

第九讲 光速减慢和光缓存技术

吴重庆^{1, †} 袁保忠²

(1 北京交通大学理学院 光信息科学与技术研究所 北京 100044)

(2 北京交通大学计算机学院 信息科学研究所 北京 100044)

摘要 高速光信号的存储是光信息科学的重要分支,全光缓存器是当今高速光信号处理的瓶颈.本文介绍了全光缓存器的研究进展,着重介绍了光速减慢的原理、物理基础,以及在半导体量子点中利用电磁诱导透明效应发展全光缓存器的思路.

关键词 慢光,全光缓存器,电磁诱导透明

Slow light and all-optical buffers

WU Chong-Qing^{1, †} YUAN Bao-Zhong²

(1 Beijing Jiaotong University, School of Science, Institute of Optical Information, Beijing 100044, China)

(2 Beijing Jiaotong University, Institute of Information Science and technology, Beijing 100044, China)

Abstract The storage of optical signals with a high speed bit - rate is one of the most impotent fields of optical information technology, for which the all - optical buffer is the bottleneck. We review recent advances in the research of all - optical buffers, with emphasis on the principle of slow light and its physical bases. The development of an all - optical buffer using electromagnetically induced transparency in semiconductor quantum dots is discussed.

Keywords Slow Light, All-optical Buffer, electromagnetically induced transparency

近年来,光作为一种信息载体,已经广泛服务于人类社会.信息技术基本上可以分为信息的采集、传输、处理、存储和显示等5个方面.与电子信息技术相比,光在采集、传输以及显示技术方面,都占据了优势.光纤通信的飞速发展,没有人怀疑光通信在信息网络的主流地位.越洋通信、海底光缆已经把世界变得不再遥远.光检测技术以其高精度、高分辨率、无损、非接触等方面的优势,也正成为检测技术的高端产品.绚丽多姿的各种显示屏,把人们带进了美妙的虚拟世界.然而,在存储与处理技术方面,光信息技术却明显地落后,与前3种光信息技术明显不匹配.数十年来,人们梦寐以求的光计算机并没有如期出现.光盘因为其读写速度慢,不能作为实时处理的存储器.为了能对光信息进行存储与处理,必须先将光信号变为电信号.这不但丢失了光信号中的相位和偏振信息,而且在转换速率上,人类已经接近了光电转换速率的极限,大约为100Gb/s.这使得光信息

技术的继续发展受到明显的制约,其根本原因就是没有光存储技术.

光子是玻色子,如果不把光子转换为其他形式的能量,理论上说光子是不可能停下来的,唯一的出路是使光信号延迟一段时间,以便于对高速的光信号进行处理.比如收到一个来自于远方的文件形式的光信息,长度约为100k字节,假定线路上的传输速率为2.5Gb/s,大约40 μ s就接收完了.但是我们要在40 μ s内识别这个光信息是否是我所需要的,以便决定是否要接受它,几乎是不可能的,即使对于主频为10GHz的计算机仍然是十分苛刻的要求.如果能把这个时间延缓到毫秒量级,问题就会好解决得多,而且延迟时间的大小必须是由中央处理器

* 国家自然科学基金(批准号:60577020),国家高技术研究发展计划(批准号:2003AA122510)资助项目

2005-07-01收到初稿,2005-09-01修回

† 通讯联系人. Email: zqw@center.njtu.edu.cn

(CPU)根据处理情况可随机控制的. 实现这种可以用读写信号控制的延缓光信号时间的器件称为光缓存器. 全光缓存器是对高速光信息处理的前提.

我们知道,光信号的传输时间为 $\tau = v_g L$, 其中 L 是光路的长度, v_g 是群速度. 所以光缓存有两个思路:一个是延长传输路径的长度;另一个是减慢光的速度. 对于延长光路长度人们已经提出了许多方案,总的来说可以分为两种:一种是前向型结构;另一种是称为反馈型结构. 前向型结构由一系列的 2×2 光开关和一系列为单位长度整数倍的光纤所构成,如图 1 所示. 如果单位长度光纤的延迟时间为 τ ,当需要不同的缓存时间时(比如 7τ),则可以分别接通不同的开关(比如接通开关 K_1, K_2, K_3). 如果变更缓存时间(比如 6τ),则变更开关的状态(比如使 K_1, K_2 呈交叉连接). 这样就可以使光脉冲延迟不同的时间. 这种类型的缓存器本质上是一种延迟时间可变的延迟器. 因为它完全没有读写功能,延迟的时间(开关的接通状态)要事先预定. 反馈型缓存器和前向型不同,最基本的思路是由一个光“写”控制信号将用户的光脉冲引入到一个光纤环,并让它多次在里面绕圈子,然后由一个光“读”控制信号将它导出(参见图 2). 这种缓存器是真正意义上的随机缓存器,缓存时间不需要事先设定. 因此这种缓存器的关键问题是如何用控制信号将用户光信号引入和导出. 一个典型的例子是我们研制的双环耦合全光缓存器 DLOB(dual loop optical buffer)^[1],其中一种返回式结构如图 3 所示. 这是一种基于 3×3 光纤耦合器的双环耦合结构,它不仅存储的是光信号,而且读写操作也是在另一个光信号的控制下根据需要进行. 它利用一个 3×3 光纤耦合器的两侧端口经过光纤反馈构成双环,以左侧中间端口作为缓存器的输入、输出端口. 在右侧的光纤环中,有一个半导体光放大器 SOA,并通过波分复用光纤耦合器引入和导出控制光. 当用户输入数据流从耦合器的左侧中间端口输入时,平行排列的 3×3 耦合器将把光分配到右侧的环 1 中,形成顺时针和逆时针的两束光,其中一束光经过 SOA1 时,在写控制光 P_{wr} 的作用下产生 π 的相移. 当这两束光返回到 3×3 耦合器时,由于存在了 π 的相位差,干涉的结果将进入右侧的环 2. 如果不引入新的控制光,二者始终保持着 π 的相位差,于是光信号始终存在于两个环之中循环. 这就是存储效应. 当需要读出的时候,只需在环 1 的 SOA 对一束光再产生的 π 的相位差. 于是光脉冲就从耦合器的左侧中间端口并经过一个光环行器读出. 但

这种思路的问题是,体积比较大且稳定性差,在光纤环中绕行的圈数也有限. 随着圈数的增加,光纤传输的各种问题都显现出来,比如色散、损耗、噪声、偏振稳定性等. 因此,人们把目光转向减慢光的速度. 这样,追求极慢的光速就成为当前光信息技术的一个热点问题.

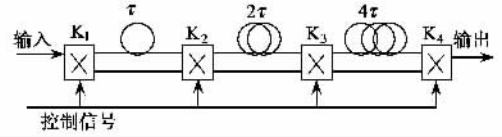


图 1 前向型光纤缓存器

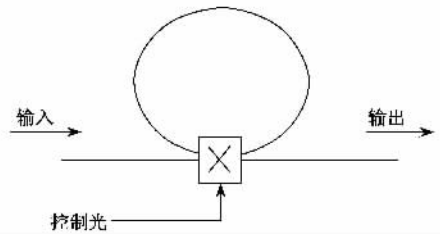


图 2 反馈型光纤缓存器

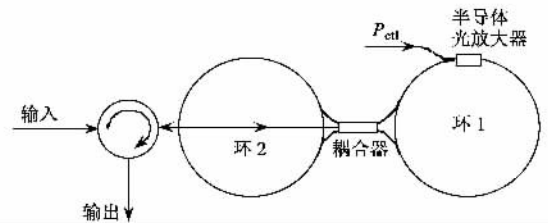


图 3 双环耦合全光缓存器(返回式)

大家知道,光在介质中的传播速度要比真空中慢. 比如,在石英玻璃中的速度大约是真空中的 $2/3$. 所以,光速减慢是自然界的一种普遍现象,并不是什么新奇的发现. 问题在于我们能将光速减慢到什么程度,和怎样控制光速为我们人类社会服务.

为了理解光速减慢的现象,让我们首先对于“什么是光速”这个古老问题作一个简单回顾.

自从人们认定光是一种电磁波以来,对于光速的研究一直没有停止过. 1676 年 11 月 22 日,丹麦天文学家 Remer O 向法国科学院提供了历史上第一个光速的观测数据 $c = 2.14 \times 10^8 \text{ m/s}$, 尽管比真实值低了 30%,但它说明人们已经认识到光的行进需要时间. 经过了 300 年的努力,1975 年 15 届国际计量大会认可了真空中光速 $c = 299792458 \text{ m/s}$. 光速

的测量促进了基础科学的发展 – 麦克斯韦就是把电磁波速度的计算结果与当时已有的 4 个光速测量数据进行比较后,于 1865 年提出“光是一种电磁波”的论断的。

虽然光速的概念是一个复杂的问题,但我们这里仅涉及相速和群速这两个概念.作为单一波长的稳态的电磁波,波的各点都在作稳态的简谐电磁振荡.波的传播理解为相位的传播,因此它只有相速度的概念.尽管每一点的电磁振荡都存在幅度(包括偏振)和相位两个参数,但相位分布是决定波动的关键因素,波动场的波动性是由相位场所决定.比如一个感应场,尽管各点的场强不同,但相位都相同,所以不是波.相位场 $\varphi(\mathbf{r})$ 是一个标量场,最关键的参数就是梯度,波矢就是相位场的负梯度,即

$$\mathbf{k} = -\nabla\varphi(\mathbf{r}), \quad (1)$$

而波矢的大小就是相移常数 $\beta = |\nabla\varphi(\mathbf{r})| = k_0 n$, 其中 k_0 是真空中波数, n 为折射率.相移常数的倒数就是相速度

$$v_p = 1/|\nabla\varphi(\mathbf{r})|. \quad (2)$$

在均匀介质中,理想的单一波长的平面波 v_p 是一个常数.由于我们没有办法测得光场的相位,所以相速度是不能直接测量的,通常是通过测定折射率 n 来间接获得均匀材料中的相速度.在真空中,相速度与频率(波长)无关,而在介质中它与频率有关.

我们要传递的光信号是一个个承载信息的光脉冲,每个光脉冲可以看成一系列光频率分量的叠加,通常被称为波包.这种光脉冲(波包)通过介质时各单色的频率分量将以不同相速传播,波包在传输过程中会发生畸变,波包的不同点以不同的速度传播,因此我们不能以“波包的传播速度”作为群速度.对于一个波包 $\phi(t)$ (电场的量纲),可定义这个波包的平均达到空间某一点的时刻为

$$t = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} t |\phi(t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} |\phi(t)|^2 dt}, \quad (3)$$

两个不同点平均达到时刻的差值,就是波包的传输时间.用这两点间的距离除以波包传输时间得到的速度才是严格意义的群速度 v_g ,不难证明 $v_g = \frac{d\omega}{d\beta}$.

对于色散介质,由于 $\beta = \frac{\omega}{c} n$,可以得到

$$\frac{d\beta}{d\omega} = \frac{1}{c} \left[n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right] \quad (4)$$

这样

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta} = \frac{c}{n \left(1 + \frac{\omega}{n} \frac{dn}{d\omega} \right)}. \quad (5)$$

定义光在真空中的速度与实际的群速度之比为减慢因子 S , 于是

$$S = \frac{c}{v_g} = n \left(1 + \frac{\omega}{n} \frac{dn}{d\omega} \right). \quad (6)$$

从公式(5)可知,要想降低光信号(光脉冲)的传播速度,可以有两个思路,一是增大折射率 n ,二是增大折射率的相对变化率 $\frac{\omega}{n} \frac{dn}{d\omega}$.由于普通介质的折射率与真空中的折射率相差不大,依靠增大折射率 n 获得光速的减慢是十分有限的,所以出路就是增大折射率的相对变化率 $\frac{\omega}{n} \frac{dn}{d\omega}$.从介质极化的微观机理我们知道,介质的折射率变化在共振频率附近最大,从而可以明显的减慢光速.但是在共振频率附近,介质极化率不仅它的实部(折射率)很大,而且其虚部也很大,这意味着介质伴随着强烈的吸收,所以关键就在于既获得很大的折射率变化率,又要使介质仍然保持透明.能够达到这一目的的就是电磁诱导透明 EIT (electromagnetically induced transparency).

电磁诱导透明技术是利用量子相干效应消除电磁波传播过程中介质影响的一种技术.电磁诱导透明的原理可以归结为无粒子数反转的光放大.根据爱因斯坦速率方程,无粒子数反转的光放大是不可能实现的.但 Kocharovskaya, Khanin 和 Harris S 等人认为,这是由于介质中同时存在受激辐射和受激吸收两个过程所致.如果受激吸收过程不存在,或者大大减少,就有可能实现无粒子数反转光放大.同样,如果减少了受激吸收,介质也就变成透明了.于是,研究者们开始探索如何实现减少受激吸收、甚至完全不吸收的方法.

1976 年,意大利比萨大学的 G·阿尔热塔等人研究了钠原子的超精细结构,它是一种在类似 Λ 形的三能级模式,并存在两个非常接近的低能级态 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$,见图 4.图 4 中, ω_c 是常规跃迁频率, ω_p 是抽运光频率.他们发现,当某个多模激光场各模之间的频率间隔和这些超精细态之间的间隔相同时,从高能级态 $|3\rangle$ 出射的荧光将大大减少.这表明钠原子介质中的每个原子的概率振幅(决定介质中所有原子的能级分布)都被“驱使”到了由两低能级 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 组成的相干叠加态上,高能级态 $|3\rangle$ 上没有概率振幅的布居.这个过程称为相干布居捕获(coherent population trapping)或简称为相干捕获

(coherent trapping). 如果原子处于相干捕获态, 这种介质就有可能对入射光场“透明”, 它既不吸收也不发射光子, 这就是电磁场诱导介质透明现象.

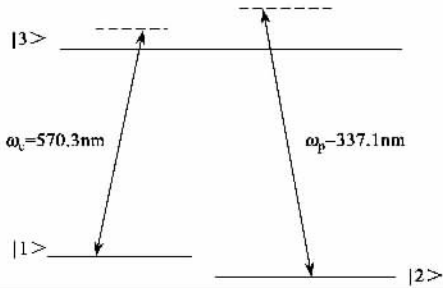


图4 三能级系统的 EIT 现象

这一设想首先于 1991 年被 Harris 等人用实验证实, 实验是在铯气中完成的^[2]. 对介质注入 $|2\rangle \rightarrow |3\rangle$ 能级跃迁的强共振抽运光, 并同时注入一个 $|1\rangle \rightarrow |3\rangle$ 能级跃迁的弱探测光, 用来探测 $|1\rangle$ 与 $|3\rangle$ 能级间的吸收谱线. 实验结果表明, 当关闭抽运光时, 探测光通过介质的透射比为 $\exp(-20)$, 而当打开抽运光时, 透射比上升为 $\exp(-1)$. 这就是著名的 EIT 现象的实验. 这表明, 当介质与一个电磁场发生耦合作用时吸收能量, 如果同时用另一电磁场探测介质的吸收谱线时, 只要这两个电磁场与原子能级之间满足双共振条件, 介质就不再吸收后一个场的能量, 而变成透明的了. 这是由于相干电磁场与原子体系之间的相互作用导致原子态之间的相干叠加, 同时原子态之间的相干叠加又显著改变了原子体系与电磁场间相互作用的结果. 产生 EIT 现象的双共振(探测吸收共振)被称作“黑色共振(dark resonance)”, 此时原子系统处于“暗态(dark state)”上, 这个态不会与电磁场发生耦合作用.

利用 EIT 现象, 进一步寻找在共振频率具有很大大折射率的相对变化率 $\frac{\omega}{n} \frac{dn}{d\omega}$ 的介质, 就可以大幅度地降低光的群速度. 在这个领域, 最具代表性的是 Hau L V 研究小组工作. 他们用冷却至接近绝对零度时的 Na 原子气作介质, 用特定波长的激光抽运, 使 Na 原子气处于一种特殊的量子相干态, 成功地提高了介质的折射率, 并使介质的非线性效应增强和探测光速减慢, 表现出非常大的光学非线性. 1999 年, Hau L V 等人, 在 Nature 杂志上发表了他们的研究成果, 将光速降低到了 17m/s ^[3]. 这个速度甚至低于汽车的速度. 开着车与光赛跑, 这几乎是一个难以想象的事实. 但这毕竟是实实在在的研究成果, 它标

志人类光技术的一个新的里程碑. 此后, 光速减慢的报道就逐渐多了起来. 2001 年以后, Kocharovskaya 和 Khanin 声称光速甚至可以减到零^[4]. 最近, 减慢和停止光也在掺镨硅酸钇晶体固体材料($\text{Pr} : \text{Y}_2\text{SiO}_5$)中实现. 所观测到的群速度为 33m/s (对应于 119km/h)的光, 通过了 3mm 长的晶体(对应的缓存时间为 0.09ms). 所观察到的光速都比基于 EIT 线宽的减速低几个数量级, 实验是在近 5K 的温度下做出的.

然而, Hau L V 等人的实验装置十分复杂, 需要工作在绝对零度附近, 没有实际应用意义. 人们目光转向寻求较高温度甚至室温的光速减慢, 由于半导体量子点 QD (quantum dot) 具备了精细的三维结构, 从而具有一系列的离散的能态. 这些离散的能态同样可以产生 EIT 现象. 由于半导体量子点 QD 的体积小, 又可以在常温下工作, 因此是一个极具竞争力的光速减慢的器件. 图 5 是 Chang - Hasnain C J 等人提出的一种量子点结构^[5].

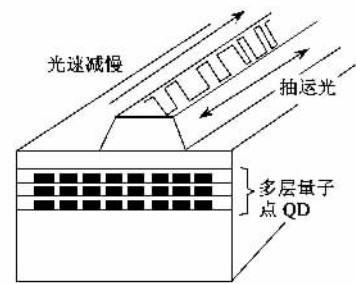


图5 慢光的量子点结构

按照 Chang - Hasnain C J 的说法, 有很多方法在半导体中构造慢光的“激活区”. 他们选择了在 InAs 中的 3 能级阶梯结构, 其中能级 $|1\rangle$ 是空穴能带的一个能级, $|2\rangle$ 与 $|3\rangle$ 能级是电子在导带的两个能级, 如图 6 所示. 尽管这可能不是产生大减慢因子的最佳系统, 但它是一个熟知的特性可描述的系统. 在这里量子点被描述为一个量子盘, 半径 a 为 9nm , 高 h 为 3.5nm . 通过解薛定谔方程可以得到有效材料近似下量子盘的波函数, 然后进一步通过求解密度矩阵, 可以得到介质的复介电常数. 而速度减慢因子为 $S = \text{Re} \sqrt{\epsilon} + \omega \frac{d\text{Re} \sqrt{\epsilon}}{d\omega}$. 图 7—10 是计算的结果, 图中信号的频率失调 Δ_s 定义为 $\Delta_s = \omega - \omega_s$, 其中 ω_s 是 $|1\rangle$ 到 $|2\rangle$ 跃迁的频率(波长, $1.36\mu\text{m}$), 单位为 meV . 图 7 是材料的吸收损耗(介电常数的虚部)随着信号频率失调的变化. 由图 7 可见, 曲线呈

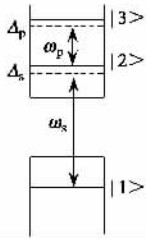


图6 量子点的能级结构

马鞍形,在鞍形的中部吸收损耗很低,表明频率失调在一定的范围内,材料是“透明”的.在EIT透明范围两边,存在两个“边峰”.随着注入抽运光强度的增大,透明范围增大,而且透光系数接近于1.这就是电磁诱导透明现象.图8是折射率(介电常数的实部)随着信号频率失调的变化.由图8可见,在对应于图7靠近电磁诱导透明边峰的区域,折射率随频率失调呈现为递减函数.这表明在这个范围内,光的群速度将减慢.图9是由图8得到的折射率变化率(群速度)随频率失调的变化关系.从图8和图9可以看出,频率失调大约在0.18meV范围内(对应于43GHz),它的折射率变化是负值.图10是减慢因子随抽运光功率的变化曲线.随着抽运光强度增加,起初减慢因子是增加的.由于两个边峰的存在, $\frac{d\text{Re}\sqrt{\epsilon}}{d\omega}$ 从负值变到正值.抽运光强度继续增加,则两个边峰越离越远,且减慢因子下降.对应于 3×10^{-6} , 9×10^{-3} 和 $2\text{MW}/\text{cm}^2$ 3种不同情况的抽运功率密度,减慢因子的最大值分别为 10^7 , 3.4×10^4 和51.

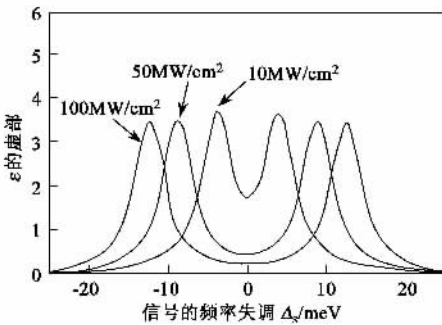


图7 介电常数虚部系数与频率失调的关系

Chang - Hasnain C J 等人的理论工作表明,利用半导体量子点的精细结构,同样可以产生EIT现象,从而制造出体积小、常温下工作的集成度高的全光缓存器.这个理论结果,燃起了人们对于集成的全光缓存器的新希望,而由此引发的光域的信号处理技术(也称为全光信号处理技术),也正在孕育之

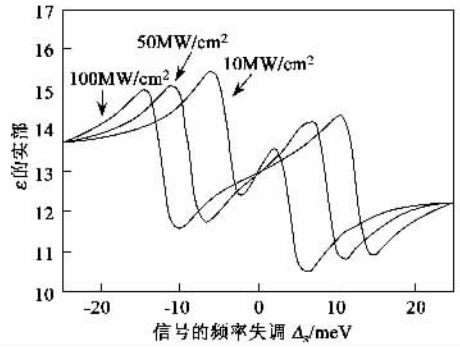


图8 介电常数实部与频率失调的关系

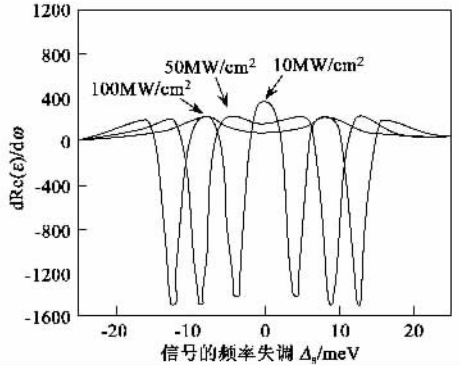


图9 折射率变化与频率失调的关系

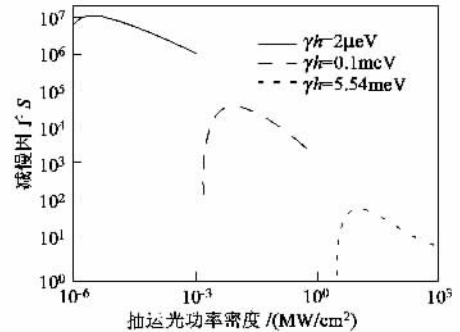


图10 光速减慢因子

中,目前光信息科学界正密切关注着它的进展.虽然,实际的实验成果还没有公布,但通过研究者的不懈努力,实现可控制的全光缓存已经是指日可待了.

参考文献

[1] Wu C , Liu A *et al.* " Dual Loop Optical Buffer " proceedings of OECC/COIN 2004. Jul 12—16 2004
 [2] Bollr K J , Imamoglu A , Harris S E. Phys. Rev. Lett. , 1991 66 2593
 [3] Hau I L , Harris S E. Nature , 1999 397 594
 [4] Kocharovskaya O *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2001 , 86(4) 628
 [5] Chang - Hasnan C J *et al.* Proceedings of the IEEE , 2003 91 (11) 1884