

量子干涉及其在光存储中的应用

Quantum Interference and Its Application in Light Storage

郭 弘/GUO Hong

北京大学信息科学技术学院量子信息与测量教育部重点实验室, 北京 100871

Key Laboratory for Quantum Information and Measurements of Ministry of Education, School of Electronic Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China

[摘要] 全光通信一直是光通信领域的一个追求, 其中最大的瓶颈来源于过去光电转换的不可或缺。近些年来, 随着量子干涉与量子信息技术的发展, 人们已经实现了对于光脉冲实施群速度的任意操控, 乃至将光脉冲相干地存储在介质中, 然后释放出来。这为最终真正地实现可以实用的光存储, 并最终实现全光通信带来了极大的希望。

[关键词] 光存储; 电磁感生透明; 暗态极化声子; 绝热; 相干操控

[中图分类号] O438

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)12-0015-06

Abstract: All-optical communication is a pursuance in optical communications, which has not yet been realized owing to that the electric-optic conversion can not be avoided in current technologies. In recent years, thanks to the development in quantum coherence and quantum information technologies, people have implemented the coherent manipulation of the group velocity of the light pulse. Moreover, one has achieved the short time storage of light pulse in medium and then releases it. These achievements have shown brilliant future to the final implementation of applicable light storage and therefore the all-optical communications.

Key Words: light storage; electromagnetically induced transparency (EIT); dark-state polariton (DSP); adiabatic; coherent manipulation

CLC Number: O438

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)12-0015-06

1 引言

信息科学技术在现代社会生活中正发挥着日益重要的作用。在各种信息技术中, 如何实现高容量、高效率、高安全性和高保真度的存储和传递信息已经成为一个十分重要和迫切的任务。在各种可能的信息载体中, 激光成为其中一个非常重要的候选者。所以, 全光型光纤通信成为一个亟待解决的问题, 其中, 最为核心的技术难点就是如何将存储和交换设备全光化。也就是说, 要避免传统的基于光电转换技术的存储器和交换机, 而代之以全光的光存储器和光交换机。这种避开了光电转换过程的光存储器和光交换机的实现, 将意味着以大信息容量和高传输效率为特征的全光通信时代的真正来临。因此, 利用何种技术和手段, 选择何种光学材料或介质, 在传输线路中得以能够随意地操控、调制有信息的光脉冲(比如使光脉冲减速甚至停止, 继而又可在时域上将其恢复), 就成为了实现上述目标的关键难题。

随着 20 世纪 90 年代美国著名科学家、美国科学院院士、Stanford 大学的

Stephen E. Harris 教授对电磁感生透明

(Electromagnetically induced transparency, 以下简称 EIT) 原理的揭示^[1-4], 以及其后美国科学家在此基础上对光脉冲群速度的有效操控的实现^[5,6], 使得人们已经可以利用超冷^[5,7]和室温^[6]下的气体来大幅度地降低光脉冲的群速度, 甚至使之完全停止(亦称为光的“冷冻”)后, 还能通过对控制光场的改变, 恢复原来的光脉冲, 这就使得光脉冲已经可以被存储在这些气体原子介质中^[8-11]。

利用 EIT 效应, 在原子气体介质中对信号脉冲光实施相干可逆操控的理论和实验至此达到一个高潮, 人们系统总结了此类研究的理论和实验研究成果^[12-14], 并希望在此基础上将光存储从经典的光脉冲的存储和操控逐渐发展为对光场态的转移, 以使基于经典的全光通信应用的光存储研究更上一个台阶, 对今后量子通信及其中继的研究提供更多的基础和支持。与原子气体中光存储研究几乎同时, 人们也相继在半导体材料(包括半导体量子点)、冷晶体等固体介质中研究并实现了光存储^[15-21]。

2 电磁感生透明 (EIT) 及原子介质中的光群速减慢

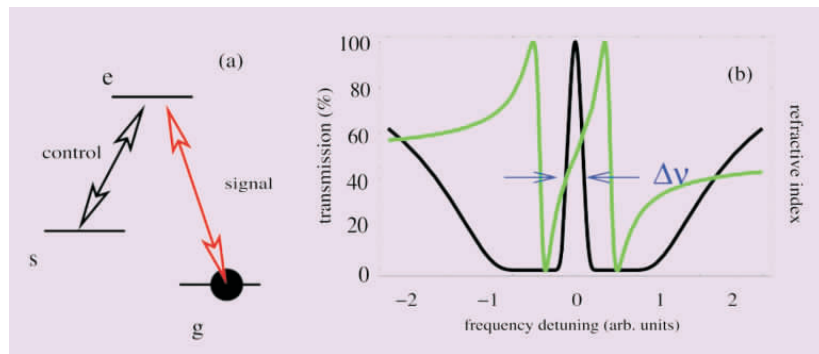
在从理论上提出无反转激光 (Lasing without inversion, 简记为 LWI) 这一概念之后, 美国科学家 Stephen E. Harris 教授于 1990 年首先在理论上提出一类新型量子干涉效应——电磁感生透明 (EIT), 1991 年该效应被 Harris 小组在铯(Sr)和铅(Pb)两种原子的实验中观察到^[3,4]。

EIT 是指在一个光吸收的介质中, 如果用两个有微小失谐的光脉冲共同作用, 在双光子共振的情况下, 则可以将光吸收介质变为光不吸收(透明)介质。在这个效应出现的同时, 还会出现光脉冲的群速度大幅度降低(可以通过改变实验条件来操控)和将光信息存储到原子态, 并在需要的时候将光信息提取出来。见图 1: 两个有微小失谐的光脉冲共同作用在一个三能级 Λ -型的原子介质中, 其中控制光(control)和信号光(signal)的频率差(失谐)很小, 等于原子的两个下面能级的间隔, 这时, 信号光就能在该原子介质中无吸收地传输下去, 同时群

收稿日期: 2006-09-22

基金项目: 国家自然科学基金资助课题 (10474004)

作者简介: 郭 弘, 男, 北京大学信息科学技术学院, 教授, 主要从事量子干涉与量子信息的研究; E-mail: hongguo@pku.edu.cn



(a) 原子能级结构示意图
(a) The schematic atomic energy configuration.
(b) EIT 情况下的原子介质的色散 (绿) 和吸收 (黑) 曲线
(b) The dispersion (green) and absorption (black) curve of atomic medium in EIT.

图 1 EIT 原理图

注:从图 1(b)可以看出,在双光子共振点附近,色散曲线非常陡峭(即斜率非常大),从而使得光脉冲的群速度可以变得非常小;同时,该点附近的透射率非常大($\sim 100\%$)^[13]。

Fig. 1 Schematic diagram of EIT

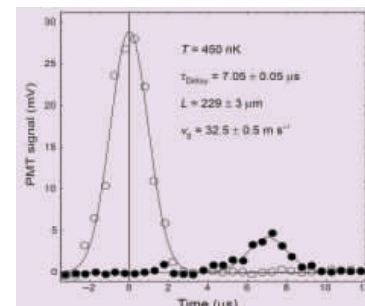
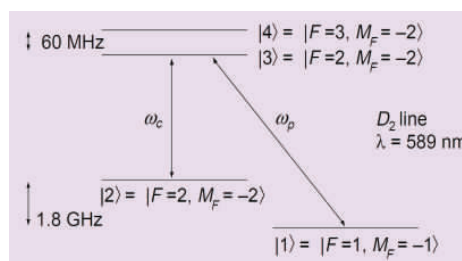
Note: It can be found in Fig. 1 (b) that, in the vicinity of the two-photon resonance, the dispersion curve has a very sharp slope so as to give rise to very small group velocity of light pulse, while the transmission near that region is very big ($\sim 100\%$)^[13].

速度大幅度降低。当其降低到远小于真空光速,甚至等于 0 时,光脉冲就极有可能被“冷冻”乃至存储在原子介质中。

目前,人们认为,形成 EIT 一般需要具备以下两个条件:① 两束经过频率和相位锁定的激光,其中一束为控制光(连续光或者脉宽远大于信号光脉宽的长脉冲光),有较强的光强(Rabi 频率);另一束为信号光(或被控制光,脉冲光),光强远远小于控制光强;② 该两束光与三能级 Λ -型的原子介质发生相互作用,并满足双光子共振的条件(即,两束光与原子各自耦合能级的失谐量相等)。在满足上述条件后,会使原子处于所谓的暗态(dark state),并产生图 1 所示的双光子共振点附近的陡峭的色散曲线和近乎为 100% 的透射率。色散曲线的陡峭度取决于控制光与信号光的相对强弱,控制光越强则越陡峭,从而 EIT 线宽则越窄;反之亦然。因此,通过调节控制光的光强可以有效地操控原子介质的色散性质,并从而达到有效操控脉冲信号光的群速度的目的。

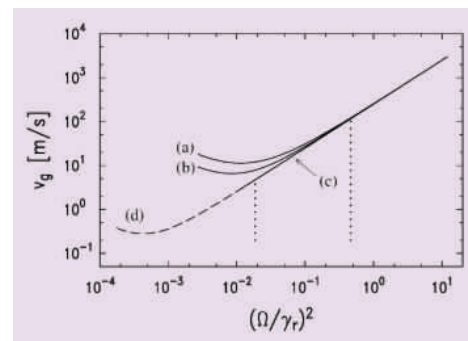
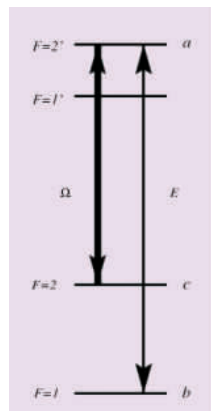
EIT 出现后的一个最重要的应用——光脉冲群速度的减慢——出现在 1999 年(作者注:事实上,此前,人们已经可以操控光脉冲的群速度并使之变得很慢,但是都只是比真空中的光速小 2~3 个数量级,如光脉冲的群速度被降低到 $c/165$ ^[22] 和 $c/3\,000$ ^[23]。但是,1999 年的结果是 7 个数量级的大幅度降低,因此备受关注。几乎与此同时,对光脉冲群速度的操控也深入到了以实现超光速和负光速的研究之中^[24],并进而更加确信,光脉冲的群速度并不是其信号传播的速度。事实上,早在 20 世纪 50 年代,人们已经了解了这一点^[25]。近期的

实验由于效应明显而再次受到人们的关注^[26]。通过相干操控,慢光和群光速之间还可以互相转化,如文献^[20]。当时,美国 Harvard 大学的 L. Hau 教授领导的冷原子实验小组与 S. Harris 教授合作,利用 EIT 效应,在超冷的钠(^{23}Na)原子中将光脉冲的群速度降低到了 17 m/s (详见图 2 (a))^[5,7],引起了学术界的广泛关注,该结果发表在当年的 Nature 杂志,并成为封面文章(封面图为一个光脉冲跑得比自行车还慢(图 3))。尽管冷原子由于有很好的相干性,包括碰撞等因素所带来的退相干效应很弱,从而更容易使 EIT 效应以及慢光效应更为明显,但由于冷原子实验本身的复杂性,人们还是希望能够在室温下或是热原子等更容易满足的实验条件下来研究慢光操控的可能性。1999 年晚些时候,美国科学家 A. Scully 教授领导的小组终于在热的(360 K)铷(^{87}Rb)原子气室中观察到了与 Hau 小组在冷原子中观察到的类似的光脉冲群速度变慢(~ 90 m/s 的数量级)的现象(详见图 2 (b))^[6],同时发现,该群速度可以通过调节控制光的光强而加以有效的操控。只是由于



(a) 左图为 ^{23}Na 原子的能级结构示意图。右图为应用 EIT 导致的光脉冲群速度变慢。其中左边的脉冲为参考脉冲,右边的为延迟脉冲,此时的群速度为 32.5 m/s^[5]

(a) The left is the schematic atomic energy configuration for ^{23}Na atom, while the right is the deceleration of light pulse group velocity. In the right figure, the left is the reference pulse and the right is the delayed pulse, with the group velocity around 32.5 m/s^[5]



(b) 左图为 ^{87}Rb 原子的能级结构示意图。右图为应用 EIT 导致的光脉冲群速度变慢。群速度变慢后可以达到 100 m/s 的量级^[6]

(b) The left is the schematic atomic energy configuration for ^{87}Rb atom, while the right is the deceleration of light pulse group velocity, which can attain the scale of ~ 100 m/s^[6]

图 2 冷原子(^{23}Na)和热原子(^{87}Rb)中的慢光现象

Fig. 2 Slow light in cold (^{23}Na) and hot atom (^{87}Rb) gas



图3 光比自行车跑得还慢！

Fig. 3 The light is slower than a bicycle

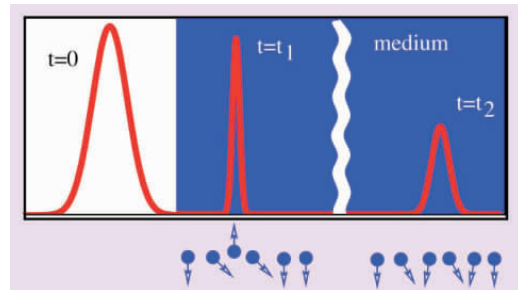
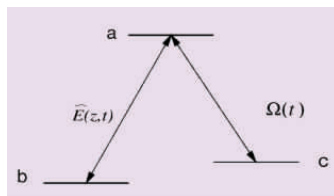
热原子本身的退相干太强而无法达到冷原子那么低的群速度。

3 光存储的暗态极化声子 (dark-state polariton)理论及原子介质中的光存储

光脉冲的群速度能够被有效地操控后,一个自然的想法是,能否将其彻底地停下来,甚至于存储在介质中呢?如果能够做到这样的话,我们在引言中所提到的光存储就可以实现了。在 17 m/s 的光脉冲实验的两年之后,人们终于在冷原子和热原子气体中实现了将光脉冲的彻底冷冻、存储(写),以及释放(读)的过程。而所有这一切,最重要的其实只是要绝热地 (adiabatically, 即,此过程与信号脉冲的时间宽度相比要长得多) 关断和打开控制光。这一绝热开关过程,就是最终实现光脉冲的存储、释放这一相干、可逆过程的关键。

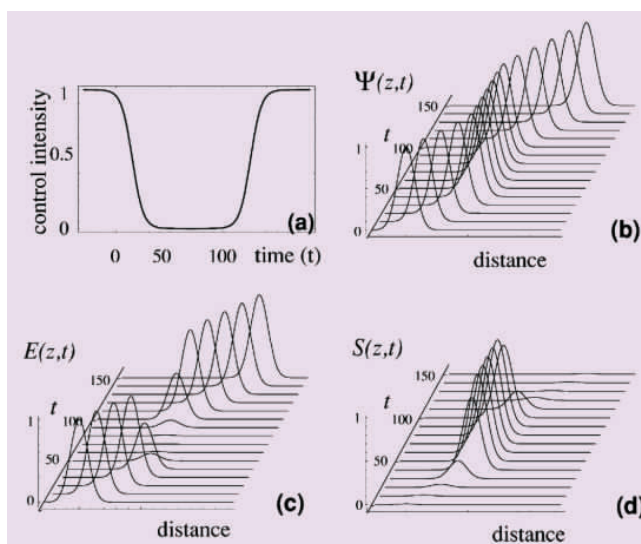
在实现光脉冲存储的过程中——如同 EIT 一样——理论走在了实验的前边,或者更确切地说,正是由于首先在理论上预言了对光脉冲存储及释放的相干操控的可能性,才使得后面的实验能够很快地实现光存储。

2000 年初,德国科学家 Michael Fleischhauer 和美国科学家 M. D. Lukin 提出了基于 EIT 现象的一个全光存储的理论模型——暗态极化声子^[8](dark-state polariton)模型。该模型定量地给出了操控光脉冲的群速度并将其信息存储到原子态上的方法,其关键点是利用绝热地关掉或打开控制光而操控信号光的速度及其信息,具体见图 4。根据该模型,光脉冲波函数与原子波函数共同组成一个“准粒子”(quasi-particle)波函数,称为“极化声子”(polariton),当控制光与信号光的频率差(失谐)达到暗态 (dark-state) 条件时,亦即等于原子的两个下能级频率差时,该准粒子将会缓慢但是稳定地传输下去,而其中的光脉冲信息和原子态能够通过改变控制光的光强被随意地操控。从图 4 可以清楚地看到,刚开始时是完整的光脉冲传输,随后光脉冲消失,其信息全部储存到了原子态上,然后,原子态上的信息又释放出来,重新变为光脉冲传输下去。



(a) 左: 能级结构示意图;右: 光脉冲从真空中进入慢光介质(蓝)后的空间(脉冲宽度)压缩现象示意图。在此过程中光子波函数 (photonic wave) 会逐渐转换为原子的两个下能级相干叠加形成的旋子波函数 (spin wave), 它们共同组成暗态极化声子波函数缓慢地在原子介质中传播。在长距离传播后光脉冲波包会由于 EIT 透明窗口线宽的限制而产生而逐渐展宽。^[12]

(a) Left: Schematic energy level configuration; right: the schematic diagram of the spatial compression of light pulse when passing through the slow light medium (blue). In this process, the photonic wave-packet will gradually be converted to the spin wave-packet and their superposition component, i.e., the polariton wave-packet, propagates slowly in the medium. After long distance of propagation, the photonic wave will be broadened due to the limit of EIT linewidth.^[12]



(b) 暗态极化声子在原子介质中传播过程中的演化^[12]

(b) Evolution of dark-state polariton propagating in atomic medium^[12]

图4 暗态极化声子模型原理图

Fig. 4 Schematic diagram of dark-state polariton model.

该模型的基本思想如下。首先,我们所关心的信号光脉冲由于光强非常弱而被视为量子光场,而控制光为经典光场。脉冲信号光在原子介质中传播的过程中会由于控制光强的逐渐减弱而逐渐转化为原子旋子波函数 (spin wave)。信号光波函数与原子的旋子波函数一起构成了“极化声子”,它具体表述为一个光子波函数和原子的旋子波函数的线性叠加所形成的波函数算子:

$$\hat{\Psi}(z, t) = \cos\theta(t)\hat{E}(z, t) - \sin\theta(t)\sqrt{N}\hat{\sigma}_{bc}(z, t),$$

$$\cos\theta(t) = \frac{\Omega(t)}{\sqrt{\Omega^2(t) + g^2 N}},$$

$$\sin\theta(t) = \frac{g\sqrt{N}}{\sqrt{\Omega^2(t) + g^2 N}}.$$

经过计算,可以发现,在传播过程中,极化声子波函数的演化满足:

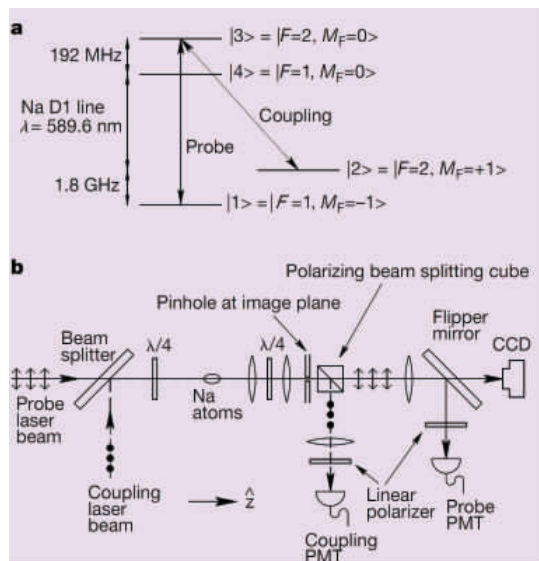
$$\left[\frac{\partial}{\partial t} + c \cos^2 \theta(t) \frac{\partial}{\partial z} \right] \hat{\Psi}(z, t) = 0$$

$$\hat{\Psi}(z, t) = \hat{\Psi}(z - c \int_0^t d\tau \cos^2 \theta(\tau), t=0)$$

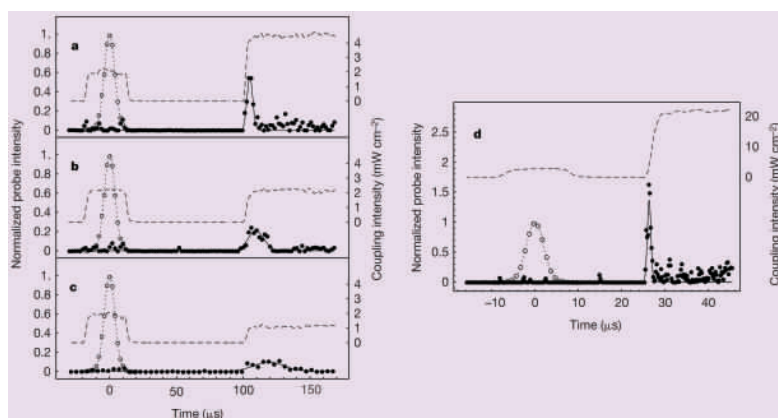
同时,极化声子的传播速度为:

$$v = v_g(t) = c \cos^2 \theta(t)$$

它是由信号光和控制光强的相对比值来决定的。当控制光完全关断时,即 $\cos\theta=0$ 信号光的传播速度为 0,其光子波函数将完全消失,全部转化为原子的旋子波函数,即信号光脉冲被存储于原子介质中(写)。之后,当控制光被逐渐打开时,即 $\cos\theta=1$ 信号光的传播速度将逐渐恢复为 c ,其旋子波函数将完全消失,全部转化为光子波函数,即信号



(a) 原子结构及实验装置示意图
(a) Schematic atomic energy level configuration and experiment setup



(b) 光脉冲存储和释放的实验结果^[9]
(b) Experiment results of light storage and release^[9]

图 5 光脉冲在冷 ^{23}Na 原子气体中的存储
Fig. 5 Light storage in cold ^{23}Na atom vapor

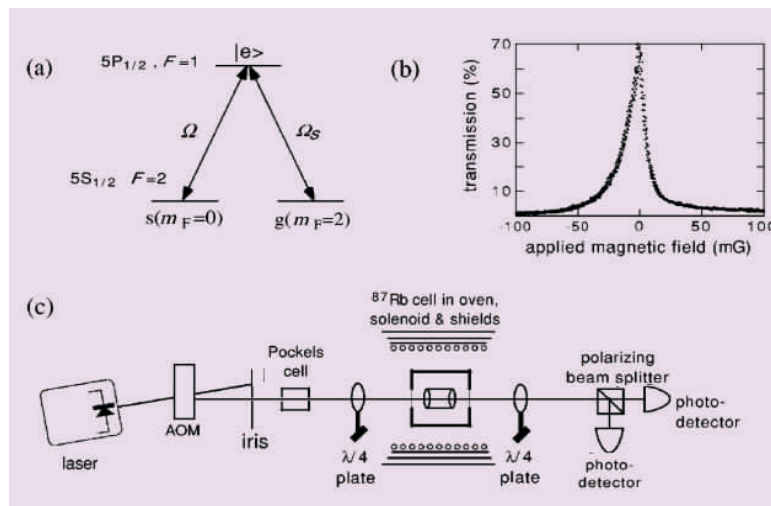
光脉冲被重新释放出来(读)(详见图 4)。

上述理论出现后不到 1 年, 2001 年, Harvard 大学的 Hau 小组就在冷原子中实现了光脉冲的存储(写)和释放(读), 存储时间达到 1 ms^[9](见图 5)。几乎同时, Harvard 大学的另一个小组, Lukin 小组在热原子中实现了光脉冲的存储和释放。存储时间达到 200 μs^[10]。其后, 2003 年, Lukin 小组进一步利用正、反两个方向传播的控制光, 形成类似光晶格的驻波光场, 实现了对信号光的相干可逆操控^[11], 使得存储时间可以更长(800 ms 左右), 操控也更加容易和稳定(详见图 6)。在气体介质中的光存储研究开展的同时, 人们也开始把光存储的希望寄托在更容易实用化的固体介质中, 目

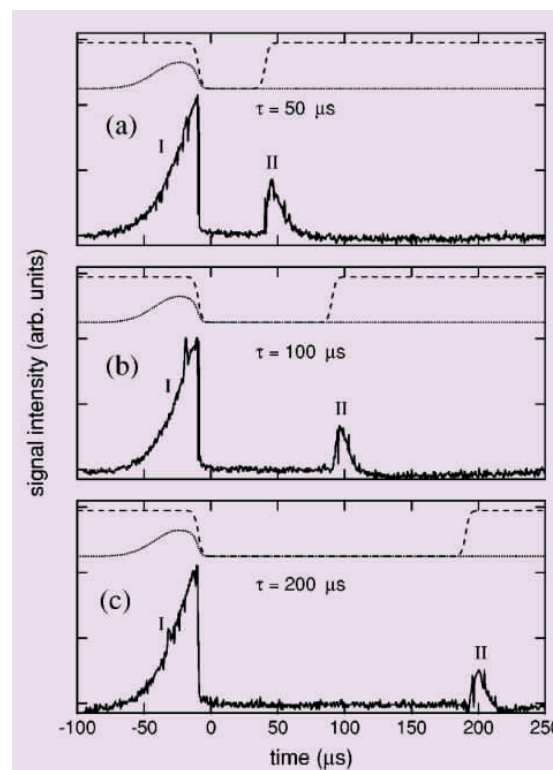
前, 人们已经在半导体^[15-18]、常温晶体^[19-20]以及冷晶体^[21]中陆续研究并实现了光脉冲的存储与释放, 以及快光和慢光的转换与操控。特别值得一提的是, 目前在冷晶体^[21]中人们已经实现了存储时间长达 1 s 的光存储。

4 国内研究进展及结语

在光存储、光脉冲群速度的有效操控(包括慢光、快光及其相互转换等), 及其实现基础——电磁感生透明及其他的量子干涉与相干效应的研究方面, 北京大学信息科学技术学院量子信息与测量教育部重点实验室的研究小组从 2000 年开始在此方



(a) 原子结构及实验装置示意图
(a) Schematic atomic energy level configuration and experiment setup



(b) 光脉冲存储和释放的实验结果^[10]
(b) Experiment results of light storage and release^[10]

图 6 光脉冲在热 ^{87}Rb 原子气体中的存储
Fig. 6 Light storage in hot ^{87}Rb atom vapor

面及相关领域也做了一系列工作。首先提出了应用 EIT 效应实现光通信中的量子存储的概念^[27-28], 并在各种多能级构型的原子介质中快光和慢光的相干控制以及铯(^{133}Cs)原子气体介质中实现 EIT 等方面开展了一系列的理论和实验工作^[29-33], 并已于 2003 年在铯(^{133}Cs)原子气体介质中实现了存储时间为 25 μs 的光存储^[34](详见图 7)。

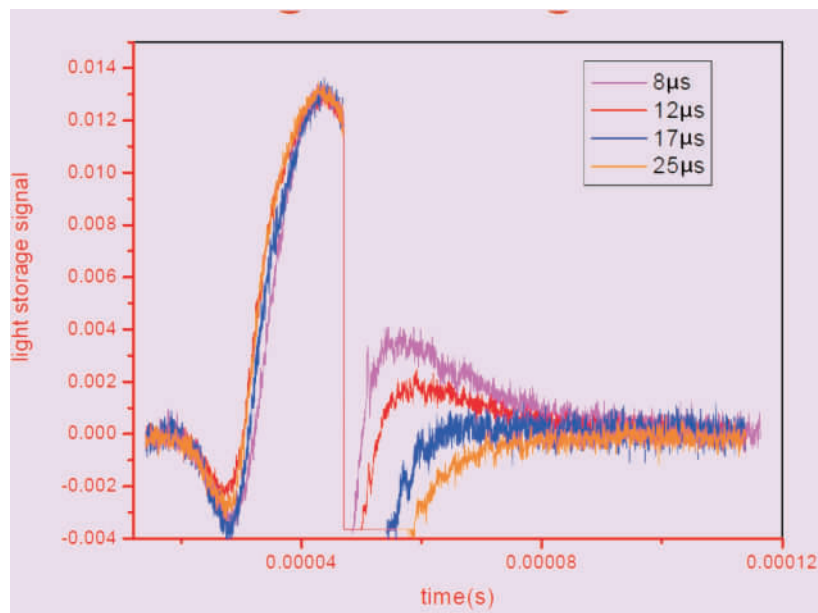


图7 室温下在 ^{133}Cs (铯) 原子气室中实现的25 μs 的光脉冲存储^[34]

Fig. 7 Light storage in ^{133}Cs atomic vapor at room temperature done by our group^[34]

需要进一步指出的是,随着量子信息科学技术的发展,除了追求基于经典的全光通信应用的光脉冲存储外,人们现在也在基于原子系统和线性光学方法的远距离量子通信方案^[35]方面进行了富有成效的探索,并利用光子-原子纠缠态,已经实现了光和原子间的量子态转移^[36],单光子的量子态的产生、传输($\sim 100\text{ m}$),以及在冷原子(^{85}Rb)系统中的存储(存储时间达到了15 μs)和释放^[36-37]。这一切使得光存储的研究已经不只限于经典的光通信,而且已经深入到最为前沿的量子通信的研究中。

本文介绍了量子光学中的一个重要研究方向——量子干涉及其在光存储方面的应用。到目前为止,人类已经实现了在冷原子气体、热原子气体以及其他介质中的光脉冲存储和释放及其可逆操控。这一切,使得全光存储器乃至全光通信的实现成为可能,或者说光存储器在原理上已获得重大的突破。然而,人类离制造出真正实用化的“光存储器”还有相当远的一段距离,主要困难集中表现在:如何进一步延长光脉冲的存储时间;光脉冲的存储保真度如何提高;光脉冲存储条件(如存储介质)如何简化,等等。这一系列的基础性问题仍需要人们作进一步的深入研究。

(致谢:感谢唐华、唐文倬、罗斌、刘钰同学认真阅读了本文并提出了许多宝贵的修改意见。)

参考文献 (References)

[1] HARRIS S E, FIELD J E, IMAMOĞLU A.

Nonlinear optical process using electromagnetically induced transparency [J]. Phys Rev Lett, 1990, 64:1107.

[2] HARRIS S E. Electromagnetically induced transparency[J]. Phys Today, 1997,50:36.

[3] BOLLER K-J, IMAMOĞLU A, HARRIS S E. Observation of electromagnetically induced transparency [J]. Phys Rev Lett, 1991,66:2593.

[4] FIELD J E, HAHN K H, HARRIS S E. Observation of electromagnetically induced transparency in collisionally broadened lead vapor [J]. Phys Rev Lett, 1991,67:3062.

[5] 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;

[6] KASH M M, SAUTENKOV V A, ZIBROV A S, et al. Ultraslow group velocity and enhanced nonlinear optical effects in a coherently driven hot atomic gas [J]. Phys Rev Lett, 1999,82:5229.

[7] MARANGOS J. Slow light in cool atoms [J]. Nature, 1999, 397: 559.

[8] FLEISCHHAUER M, LUKIN M D. Dark-state polaritons in electromagnetically induced transparency. Phys Rev Lett, 2000,84:5094.

[9] LIU CHIEN, DUTTON Z, BEHROOZI C H, et al. Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses [J]. Nature, 2001,409: 490. [10] PHILLIPS D F, FLEISCHHAUER A, MAIR A, et al. Storage of light

in atomic vapor[J]. Phys Rev Lett, 2001,86: 00783.

[11] BAJCSY M, ZIBROV A S, LUKIN M D. Stationary pulses of light in an atomic medium[J]. Nature, 2003,426: 2638.

[12] LUKIN M D, IMAMOĞLU A. Controlling photons using electromagnetically induced transparency[J]. Nature, 2001,413: 273.

[13] LUKIN M D. Colloquium: Trapping and manipulating photon states in atomic ensembles[J]. Rev Mod Phys, 2003,75:457.

[14] FLEISCHHAUER M, IMAMOĞLU A, MARANGOS J P. Electromagnetically induced transparency—optics in coherent media[J]. Rev Mod Phys, 2005,77: 633.

[15] ZIMMERMANN S, WIXFORTH A, KOTHAUS J P, et al. A Semiconductor-based photonic memory cell [J]. Science, 1999,283:1292.

[16] LUNDSTROM T, SCHOENFELD W, LEE H, et al. Exciton storage in semiconductor self-assembled quantum dots[J]. Science, 1999,286: 2312.

[17] TURUKHIN A V, SUDARSSHANAM V S, SHAHRIAR M S, et al. Observation of ultraslow and stored light pulses in a solid [J]. Phys Rev Lett, 2002,88: 023602.

[18] CHANG-HASNAIN C J, KU P C, KIM J, et al. Variable optical buffer using slow light in semiconductor nanostructures [J]. Proceedings of the IEEE, 2003,91:1884.

[19] BOYD R W, Gauthier D J. ‘Slow’ and ‘fast’ light[J]. Prog Opt, 2002,43:500.

[20] BIGELOW M S, LEPESHKIN N N, BOYD R W. Superluminal and slow light propagation in a room-temperature solid [J]. Science, 2003,301, 200.

[21] LONGDELL J J, FRAVAL E, SELLARS M J, et al. Stopped light with storage times greater than one second using electromagnetically induced transparency in a solid[J]. Phys Rev Lett, 2005,95: 063601.

[22] KASAPI A, JAIN M, YIN G Y, et al. Electromagnetically induced transparency: propagation dynamics [J]. Phys Rev Lett, 1995, 74:2447-2450

[23] SCHMIDT O, WYNANDS R, HUSSEIN Z, et al. Steep dispersion and group velocity below $c/3000$ in coherent population trapping. Phys Rev A, 1996, 53: R27-R30

[24] WANG L J, KUZMICH A, DOGARIU A. Gain-assisted superluminal light propagation[J]. Nature, 2000,406: 277-279

[25] BRILLOUIN L. Wave Propagation and Group Velocity [M]. New York: Academic, 1960

[26] KUZMICH A, DOGARIU A, WANG L J, et al. Signal velocity, causality, and quantum noise in superluminal light pulse propagation [J]. Phys Rev Lett, 2001,86: 3925 - 3929



中枢记忆性 T 细胞和效应记忆性 T 细胞

Central Memory T Cells and Effector Memory T Cells

徐 林/XU Lin,熊思东/XIONG Si-dong

复旦大学免疫生物研究所,上海医学院免疫学系,上海 200032

Institute for Immunobiology and Department of Immunology, Fudan University, Shanghai 200032, China

[摘要] 免疫记忆是适应性免疫应答的重要特征,其细胞学基础的阐明是疫苗开发和疾病预防的关键。近年来的研究表明,记忆性 T 细胞可以被进一步划分为中枢记忆性 T 细胞和外周记忆性 T 细胞 2 个亚群,它们的分布和功能迥异,在生物学特性上也不尽相同。二者关系的深入探讨对于免疫记忆的认识和疾病防治均具有重大的理论和实践意义。

[关键词] 免疫记忆;记忆性 T 细胞;免疫分子

[中图分类号] R392.11

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)12-0020-03

Abstract: Immunological memory is an important characteristic of adaptive immune response and elucidation of its cellular basis is critical for vaccine exploration and disease prevention. Recent studies have shown that memory T cells could be divided into central memory T cells and effector memory T cells, which were different in distribution, function and biological characteristics. Further investigations on their relationship may contribute to our understanding of immunological memory and the clinical therapy of tumor.

Key Words: immunological memory; memory T cells; immune molecules

CLC number: R392.11

Document code: A

Article ID: 1000-7857(2006)12-0020-03

1 引言

当前,结核病、HIV 等多种传染病广泛传播的潜在危险使得人们再次认识到疫苗开发研制的重要性。因此,作为疫苗开发研制基础的免疫记忆及其机制的研究也就越

来越受到人们的关注。现有的研究显示,在适应性免疫应答过程中,特别是在免疫效应的后期,大部分效应性 T、B 细胞发生凋亡,其中一部分分化为抗原特异的记忆细胞保存下来,在抗原的再次刺激下快速增

殖,为机体提供免疫记忆保护。T 细胞在体液免疫应答和细胞免疫应答中所起的重要作用及其高度的异质性,使得人们对其的关注远远大于 B 细胞,而对记忆性 T 细胞产生和维持机制的研究也必将有力地推动

收稿日期:2006-08-18

基金资助:上海市卫生局领军人才计划资助项目(LJ06011)

作者简介:徐 林,男,上海市医学院路 138 号复旦大学免疫生物研究所、上海医学院免疫学系,博士生,主要从事肿瘤免疫方面的研究;E-mail: xulinzhouya@163.com

熊思东(通讯作者),男,上海市医学院路 138 号复旦大学免疫生物研究所、上海医学院免疫学系,教授,主要从事新型疫苗的分

子设计方面的研究;E-mail: sidxiong@shmu.edu.cn

[27] ZHU SHUGUANG, XU ANSHI, HONG GUO, et al. Quantum memory for photonic packets [J]. J Korean Phys Soc, 2003,43: 1015-1019.

[28] ZHU SHUGUANG, XU ANSHI, YU ZHANG, et al. Reversible storage of multiple light pulses in the EIT atomic medium [J]. Chin Opt Lett, 2003,1: 680-682.

[29] FENG XIAO, GUO HONG, LI LUMING, et al. Enhanced effects of subluminal and superluminal propagation [J]. Phys Lett, 2004,A 327: 15-20.

[30] LI LUMING, PENG XIANG, LIU CHENG, et al. The transition time induced narrow linewidth of electromagnetically induced transparency in caesium vapour[J]. J Phys

B: Atomic, Molecular and Optical Physics. 2004, 37:1873-1878.

[31] LI LUMING, GUO HONG, FENG XIAO, et al. The control of light in a M-type five-level atomic system [J]. J Opt Soc Am, 2005,B 22:1309-1313 .

[32] LI LUMING, GUO HONG, FENG XIAO,et al. The control of superluminal group velocity in a system equivalent to the Y-type four-level atomic system [J]. Phys. Lett, 2005,A 334: 214-219.

[33] TANG HUA, GUO HONG. The optical properties of a V-type atomic medium driven by an additional field [J]. Phys Lett, 2006,A 357: 92.

[34] LI LUMING, PENG XIANG, LIU CHENG,

et al. Deceleration and storage of light pulse in cesium vapor[J]. J Opt B : Semi-classical Quantum Opt, 2005,7:39-42.

[35] DUAN L -M, LUKIN M D, CIRAC J I., et al.Long-distance quantum communication with atomic ensembles and linear optics [J]. Nature, 2001,414: 413.

[36] MATSUKEVICH D N, KUZMICH A. Quantum state transfer between matter and light[J]. Science 2004, 306: 663.

[37] CHANELIÈRE T, MATSUKEVICH D N, JENKINS S D, et al. Storage and retrieval of single photons transmitted between remote quantum memories [J]. Nature, 2005,438: 833

(责任编辑 胡春华)

