

慢光速研究的理论与实现

—— 大学物理教学案例

戴国民 周雨青

(东南大学物理系 江苏 南京 211189)

(收稿日期:2015-12-21)

摘要:大学物理教学中有相速度和群速度的介绍,但往往止步于对它们的定义和表达式推导.如果此时适当地拓展它们的应用,会起到事半功倍的作用.本文介绍慢光速研究的理论和实现途径,目的:一为教学提供有价值的案例,二为科普.

关键词:慢光速 理论 实现 教学 科普

“光”古往今来被科学家关注,伽利略、牛顿、麦克斯韦和爱因斯坦等分别对光的本质、速度和诸多理论进行过探讨,目前成熟的理论认为,光是有限波段的电磁波,其在真空中的传播速度为

$$c = 2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

并与发光物体的运动或选择的参考系运动无关,且为运动物体或信息传播速度的最高速度.光速有相速度和群速度之分.教学中我们知道,相速度就是波阵面传播速度,即等相位点传播的速度,可以由波函数的等相位方程式

$$kr - \omega t = \text{常数}$$

简单求得

$$v_p = \frac{dr}{dt} = \frac{\omega}{k}$$

群速度是有限波列的波包中心传播的速度,即叠加简谐波复合相位的传播速度,可以由两个简谐波的叠加波的包络函数的相位方程式

$$\frac{k_2 - k_1}{2}r - \frac{\omega_2 - \omega_1}{2}t = \frac{\Delta k}{2}r - \frac{\Delta \omega}{2}t = \text{常数}$$

近似得到

$$v_g = \frac{dr}{dt} \approx \frac{\Delta k}{\Delta \omega} = \frac{d\omega}{dk}$$

其中 ω 为光的角频率, k 为光的波数.群速度是光携物质或信息的实际传播速度.真空中 $v_g = v_p = c$, 介质中光的相速度

$$v_p = \frac{c}{n}$$

群速度

$$v_g = \frac{c}{n + \omega \frac{dn}{d\omega}}$$

其中 n 为介质折射率,相速度只对真空或介质中的单一频率的光有意义,它表示相位移动的速度;群速度是各种频率的复合“波包”中心移动的速度,在介质中才特别有意义.本文介绍的“慢光速”就是指群速度在介质中极慢于真空光速的情况.

1 慢光速理论和实现途径

1.1 慢光速理论基础

在群速度 $v_g = \frac{c}{n + \omega \frac{dn}{d\omega}}$ 式子中可以看出,当色

散关系 $n(\omega)$ 曲线中的斜率 $\frac{dn}{d\omega}$ 为正,且足够大时,可以获得极慢光速,当然结论有意义的前提是光波脉冲形状,亦即能量,在传播过程中基本保持不变,也就是说,要实现在介质中光速极慢,就必须有正的大 $\frac{dn}{d\omega}$ 值和介质对光的小吸收或不吸收.从上述公式可以看出,要有大的慢速效应主要取决于色散关系.

色散是光与介质相互作用的结果.一方面,色散效应大,波包离散性就强,波形变化就会大;另一方面,正常色散的 $\frac{dn}{d\omega}$ 是连续变化的平庸值,不会引起太大的光速变化,只有在色散出现突然变化时才有很大的 $\frac{dn}{d\omega}$ 值,如图 1 所示.

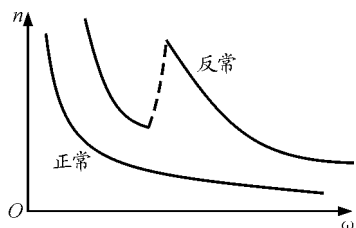


图1 色散曲线图

那么就要处理好这两个方面的关系才能得到有效的慢光速效应。

(1) 结构色散

固体介质材料一般具有能带结构(带状),价电子可以对满足一定波长条件的光吸收,从而越过带隙(禁带与导带之间的能量间隙)跃迁至导带,其强烈吸收(又称共振吸收)的条件为入射光的波长与带隙对应的长度(称特征长度)相等,吸收光谱线中才出现吸收峰值,如图2所示。

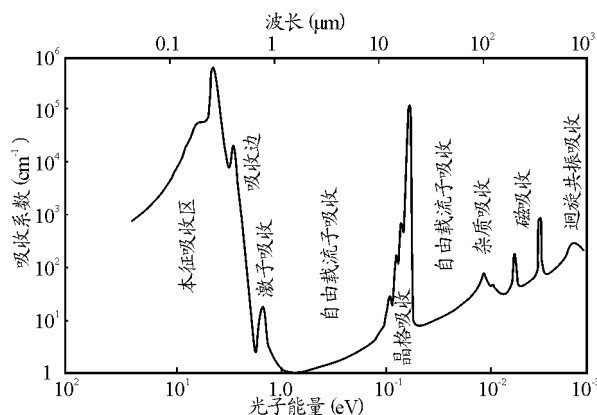


图2 半导体吸收谱线

而当入射光波长处于带边(略大于特征长度)时价电子的吸收会陡然变小,此时带边的折射率是反常的,这种在带边处的色散关系称结构色散。

在这种结构色散中,介质对脉冲光既有小的吸收,又有陡峭的正色散斜率,导致超慢光速的存在。这种小吸收的隧穿效应可以用经典方法模拟实现。取两等厚的平行玻璃板,中间相隔等厚的空气膜,当入射角大于全内反射角时,折射到空气膜中的光按理说应该成为消失波衰减(全反射现象),但是若调整空气膜厚度,使距离小于波长(使用微波),却发现光波通过空气膜在另一玻璃中传播,这个实验最早是20世纪20年代 Bose. J. C 首先实现的。

(2) 材料色散

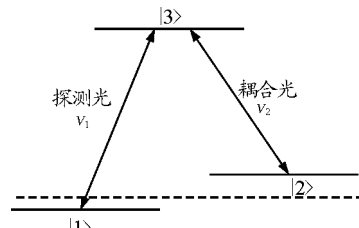
介质材料总是有原子或分子组成,原子或分子有能级结构(线状),当入射光频率和原子或分子的

能级跃迁频率相等时,色散也会出现很大的 $\frac{dn}{d\omega}$ 值,这种色散关系称为材料色散。但是理论与实验都表明,在材料色散中色散率与吸收率是同一数量级的,这表明如果无法排除吸收的影响,就无法观察到慢光速现象。为此需要发展一种技术来实现无吸收的材料色散。

应该指出,自20世纪90年代末,Hau和Harris在Nature上发表文章称,用EIT技术可实现在超低温Na原子中的光速达17 m/s的超慢光速以来,已有非常成熟的理论技术可以实现超慢光速,比如,SBS技术——受激布里渊散射,介质里形成光栅使光速变慢;CPO——相干布居震荡,使得布居在两个能态之间震荡产生光谱烧孔而产生慢光等。本文只着重介绍第一种,也是最为成熟的EIT技术。

(3) 电磁诱导透明 EIT(electromagnetically induced transparency)

电磁诱导透明是利用量子相干效应消除电磁波传播过程中受介质影响的技术。该技术原理可以归结为无粒子数反转下的光放大或光透明。我们知道,材料中的原子或分子在热效应作用下部分原子或分子可以处于激发态,但绝大多数处于基态。当共振光入射时会引起受激辐射和受激吸收两个过程同时发生,但由于处于基态的原子或分子数多于激发态的,所以光无法放大。若受激吸收过程不存在,或者大大减少,就能实现无粒子数反转下的光放大,也就是实现无吸收或介质透明。20世纪90年代初,美国斯坦福大学的S. E. Harris教授利用量子相干效应发展了一种三能级“暗态”系统有效地实现了无吸收光的透明传播,如图3是三能级系统原子能级图。

图3 Λ 型原子三能级图

该三能级系统中的 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 状态的能级差很小,比如是钠原子的超精细能级,当两束共振光 ν_1 (频率对应 $|1\rangle$ 和 $|3\rangle$ 能级跃迁)、 ν_2 (频率对应 $|2\rangle$ 和 $|3\rangle$ 能级跃迁),且频率相差正好为超精细能

级分裂值,分别作用在该三能级原子系统时,原子都将吸收这两束共振光;可是理论分析知道,当这两束光同时作用在这个原子系统上,状态 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 就会相互耦合,形成新的状态 $|\psi\rangle = \cos\theta|1\rangle - \sin\theta|2\rangle$, θ 称混合角,这个态不含 $|3\rangle$ 态称“暗态”,暗态的能级将偏离原状态 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 各自的能级,见图3中的虚线,此时两束光都偏离共振状态,称失谐(用 $\Delta = \nu - \nu_{1(2)}$ 表示失谐度),原子就不会吸收这两束光了.如果图3中的 ν_2 光作为 $|2\rangle$ 和 $|3\rangle$ 能级的强共振耦合光(又称控制光)、 ν_1 光作为检测 $|1\rangle$ 和 $|3\rangle$ 能级间的光谱吸收线的弱探测光,实验表明,当关闭耦合光,探测光几乎完全被这种介质吸收;当同时加注耦合光,探测光就几乎完全通过介质;然后再一次撤除耦合光,探测光又一次消失.这种由耦合光“诱导”探测光的技术称“电磁诱导透明”.探测光在耦合光的诱导下的失谐只发生在超精细能级分裂之间,频率变化范围很小(由耦合光强度决定).

课程中我们知道,折射率 n 是复数,实部为折射(对应色散),虚部为衰减(对应吸收),而折射率取决于相对介电常数 $\epsilon_r = \chi - 1$, χ 为极化率.极化率可通过原子波函数对偶极场求平均值获得.理论上可以将探测光对上述原子基态波函数求极化率 χ ,得出极化率与失谐量的曲线图如图4.

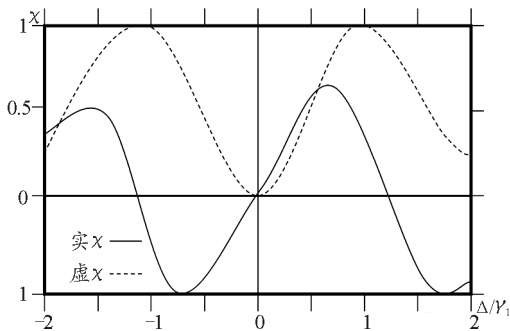


图4 极化率 χ 与失谐 Δ 关系曲线

极化率的实部和虚部的斜率分别对应色散和吸收.由图4可见在共振频率附近($\Delta \approx 0$)的很小失谐范围内,探测光的谱线色散率很大的(斜率很大),吸收很小(斜率近似等于零),这将实现探测光在失谐时的超慢传播.

1.2 实现途径

哈佛大学的 Lene Hau 小组的实验在极低温度下进行,原子气体实现玻色-爱因斯坦凝聚(BEC),Hau 小组使用 BEC 相的钠原子来进行实验,BEC 简

单地可以理解为原子都处于相同的基态,且步调相同(相位相干).

实验开始时 BEC 原子都处于 $|1\rangle$ 能级,这时对着这些原子加上耦合激光,此激光的光子能量等于 $|2\rangle$ 和 $|3\rangle$ 之间的能量差.接着对着 BEC 原子发射用来探测作用的激光,习惯称此光为探测激光.探测激光光子能量等于 $|1\rangle$ 和 $|3\rangle$ 之间的能量差,如果没有耦合激光的话,原子会吸收探测激光跃迁到 $|3\rangle$ 能级,但因为耦合激光的存在,两者都想往 $|3\rangle$ 跳,这时候会发生量子干涉,干涉结果是原子处于 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 的叠加态——暗态.实验原理如图5所示.

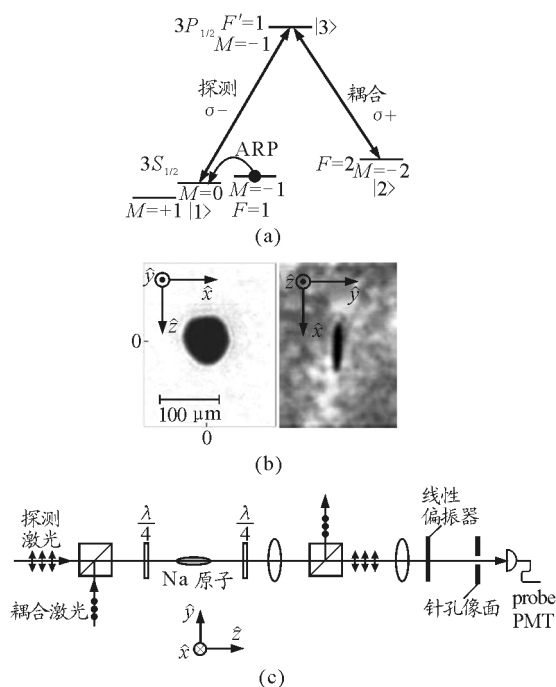


图5 钠原子 BEC 相实验原理图

探测光的作用就像是给原子们刻上了个印记,印记内容包含了探测光时间、空间信息的振幅和相位(暗态在 $|2\rangle$ 态的投影).接着移除耦合光,探测光和暗态也同时消失,部分原子处于 $|2\rangle$,这些原子有探测光的信息,最后再加上耦合光, $|2\rangle$ 态含有探测光信息的原子吸收耦合光光子跑到 $|3\rangle$ 能级, $|3\rangle$ 能级又会自发放出光子跳回 $|1\rangle$,这些自发放出的光子是和探测光相同的.如果把加注探测光的时刻与移除耦合光的时刻保持一致,这一刻既是量子干涉开始时刻,或称原子印记时刻,又是探测光脉冲不能通过介质的时刻开始,间隔时间后再一次加注耦合光,此时探测光出射(透明),这个时间间隔即为探测光被介质“停滞”的时间.从脉冲探测光进入—停

滞一出射,这其中间隔的时间就对应了光速的减慢.注意,这个间隔时间不是任意可以延长的,这取决于带有印记(探测光信息)的原子能够保留的时间.实验中探测光先是被记录下来,再重生般的发射出来,虽说两者直观上不是同一束光,但是光的量子信息一点都没改变,本次实验把光的速度降到了17 m/s.为了防止量子相干印记(探测光信息)的原子与BEC原子过早发生相互作用而使印记消失,实验中用磁场将印记原子与BEC原子做了分隔,就像油浮在水面上.

2 慢光速意义

慢光速研究既具有科学意义,又具有应用价值.科学上,从对光的本质的了解、光速的测量,到改变、控制光的传播行为,反映出人类对光与物质发生相互作用的本质和规律的了解程度的提高.应用上,首先在寻找能产生极慢光速介质的过程中发现了许多具有极强的非线性光学效应的介质,为开辟新的光学研究方向奠定了基础;其次慢光速实现了信号脉冲的相位滞留和量子态的存储,为实现远程量子相干通讯提供了一种选择,中国科学家在此方向已迈出了坚实的一步;除上述之外,利用慢光速研究的结果还可以在光开关、光纤延时器、全光存储等方面有着广阔的应用前景.

3 教学建议

通过阅读本文,我们在大学物理教学上至少能

做这几件事.第一,教学中可有的放矢地作一些铺垫.比如,在教授介质的电磁场极化时,强调介电常数的两种作用——色散与吸收;在波动光学教学中,强调相速度与群速度的差异;第二,教学中组织课堂讨论.作为慢光速专题阅读后的课堂讨论,可以设定下列问题进行师生互动:

(1) 光波在介质中的色散机理分析(相速度在介质中的不同);

(2) 光波被介质选择性吸收的机理?(能级的共振吸收)

(3) 慢光速含义和实现的量子概念是什么?(光的量子信息储存与相干时间控制)

(4) 慢光速研究的理论意义(真空光速不变、介质光速操控和人工量子相干态——暗态的构建)和技术意义(量子通讯、光纤延时器——用于网络识别等).

针对这些设定的讨论议题,如果能组织得当,既能有层层递进的深入感,又能得到阅读案例的有效感.起此作用,乃本文的意义所在.

参考文献

- 1 赵勇,等.慢光产生的新机理及应用.光学精密工程,2009,31(2)
- 2 沈京玲,等.光能够走多慢——极慢光速研究若干进展.物理,2002,31(2)
- 3 吴重庆,等.光速减慢与光缓存技术.物理,2005,34(12)
- 4 马文蔚.物理学.北京:高等教育出版社,2014

Theory and Implement on the Research of Slow Light Speed

——a teaching case for university physics classroom

Dai Guomin Zhou Yuqing

(Department of Physics, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189)

Abstract: Phase velocity and group velocity are included in the teaching materials for university physics classes, but teachers generally do not go further than just introducing the concepts and deriving the formulas to calculate them. If real applications of these concepts are presented in classroom, better teaching result will be achieved. In this paper, the theory and implement of ultraslow light propagation are discussed, and our goals are two-fold: to provide a valuable case for classroom teaching and to supply interesting scientific information to the general public.

Key words: slow light; theory; implement; teaching; popular science