色散显示出反常特性并且出现快光。在过耦合的状态下,耦合程度比损耗大,会观察到正常色散并且产生慢光。快光和慢光可以被解释为弹道光 and 循环光在球体中干涉效应的结果。

光纤光锥具有空气覆盖结构,它的直径从正

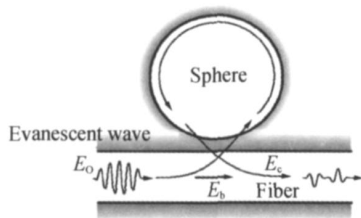


图 5 微球体光纤光锥系统的示意图^[25]

Fig. 5 Schematic illustration of microsphere fiber taper system^[25]

常尺寸逐渐减少至几微米甚至到次微米量级。光沿光锥的传播是从光锥中心按准指数衰减的渐逝波。当微球体移动到渐逝波区域时,光沿光纤光锥耦合进入球体的 WGM (Whispering Gallery Mode) 模式。传播到 WGM 模式的光在球体边界上被全反射,所以它在接近球体表面的轨道上循环,因此称它为循环光。循环光可以在球体的表面作为渐逝波出现,也可以耦合回光纤光锥。一些入射光迂回在球体中并且直接作为系统的输出而出现,称作弹道光。因此,该系统的总输出电场可以解释为弹道光和循环光的叠加。

当有光输入时,球体开始储存光能量。典型累积时间 $1/\gamma = Q/\omega$ 是共振线宽的倒数。类似的,当无入射光时,光能量离开球体。这种不断地累积和释放过程就造成了循环光脉冲对于弹道光脉冲的时间延迟。

图 6 阐释了时域中慢光的产生机理。在过耦合的条件下,循环光强大于弹道光强。因此,相位上比循环光落后 τ 的弹道光抵消了循环光的前沿。该机制导致了相对于初始脉冲轮廓的延迟,并且解释了时域中慢光的产生。

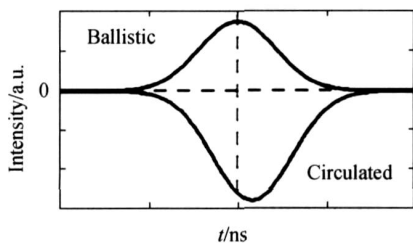


图 6 过耦合状态下的慢光机理图解^[25]

Fig. 6 Illustration of slow light mechanism in over-coupling condition^[25]

由该微球体光纤系统的慢光产生机理可知,

慢光是由弹道光 and 循环光发生干涉效应后产生的,因此可以设想通过控制光纤光锥的长度或其它特性来控制其中的某一路光,从而控制干涉效应,这样就有可能做成微球体慢光光纤传感器。由此可见,微球体光纤慢光系统具有很实际的应用前景。但是就目前来看,微球体由于加工困难而没有被广泛应用,所以如何解决微球体加工方面的问题是将微球体慢光系统实用化的关键。

6 慢光的应用现状及潜在应用趋势

近年来,人们在慢光产生机制方面的研究已取得了巨大的进步,越来越多性能良好、结构简单的慢光产生机制呈现出来,这也使得慢光从理论走向应用的步伐越来越快。

早在 2003 年,加州大学伯克利分校的 CONNIE J. CHANG-HASNAIN 等人^[26] 阐述了利用慢光在半导体纳米结构中实现可变光缓存器的实验机理。提出了一种半导体量子点 (Quantum Dot, QD) 结构的紧凑型可变全光缓存器。这种缓存作用是通过 EIT 效应利用外部控制光源去改变介质的色散特性,而使光信号变慢而得到的。

图 7 为一种全光缓存器的原理,其结构如图 8 所示。输出数据 $f(L, t)$ 本质上和输入数据 $f(0, t)$ 一样,等于比例常数 p 和时间延迟 τ 的乘积。受外部源 V 的控制, L 是器件的长度。理论分析说明,室温下在均匀的 QD 波导中可以在 10 Gb/s 的系统内获得 8.7 ns 的缓存时间,并且没有脉冲畸变和延展。

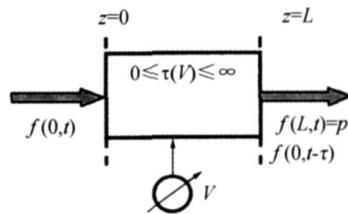


图 7 一种全光缓存器的定义^[26]

Fig. 7 Definition of an all-optical buffer^[26]

近几年,我国也逐渐开始了慢光光缓存器方面的应用研究。2007 年重庆邮电大学的卢超等人^[27] 讨论了慢光缓存器及其在光分组交换中的应用,并进行了性能仿真。仿真结果表明,所设计的光分组交换 (Optical Packet Switching, OPS)

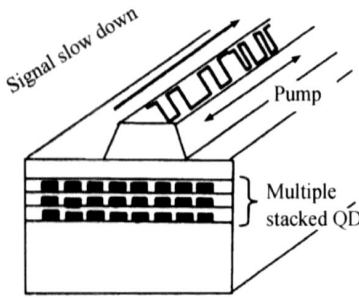


图 8 基于半导体 QD 结构的全光缓存装置示意图^[26]
 Fig. 8 Schematic of an optical buffer device based on semiconductor QD structures^[26]

结构具有很好的性能,且很好地解决了传统 OPS 的一系列问题。同年北京交通大学的吴重庆^[28]阐述了 SBS 慢光型光纤全光缓存器的研究进展,并指出目前尚未开发出一种能够完全达到各项指标的慢光缓存器,应该继续加大研发力度并发展综合型的光缓存系统。

慢光技术不仅可以直接应用于依赖光脉冲延迟的光缓存器中,还可以应用在传统的如萨格纳克干涉仪等光学仪器中,使原有仪器的性能得到改善。2007 年北京大学 Chao Peng 研究小组^[29]报道了基于高群色散慢光共振结构的旋转传感系统,该传感机理的前提条件是介质和干涉仪之间有相对运动。指出慢光媒介可以被用于测量相对运动,而且慢光共振结构适用于检测航海方面的绝对转动,基本思想是检测由闭环萨格纳克效应引起的相移。在高色散介质中研究了萨格纳克效应,并且建立了一个当介质和干涉仪之间有相对运动时的相移表达式,相移正比于群指数 n_g , 定义为自由空间光速和群速度的比值。

2006 年 Lufan Zou 等人^[30]和 Luc Th enaz 等人^[31]先后讨论和研究了慢光在分布式布里渊传感器中的应用。Lufan Zou 小组提出的基于慢光的分布式布里渊传感器实验系统如图 9 所示。实验中,激光光源峰值功率在 3.3 ~ 56.2 mW,泵源功率在 1.3 ~ 83.2 mW。两个固态的激光器 (Laser 1, Laser 2) 作为光源工作在 1 319 nm 波段。Laser 1 通过电光调节器 (EOM) 产生一个脉冲信号, Laser 2 是连续可调谐 (cw) 激光器。光隔离器 (Isolator) 的输出信号通过光纤反向传播,

并且作为 SBS 泵浦光束。1.2 ns 的斯托克斯光进入长度为 10 km 的光纤,该光纤作为慢光介质和传感光纤,它输出的经延迟和放大的光脉冲用 In GaAs 光敏二极管和数字示波器记录。实验证明在很长的 (10 km) 传感光纤中,布里渊增益和脉冲延时随着峰值功率的增加而减小,由此构成了慢光布里渊传感器。

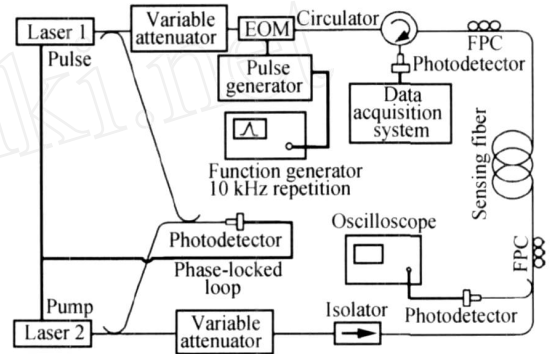


图 9 通过 SBS 观察慢光的配置构造图^[31]

Fig. 9 Configuration for observing slow light via SBS^[31]

2007 年 Avi Zadok 等^[32]将慢光光纤应用在控制无线电波频率信号的延迟中。图 10 给出了 SBS 慢光引起 LFM (Linear frequency modulation) 信号延迟的实验装置。首先,为了获得宽带、长延时、低幅度失真和低相位失真的 SBS 慢光过程,泵源激光的光谱被合成用于啁啾控制。其次,调制探测激光 (Probe laser) 的频率以便上移与 SBS 过程增益带宽相交迭的 LFM 调制边带。由此,该激光的 LFM 信号被 SBS 慢光放大和延迟。实验表明, SBS 过程适用于延迟任意载

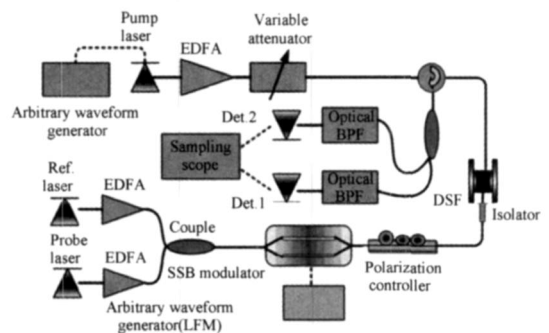


图 10 SBS 慢光引起 LFM 信号延迟的实验装置^[32]

Fig. 10 Measurement setup for SBS induced LFM signal delay^[32]

波频段的 1 GHz 宽的线性频率调制射频信号。

随着慢光产生技术的日趋完善,对慢光的应用研究也日渐增多。其实,慢光技术的应用很大程度上依赖于慢光产生的实验机理。到现在为止,一些实用价值很高的慢光产生机理已经有了初步的应用,如上所提及的慢光光缓存器、旋转(角速度)传感器等。相信在未来的几年中,这些技术成熟的实验机理会有更进一步的应用,与此同时,还会有更多实用性更强的实验机理被人们开发出来,从而激发出慢光技术更多更新颖的应用价值。

7 结 论

本文讨论了慢光技术在过去 10 年中的成长

参考文献:

- [1] 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: 594-598.
- [2] 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.
FAN B H, ZHANG Y D, YUAN P. Ultraslow light propagation in a solid[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(10): 4692-4695. (in Chinese)
- [3] 掌蕴东, 范保华, 袁萍, 等. 红宝石晶体中慢光现象的实验观测[J]. *光学学报*, 2004, 24(12): 1688-1690.
ZHANG Y D, FAN B H, YUAN P, *et al.*. Observation of slow light propagation in solid state material[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12): 1688-1690. (in Chinese)
- [4] SONG K Y, HERRÁEZ M G, THÉVENAZ L. Observation of pulse delaying and advancement in optical fibers using stimulated Brillouin scattering[J]. *Opt. Express*, 2005, 13(1): 82-88.
- [5] ZHU ZH M, DAWES A M C, GAUTHIER D J, *et al.*. Broadband SBS slow light in an optical fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(1): 201-206.
- [6] ZHU ZH M, DAWES A M C, GAUTHIER D J, *et al.*. 12-GHz bandwidth SBS slow light in an optical fibers[C]. *OFC06 PD P1*: 2657-2659.
- [7] SONG K Y, HOTATE K. SBS slow light in optical fibers with 25-GHz bandwidth[C]. *Optical Fiber Communication Conference National Fiber Optic Engineers Conference, OFCN FOEC 2007. Technical Digest, March 2007*, 34-6.
- [8] HERRÁEZ M G, SONG K Y, THÉVENAZ L. Arbitrary-bandwidth Brillouin slow light in optical fibers[J]. *Optics Express*, 2006, 14(4): 1395-1400.
- [9] 张国权, 薄方, 董嵘, 等. 光波位相耦合色散效应与固态介质中室温下的光速调控[J]. *物理*, 2006, 35(10): 845-851.
ZHANG G Q, BO F, DONG R, *et al.*. Dispersive effect of light phase coupling and group velocity control in solids at room temperature[J]. *Wuli*, 2006, 35(10): 845-851. (in Chinese)
- [10] SCHWEINSBERG A, LEPESHKIN N N, BIGELOW M S, *et al.*. Observation of superluminal and slow light propagation in erbium-doped optical fiber[J]. *EUROPHYSICS LETTERS*, 2006, 73(20): 218-224.
- [11] GEHRING G M, SCHWEINSBERG A, BARSIC, *et al.*. Observation of backward pulse propagation through a medium with a negative group velocity[J]. *Science*, 2006, 312(5775): 895-897.
- [12] ZHANG Y D, QIU W, YE J B, *et al.*. Controllable ultraslow light propagation in highly-doped erbium fiber[J]. *Optics Communications*, 2008, 281

- (9) :2633-2637.
- [13] QIU W, ZHANG YD, YEJ B, *et al.*. Controllable group velocity of light pulse in erbium-doped optical fiber at room temperature[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(12) :7009-14.
- [14] VLASOV YA, OBOYLE M, HAMANN HF, *et al.*. Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides [J]. *Nature*, 2005, 438(7064) :65-69.
- [15] POVINELLI ML, JOHNSON SG, JOANNOPOULOS JD. Slow-light, band-edge waveguides for tunable time delays[J]. *Opt. Exp.*, 2005, 13(18) :7145-7159.
- [16] GERSEN H, KARLE TJ, ENGELLEN RJ P, *et al.*. Real-space observation of ultraslow light in photonic crystal waveguides[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(7) :073903-1-4.
- [17] FINLAYSON CE, CATTANEO F, PERNEY NMB, *et al.*. Slow light and chromatic temporal dispersion in photonic crystal waveguides using femtosecond time of flight [J]. *Phys. Rev. E*, 2006, 73 :016619-1-10.
- [18] 张高德, 栾丕纲. 光子晶体中的波传播[J]. 物理双月刊, 2006, 28(5) :844-850.
ZHANG GD, LUAN PG. Wave transmission in photonic crystals[J]. *Physics Bimonthly*, 2006, 28(5) :844-850. (in Chinese)
- [19] SCALORA M, FLYM RJ, REINHARDT SB, *et al.*. Ultrashort pulse propagation at the photonic band edge large tunable group delay with minimal distortion and loss[J]. *Phys. Rev. E*, 1996, 54 :R1078-R1081.
- [20] ZHU SY, LIU NH, ZHENG H, *et al.*. Time delay of light propagation through defect modes of one-dimensional photonic band-gap structure [J]. *Optics Communications*, 2000, 174(1-4) :139-144.
- [21] SETTLE MD, ENGELLEN RJ P, SALIB M, *et al.*. Flatband slow light in photonic crystals featuring spatial pulse compression and Terahertz bandwidth[J]. *Opt. Exp.*, 2007, 15(1) :219-226.
- [22] YANIK MF, FAN SH. Stopping and storing light coherently[J]. *Phys. Rev. A*, 2005, 71(1) :013803-1-10.
- [23] YANIK MF, FAN SH. Dynamic photonic structures stopping storage, and time reversal of light[J]. *Studies in Applied Mathematics*, 2005, 115 :233-253.
- [24] WANG Y, ZHANG W, HUANG YD, *et al.*. SBS slow light in high nonlinearity photonic crystal fiber[C]. OFC/NFOEC 2007-Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference 2007, 4348397 :1-3.
- [25] TOTSUKA K, TOMITA M. Dynamics of fast and slow pulse propagation through a microsphere-optical-fiber system[J]. *Physical Review E (Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics)*, 2007, 75(1) :16610-1-5.
- [26] CHANG HANG CJ, KU PC, KIM J, *et al.*. Variable optical buffer using slow light in semiconductor nanostructures [J]. *IEEE*, 2003, 91(11) :1884-1897.
- [27] 卢超, 毛幼菊. 慢光缓存器及其在光分组交换中的应用[J]. 半导体光电, 2007, 28(3) :420-422.
LU CH, MAO YJ. Slow light buffer and its applications in optical packet switching[J]. *Bandaoti Guangdian/Semiconductor Optoelectronics*, 2007, 28(3) :420-422. (in Chinese)
- [28] 吴重庆. 光纤型缓存器的研究进展[J]. 半导体光电, 2007, 28(5) :601-606.
WU CH Q. Fiber based all-optical buffer [J]. *Bandaoti Guangdian/Semiconductor Optoelectronics*, 2007, 28(5) :601-606. (in Chinese)
- [29] PENG C, LI ZB, XU AS. Rotation sensing based on a slow-light resonating structure with high group dispersion[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(19) :4125-4131.
- [30] ZOU LF, BAO XY, YANG SQ, *et al.*. Effect of Brillouin slow light on distributed Brillouin fiber sensors[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(6) :2698-2700.
- [31] THÉVENAZ L, SONG KY, HERRÁEZ MG. Time biasing due to the slow-light effect in distributed fiber-optic Brillouin sensors [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(6) :715-717.
- [32] ZADOK A, RAZO, EYAL A, *et al.*. Optically controlled low-distortion delay of GHz-wide radio-frequency signals using slow light in fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(7) :462-464.

作者简介:



赵 勇(1973 -),男,辽宁沈阳人,工学博士,教授,博士生导师,主要从事光纤传感和光电精密测量技术的研究。E-mail: zhaoyong@ise.neu.edu.cn

赵华玮(1984 -),男,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事光纤传感和慢光技术的研究。E-mail: huazai198412@yahoo.com.cn

张馨元(1987 -),女,辽宁沈阳人,本科生,主要从事新型光纤光栅多参数测量的研究。E-mail: panpan_19871120@163.com

原 博(1987 -),男,辽宁丹东人,本科生,主要从事新型光纤光栅多参数测量的研究。E-mail: silence0907@163.com

张 硕(1988 -),男,辽宁沈阳人,本科生,主要从事新型光纤光栅多参数测量的研究。E-mail: psmicyyk@163.com

下期预告

高精度紫外探测器辐射定标系统

王 锐^{1,2},汪龙祺^{1,2},王淑荣¹,李福田¹,宋克非¹,刘海波¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,吉林长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

构建了一套高精度紫外探测器辐射定标系统。用以 NIST(以美国国家标准技术研究院)紫外标准探测器为基准,在 200~400 nm 波段上,对响应度未知的紫外硅探测器,紫外增强型光电倍增管和日盲型紫外光电倍增管进行了绝对标准的传递。并在 350 nm 上对紫外硅探测器的空间均匀性进行了标定。按照国际通用不确定度评估规范,对测量结果进行不确定度分析和评估,总的传递不确定度 < 2%。达到了对紫外探测器进行高精度定标的目的。