

光能够走多慢？ ——极慢光速研究若干进展

沈京玲 孙立立

戴建华

(首都师范大学物理系 北京 100037)

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

摘要 首先介绍了光波群速度、介质的色散性质、电磁感应透明技术等基本概念和理论. 对国外极慢光速研究的进展情况做了概括性介绍, 并就几个主要实验及结果进行了较为详细的描述, 其中包括 L. V. Hau 小组于 1999 年完成的“光速每秒 17m”实验和 D. F. Phillips 小组于 2001 年发表的“在原子气中储存光”实验. 文章最后就极慢光速研究在科学和应用两方面的意义及价值进行了讨论.

关键词 极慢光速, 正常色散, 电磁感应透明, 光存储

WHAT IS THE SLOWEST GROUP VELOCITY OF LIGHT ? ——AN INTRODUCTION TO DEVELOPMENTS OF RESEARCH ON ULTRASLOW GROUP VELOCITY

SHEN Jing-Ling SUN Li-Li

(Physics Department, Capital Normal University, Beijing 100037, China)

DAI Jian-Hua

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The fundamental concepts of the phase velocity and group velocity of light, the dispersion property of a medium and electromagnetically induced transparency are discussed. The developments of research on ultraslow light are reviewed and two experiments, by Hau in 1999 and Phillips in 2001, are described in detail. To conclude we discuss the significance of such research for science and applications.

Key words ultraslow group velocity, normal dispersion, electromagnetically induced transparency, storage of light

1 引言

1676 年 11 月 22 日, 丹麦天文学家 Olaus Roemer 向法国科学院提供了历史上第一个光速的观测数据: $c = 2.14 \times 10^8$ 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 年第 15 届国际计量大会认可了真空中光速 $c = 299792458$ m/s. 光速的测量促进了基础科学的发展. 麦克斯韦(J. C. Maxwell)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.

人类在测量真空中的光速及认识光的本质的同时, 也在研究光在介质中的传播特性. 光在介质中的速度 v 与介质折射率 n 有关, 而折射率通常与光频

率 ω 有关. 对单色光而言, 整个光波以同一的速度传播: $v = c/n = \omega/k$. 这一速度是波的等位相面的传播速度, 称为相速度 v_p ; 对非单色光而言, 由傅里叶分析我们知道, 可以将任何非单色光或光脉冲展开成诸多不同频率的单色平面波的叠加. 在色散介质中, 这诸多单色平面波有各不相同的相速 $v_p(\omega)$, 整个光脉冲的速度用群速 v_g 表示. 群速 v_g 定义为: $v_g = d\omega/dk$. 由于实际中严格单色平面波是不存在的, 所以谈及的光速全部指光波群速 v_g .

进一步的光速研究无非从两方面考虑: 一是使光走得更快, 二是使光走得再慢. 前者称为超光速研究, 后者就是本文将介绍的极慢光速研究.

近两年来, 极慢光速的研究工作取得了一些重

* 2001-04-26 收到初稿, 2001-07-25 修回

要结果. 其中以 1999 年 2 月《自然》(Nature)发表的“Light speed reduction to 17 metres per second in a ultra-cold atomic gas”最为著名^[1]. L. V. Hau 等人在超冷钠原子气中, 利用电磁感应透明(EIT)技术得到了 $v_g = 17\text{m/s}$ 的光脉冲群速度. 每秒 17m, 这恰是一部最先进的高速电梯所能达到的最高速度. 进入 2001 年以后, 极慢光速研究又有新突破. 《物理评论快报》(Phys. Rev. Lett.) 连续两篇文章表明^[2,3], 科学家目前可以把光速减为零, 也就是说可以使光停止并储存起来.

2 如何使光速减慢

由光群速的定义 $v_g = d\omega/dk$ 可以证明光脉冲的群速与折射率的关系为 $v_g = \frac{c}{n(\omega) + \omega \frac{dn}{d\omega}}$, 其中

的 $n(\omega)$ 是介质折射率, 是光频率 ω 的函数. 由上式可以看出, 当分母很大, v_g 可以很小. 而在分母的两项中, 第一项接近 1, 第二项由折射率随频率的变化率决定. 介质折射率随频率而变表明介质具有的色散性质. 频率越高, 折射率越大, 是正常色散 ($dn/d\omega > 0$), 频率越高, 折射率越小, 是反常色散 ($dn/d\omega < 0$). 为了获得极慢光速 ($v_g \ll c$), 则要求 $\omega dn/d\omega \gg 1$. 所以, 获得折射率随光波频率变化很大的正常色散介质是出现极慢光速的关键, 这意味着在折射率对频率的坐标系中, 要有一段很陡的曲线. 即在很小频率范围内折射率变化很大. 由介质极化率微观机制不难看出, 在与介质发生共振的频率附近, 可以得到斜率极大的 $n - \omega$ 曲线. 但此时极化率的虚部, 即代表介质的吸收部分, 也同时取极大值. 这意味着光脉冲此时将被强烈吸收, 以至于无法穿过介质. 因而真正实现超光速实验还用到了—项关键技术, 即所谓电磁感应透明技术(EIT).

电磁感应透明技术是 20 世纪 90 年代初由 Stanford 大学的 S. E. Harris 教授发展起来的利用量子相干效应消除电磁波传播过程中介质影响的技术^[4]. 一旦介质的影响被消除, 电磁波在介质中的传播就如同在真空中传播, 使原来透射率近乎为零的介质成为透明介质. 在一个三能级原子系统中, $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 是两个较为接近的低能级. EIT 的关键是除了需要探测光 ω_p (其频率与 $|2\rangle$ 和 $|3\rangle$ 态接近共振) 外, 还需要再加一束耦合光 ω_c , 其频率与 $|2\rangle$ 和 $|3\rangle$ 态发生共振 (图 1). 由于量子相干效应, 探测光与耦合光

共同作用的结果, 使原子的两个超精细能级 $|1\rangle$ 与 $|2\rangle$ 相互耦合, 形成 $|1\rangle$ 与 $|2\rangle$ 的相干叠合. 这样使探测光偏离了原子的共振频率, 即出现所谓“相干布居囚禁”, $|3\rangle$ 态成为布居数为零的死态, 从而吸收减小, 透射率大大提高 ($> 60\%$) [图 2(a)]. 不但如此, 由于这种量子相干效应只发生在探测光很小的频率范围内, 其频率宽度由耦合光强决定, 所以在零失谐频率附近很窄范围内出现斜率极大的正常色散, 从而可导致光的群速度大大减小 [图 2(b)].

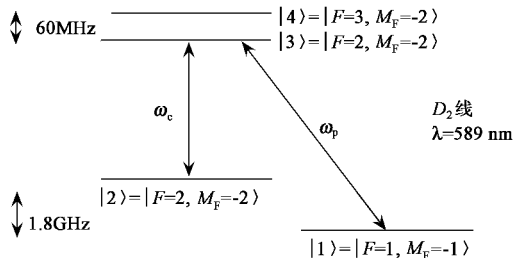


图 1 原子能级图
(ω_p 探测光频, ω_c 耦合光频)

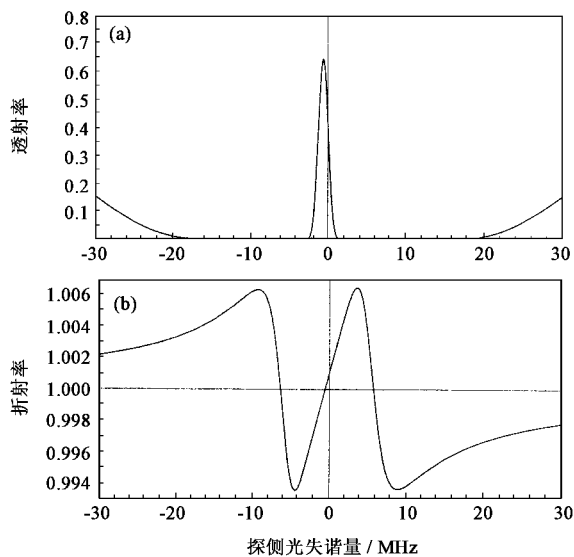


图 2 (a) 探测光透射率随频率失谐量的变化;
(b) 折射率随频率失谐量的变化

3 L. V. Hau 小组的实验简介

美国哈佛大学的丹麦裔女科学家 L. V. Hau 等人实施的光脉冲延迟实验所用介质是被冷却到 nK 量级温度的钠原子气体. 气体并不是放在容器中, 而是使用磁光势阱约束, 使之形成长约几百微米、宽约几十微米的椭圆状气体云 (如图 3). 利用激光冷却等技术, 使钠原子气体降到极低温度. 在这样的温度

下,每个原子的物理状态接近一致,即几乎所有原子处于单一的原子态即基态 $|1\rangle$ 上,在另外的两个超精细原子态 $|2\rangle$ 和 $|3\rangle$ 上,没有原子(图1)。利用 EIT 技术,即利用耦合光 ω_c 使得探测光 ω_p 在零失谐频率附近很窄的范围内出现斜率极大的正常色散,从而导致光群速大大减小。

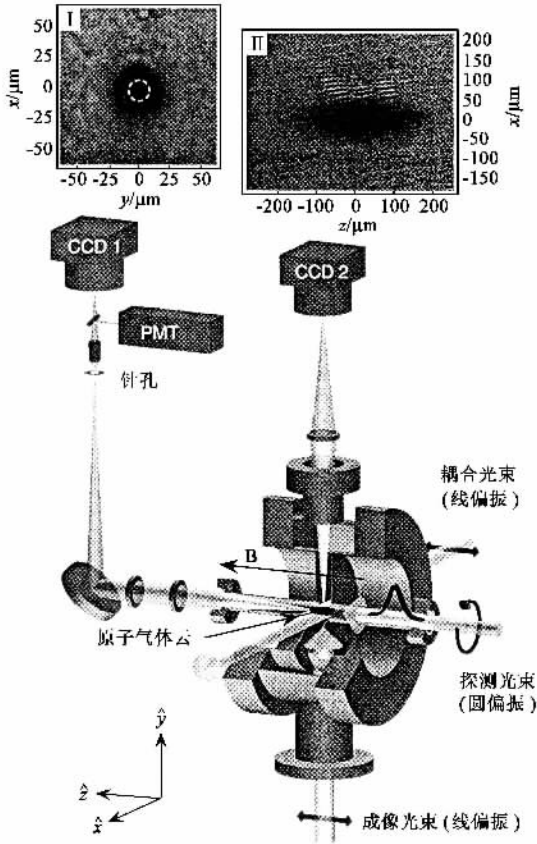


图3 实验装置及钠原子蒸汽相片

利用上述实验装置及实验技术, L. V. Hau 等人取得了如下实验结果 (1)温度为 450nK 时,探测光脉冲经过长为 $229 \pm 3\mu\text{m}$ 的钠原子气介质比经过同样长度的真空(空气)介质的参考光脉冲延迟 $7.05 \pm 0.05\mu\text{s}$ (图4),与此相应的光速应为 $v_g = 32.5 \pm 0.5\text{m/s}$ (2)测出光脉冲群速与介质温度的关系,得出随温度的降低群速减小,而且耦合光光强越低,群速越小的结论。当介质温度为 50nK、耦合光光强为 $12\text{mW}/\text{cm}^2$ 时,光脉冲群速为 17m/s (3)出现极强的非线性光学效应,其三阶非线性系数是一般情况的 100 万倍。

4 其他极慢光速实验

在 L. V. Hau 等人的实验之后,1999 年 6 月,

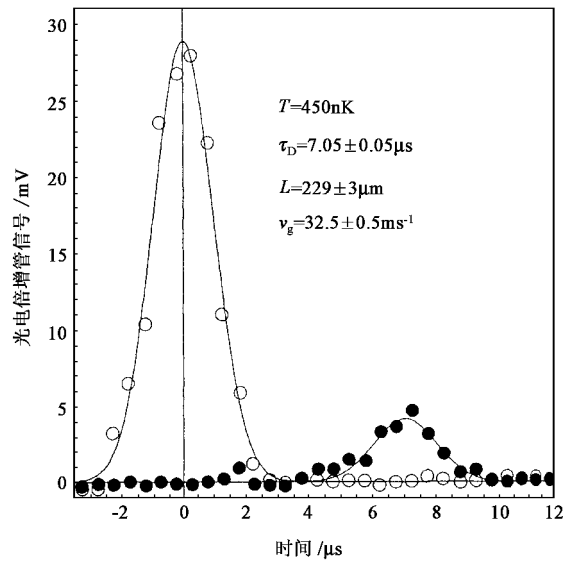


图4 光脉冲延迟实验测量结果
(空心点表示参考光脉冲,实心点表示探测光脉冲)

Michael M. Kash 小组在热的铷原子蒸汽($\approx 360\text{K}$)中也获得了 $v_g \approx 90\text{m/s}$ 的较慢光速,相应的脉冲群延迟为 0.26ms ^[5]。实验中仍然使用 EIT 技术,但其中的耦合光与探测光平行传播。Michael M. Kash 等人在论文中指出,冷原子与热原子的区别在于多普勒加宽的大小。而在热原子气体中,当耦合光光强足够强时,多普勒效应并不重要。计算表明,在现有实验条件下,光群速可达到 10m/s ,这是以通过增加激光束半径来减小原子的两个低能级之间的相干衰变率为先决条件的。此外,Michael M. Kash 小组的实验也证实了强非线性光学效应的存在。出现极强光学四波混频过程,新的光频为 $\omega_N = 2\omega_c - \omega_p$,光信号强度接近探测信号强度的 40%(图5),这在平常条件下根本不可能。

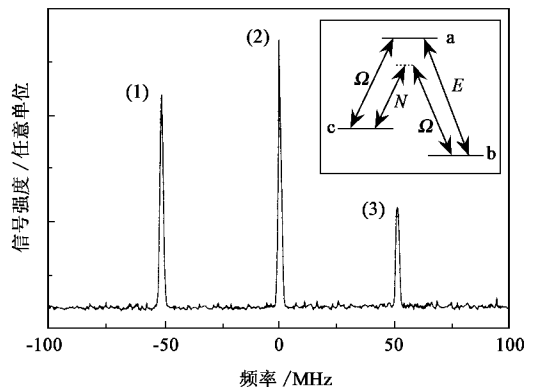


图5 出现强非线性光学过程
[峰(1)正比于探测光场振幅,峰(3)正比于新产生的光场振幅]

再有,1999年8月,D. Budker 等人对偏振光传播通过铷蒸气的动力学进行了研究,其中铷蒸汽装在带有反弛豫墙衣包裹的容器里.所观察到的光传播的动力学性质与电磁感应透明中的光传播性质相似.实验得出的群延迟为 13ms,相应的群速为 $8\text{m/s}^{[6]}$.

在 2000 年里,又有多篇相关文章发表,大多是利用 EIT 技术实现慢光速,惟有 S. H. Lin 等人的工作与众不同.他们观察并研究了连续激光通过写有一维体位相光栅的铌酸锂 (LiNbO_3) 光折变晶体后的群速减小现象^[7].实验过程大体如下:用有一定夹角的两束激光在晶体中建立一维体位相光栅;用声光调制器将氩离子激光器发出的 514.5nm 的连续激光调制为光强正弦变化的时间信号;使探测光和参考光同时进入示波器,比较两正弦变化的波形的先后次序,从而测出探测光延迟 590ps,因此有 $v_g = c/7.5$.尽管所得群速减小并不很多,但这是常温下在固态介质中得到的,具有一定意义.

5 使光停下并储存起来

2001 年 1 月,Phys. Rev. Lett. 连续两期刊发了关于光速为零的文章.一篇是 O. Kocharovskaya 等人的“Stopping Light via Hot Atoms”^[2].他们证明通过电磁感应透明技术,可以在相干驱动多普勒加宽原子介质中使光脉冲完全停下来,甚至使其群速度为负值.其基本原理是利用折射率的空间色散性质,即 n 与波数 k 有关,进而使其对群速的贡献是负的.这与最近的几个超慢光速实验既有联系,又有区别.后者是利用折射率对时间(频率)的高色散性质实现的.

另一篇是 D. F. Phillips 等人的“Storage of Light in Atomic Vapor”一文^[3].文中报道了如何使光脉冲减速并将其约束在铷原子蒸汽中(约束时间已达 0.5ms).首先将光脉冲在空间压缩 5 个数量级,即将光脉冲群速度减为千米量级,然后通过控制光速的加入和撤出来控制信号光的停和走,就是光的存储和释放.图 6 是实验测量结果(a)(b)(c)分别表示不同的存储时间,I 表示信号脉冲在没有得到控制光命令时已有一半从介质中出来,而 II 是经过储存一段时间后才释放出的信号脉冲的另一半.这项储存光的关键是将光速减慢为零,致使光的相干激发能够嵌入铷蒸汽的塞曼(自旋)相干态中.这种储存光的方法的最大特点是不破坏原来光脉冲的特征,这就使信号脉冲的位相和量子态得以保存.

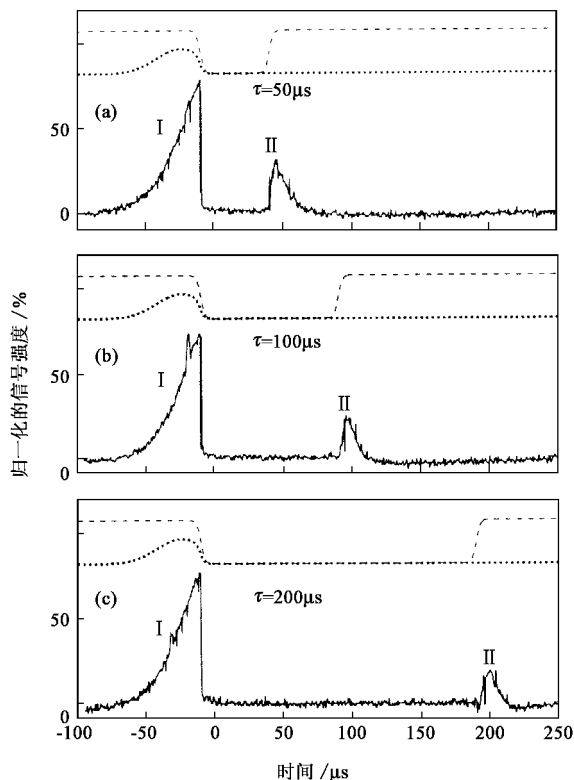


图 6 铷原子蒸汽中光脉冲被存储的实验结果

(a)(b)和(c)分别对应的存储时间为 50 μs , 100 μs 和 200 μs

6 极慢光速研究的意义

极慢光速研究的意义可以从两方面来讨论.一是其科学意义,二是其应用价值.从了解光的本质、认识光与电磁波的联系、测量光的速度,到改变光的速度、控制光的传播行为,反映了人类对客观世界的认识的逐步深化.这不但体现了人类驾驭自然的能力,而且反映出人类已经较为深入地了解了光与物质相互作用的本质和规律.利用这些规律能够更好地为人类服务.

极慢光速下所表现出的介质极强的非线性光学效应为非线性光学找到了新的优良介质,为非线性光学研究工作开辟了新的方向.光与物质相互作用的规律告诉我们,非线性相互作用的阶次每提高一阶,非线性效应的信号将减弱几个数量级.因此,一般地说,三阶或三阶以上非线性光学信号是极弱的.这不但给探测工作带来了许多困难,而且限制和影响了高阶非线性效应的应用.如果一下子可以将非线性系数提高几个数量级,那么从探测和应用角度来讲,都极为有利,将带来不可估量的应用前景.此外,可以保存信号脉冲的位相和使量子态无破坏性

的光存储技术, 还是实现远程量子系统相干通信的颇具竞争力的候选者. 有关光速研究的新的结果还将不断涌现, 我们可拭目以待.

参 考 文 献

[1] Hau L V, Harris S E, Dutton Z *et al.* Nature, 1999, 397 :594

[2] Kocharovskaya Olga *et al.* Phys. Rev. Lett. 2001, 86 :628
[3] Phillips D F *et al.* Phys. Rev. Lett. 2001, 86 :783
[4] Harris S E. Phys. Today, 1997, 50(7) :36
[5] Kash M M *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1999, 82 :5229
[6] Budker D *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1999, 83 :1767
[7] Lin S H, Hsu K Y, Yeh Pochi. Opt. Lett. 2000, 25 :1582

· 前沿和动态 ·

高温 STM 研究氧化物表面结构取得重要进展

在各种扫描探针显微术(SPM)中,扫描隧道显微术(STM)的分辨率最高,利用STM已经在半导体和金属表面结构的研究中取得许多重要的结果.但通常的STM不能用于不导电的氧化物表面结构的研究,从而使氧化物表面结构的研究远远落后于半导体和金属表面结构的研究^[1].

近几年来英国牛津大学 Castell 等^[2-4]发展了高温STM,使氧化物样品的温度可以达到200—500℃,此时氧化物有足够的导电性,从而可以得到原子级分辨率的STM像,取得了氧化物表面结构研究的重要进展.

用STM研究表面结构时,样品上的偏压可正可负.加正偏压时隧道电流从金属针尖进入氧化物导带的空态(empty state),得到空态STM像.加负偏压时隧道电流从氧化物导带的满态(filled state)进入金属针尖,得到满态STM像.

Castell 等将NiO和CoO加热到约200℃,分别在偏压2.7V,隧道电流0.57nA和偏压1.3V,隧道电流1.0nA条件下得到了NiO(001)和CoO(001)的无再构的(1×1)空态STM像.这两个氧化物都具有NaCl结构.在它们的(001)表面上观察到001方向的单原子台阶,但台面上的缺陷密度很小.从高度的定量数据得出以下的有趣现象^[4]:NiO(001)的表面起伏(约0.02nm)比CoO(001)的表面起伏(约0.001nm)大一个量级.为了解释这一现象,用包含Hubbard U项的局域自旋密度近似对表面电子结构进行了从头计算,计算说明两种氧化物的未占据d轨道的对称性的差别是上述表面起伏相差悬殊的主要来源.计算还显示,空态STM像的亮点是金属离子.

STM像还显示出NiO(001)上的点缺陷,偏压1.2V,隧道电流1.0nA的像中点缺陷的亮度特别大,

4个次近邻金属离子也明显亮于其他金属离子.偏压-1.3V,隧道电流1.0nA的像中点缺陷为暗色.论文作者认为,表面点缺陷可能是NiO中的掺杂Li原子.此外,在001方向台阶上也发现类似的缺陷图形.

Muggelberg 等^[5]在500℃研究了具有萤石(CaF₂)结构的UO₂(001)和(111)表面.后者具有三重旋转对称性,在110方向的周期是0.39nm.仅仅根据空态STM像无法判定亮点是U离子还是O离子.从表面原子结构看,顶层原子是O离子,往下0.07nm处是U离子,但上述从头计算得出U的表面电子态向真空突出得更显著,因此空态STM像中的亮点是U离子.从STM像可以看出,表面上除了单个点缺陷,还有双点缺陷和三点缺陷.

UO₂(001)的理想表面由一种离子组成,显示为极性表面.为了减小表面偶极,有人认为表面的O离子应减少一半.STM像支持这种观点.使人惊奇的是UO₂(001)表面的STM像(偏压0.9V,隧道电流1.0nA)上出现nm尺寸的条状畴,畴界看来由不同的{111}小面组成,这样可以降低总表面能.作者还用低电压SEM观察到UO₂(111)上的规则大凹坑由不同的{111}和{100}面组成,这可以作为条状畴界微观小面化的旁证.

参 考 文 献

[1] Henrich V A, Cox P A. The Surface Science of Metal Oxides. Cambridge UK :Cambridge Univ. Press, 1994
[2] Castell M R *et al.* Phys. Rev. , 1997, B55 :7859
[3] Castell M R *et al.* Phys. Rev. , 1997, B59 :7342
[4] Castell M R *et al.* Microscopy and Microanalysis, 2000, 6 :324
[5] Muggelberg C *et al.* Appl. Surf. Sci. , 1999, 142 :124
(中国科学技术大学基础物理中心 吴自勤)