



介质中光脉冲的超光速问题分析*

鲍倩倩 康大为 孟少英

(辽宁大学物理学院 辽宁 沈阳 110036)

(收稿日期:2022-11-30)

摘要:光具有相速度、群速度和波前速度, 辨明三者与真空光速 c 之间的关系是十分必要的. 光在折射率小于 1 的介质中传播时, 相速度能够超光速; 光脉冲在具有反常色散的介质中传播时, 群速度能够超光速. 在任何情况下, 光脉冲的波前速度和信息传播速度都无法超光速. 通过在课程中引入光前驱波现象, 说明光脉冲的波前速度无法超过真空光速 c .

关键词:群速度; 相速度; 波前速度; 超光速; 光前驱波

波的传播是物理学中重要的现象, 特别是光波传播的速度问题, 在力学、光学、电磁学和电动力学等物理课程中十分重要. 光作为良好的信息载体, 被广泛应用于光通信领域, 因此调控携带信息的光脉冲的传播速度也是国内外科学研究工作者们关注的研究热点.

相对论指出真空光速 c 是光信号传播的极限速度, 但研究工作告诉我们光的相速度和群速度都能超过真空光速^[1-3], 而光的波前速度即信息速度却无法超过真空光速^[4-5]. 在光学等物理课程中, 当讲授光脉冲的相速度、群速度和波前速度时, 引入超光速现象和光前驱波^[6]的基础知识和研究内容, 不仅能使学生更加全面深入地学习光的传播速度的知识, 并且能够激发学生积极关注科学前沿问题的兴趣, 培养学生勇于探索的创新精神, 这也符合当代高校培养创新型人才的目标.

1 光的相速度和群速度与真空光速的比较

光的相速度和群速度都能超过真空光速 c . 光的相速度是描述具有单一频率 ω 的单色波的某一等相位面向前移动的速度. 考虑沿 z 轴传播的单色平面波

$$E(z, t) = E_0(z) e^{-i(\omega t - kz)} \quad (1)$$

将其代入到电磁波传播满足的麦克斯韦方程中可以

得到

$$\omega = \frac{c}{n} k$$

相速度可被定义为

$$v_p = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{n} \quad (2)$$

通常情况下, 折射率 $n > 1$, 说明光在介质中传播的相速度一般小于真空光速 c . 特殊情况下, 在折射率小于 1 的介质中^[7] 或者在波导中^[1] 是能够实现超光速现象的.

然而, 在时间上无限延展的单一频率光波是不能携带信息的. 实际情况中, 人们更多的是采用频率调制或者振幅调制的光脉冲, 实现信息的加载、传输、存储和处理. 一束光脉冲可以看作是多种单色光波的线性组合, 群速度就是用来描述光脉冲的传播情况的, 它代表光脉冲的一定振幅向前推进的速度.

为了得到群速度 v_g 的表达式, 可将光脉冲写成一系列单色波的线性组合

$$E(z, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(k) \exp\{i[kz - \omega(k)t]\} dk \quad (3)$$

其中 $F(k)$ 是展开系数. 当 $F(k)$ 曲线主要分布在以 k_0 为中心的较窄范围内时, 可以将 $\omega(k)$ 在 k_0 附近做微扰展开, 略去高阶项后的表达式为

$$\omega(k) \approx \omega_0 + \omega'_0(k - k_0) \quad (4)$$

其中

* 辽宁大学本科教学改革项目, 项目编号: JG2020YBXM183, LNDXJG20182041.

作者简介: 鲍倩倩(1985 -), 女, 博士, 讲师, 主要从事量子光学方面的研究.

$$\omega_0 = \omega \Big|_{k=k_0} \quad \omega'_0 = \frac{d\omega}{dk} \Big|_{k=k_0}$$

将式(4)代入到式(3)的傅里叶积分中,可得

$$E(z, t) \approx$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} F(k) \exp\{ikz - i[\omega_0 + \omega'_0(k - k_0)]t\} dk = \exp[-i(\omega_0 - \omega'_0 k_0)t] E(z - \omega'_0 t, 0) \quad (5)$$

从式(5)的结果可以看出,除多出一个指数的相位因子 $\exp[-i(\omega_0 - \omega'_0 k_0)t]$ 之外,光脉冲整体以群速度 $v_g = \omega'_0 = \frac{d\omega}{dk} \Big|_{k=k_0}$ 传播,此时光脉冲的形状不会发生畸变。

光脉冲的群速度和相速度之间的关系可以通过以下的分析给出。在真空中,折射率为1,虽然光脉冲包含了多种频率的光波,但每种频率光波的相速度都等于真空光速 c ,因此整个光脉冲的群速度也等于 c ,即 $v_g = v_p = c$ 。在介质中,折射率不为1且与光波的频率有关,亦即折射率和角频率都是波数的函数

$$\omega = \frac{c}{n(\omega)} k = v_p k \quad (6)$$

因此在介质中的群速度为

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d}{dk}(v_p k) = v_p + k \frac{dv_p}{dn(\omega)} \frac{dn(\omega)}{d\omega} v_g \quad (7)$$

进一步可以推导出

$$v_g = \frac{v_p}{1 + k \frac{v_p}{n(\omega)} \frac{dn(\omega)}{d\omega}} = \frac{c}{n(\omega) + \omega \frac{dn(\omega)}{d\omega}} \quad (8)$$

对于正常色散区域,即

$$\frac{dn(\omega)}{d\omega} > 0$$

群速度小于相速度,并且小于真空光速 c ;对于反常色散区域,即

$$\frac{dn(\omega)}{d\omega} < 0$$

群速度将大于相速度,当其绝对值很大时,群速度甚至可以大于 c 或者出现负的群速度,这都属于超光速现象。

经过上述的分析可以看出,光的群速度和相速度都是可以超光速的,但这种超光速并不违反因果律。需要注意的是,群速度的定义是有一定适用范围

的,当不同频率单色光波的相速度相差很大时, ω 随 k 的变化很快,就需要考虑展开式(4)中的高阶项,此时光波的包络在传播过程中会很快地扩散开,这时群速度的定义就是不良的。

2 光前驱波的速度与真空光速的比较

光的相速度和群速度可以超光速,那么光脉冲的波前速度是否能超过真空光速呢? 答案是否定的。利用光前驱波现象可以对这一结论进行说明。

光前驱波的概念是由 A. Sommerfeld 和 L. Brillouin 首次提出的,用以说明光的传播速度与相对论之间的矛盾问题^[8]。所谓的光前驱波就是光波的最前沿,由于介质对光波的响应需要一定的时间,而瞬时开启的光脉冲进入介质时,介质还来不及响应瞬时的光波变化,光脉冲的最前沿就以真空光速 c 传播出了介质。由于前驱波能够不被介质吸收而穿透进介质的深处,其在生物医学成像和水下探测等很多方面有着重要的用途。

由电磁学和电动力学原理可知,介质极化率的虚部决定了介质对电磁波的吸收,而实部决定了介质对电磁波的色散。通常情况下,吸收曲线伴随着反常色散,而反常色散区间能用来实现脉冲群速度的超光速。将矩形调制的光脉冲输入到长度为 1.6 mm 的冷原子介质中,矩形脉冲的传输情况如图 1 所示,(a) 图为输入的矩形脉冲,(b) 图为输出的光前驱波。

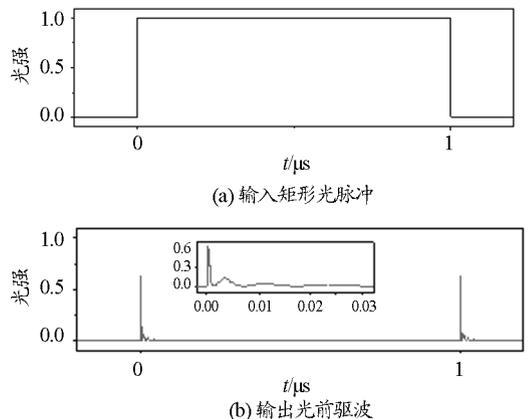


图1 二能级原子介质中的光前驱波

从图1中可以看出,矩形脉冲穿过具有反常色散的二能级原子介质时,脉冲的主体被吸收,但是脉冲的最前沿仍然以光速 c 传播出介质,矩形脉冲中并未有任一部分能超过真空光速 c 。这也证明了光

脉冲携带的有效信息速度是不可能超过光速 c 传播的. 图中光前驱波的强度有衰减, 是因为上升沿的时间在 0.1 ns 量级. 理论上只要有无限短的瞬时开启时间, 光前驱波的最大强度将与输入脉冲上升沿的强度相等, 也就是说, 光前驱波在介质中传播如同在真空中传播一样. 具体情况中, 光前驱波的强度和时间长度, 取决于介质的响应时间和上升沿的快慢.

在上述的二能级原子系统中, 虽然能在反常色散区间实现光脉冲群速度的超光速, 但光脉冲主体的能量很快就被介质吸收掉. 随后的研究工作发现, 增益谱线处也伴随反常色散, 因此能够在保留光脉冲主体的同时观测到光前驱波现象^[9]. 如果将高斯型的光脉冲输入到这种介质中, 脉冲将出现负的群速度, 即超光速现象; 然而将具有突变上升沿的光脉冲输入到这种介质中, 光脉冲波前的强度被放大, 但仍然以真空光速 c 穿过介质. 放大的光前驱波来源于主体脉冲与光前驱波的干涉作用, 整个光脉冲仍然没有任何部分能够超过真空光速 c 传播. 这也再次验证了光脉冲最前沿的波前速度是无法超过真空光速 c 的.

3 结论

光的相速度、群速度和波前速度与真空光速 c 的比较, 无论在教学工作中还是在科学研究工作中都是十分重要的问题. 在一定条件下, 光脉冲的相速

度和群速度都能超过 c , 而光脉冲的波前速度却始终无法超过 c . 通过光前驱波现象的引入, 在激光耦合冷原子产生的反常色散区域, 实现矩形光脉冲的超光速传播, 结果表明光脉冲中没有任何一部分的速度能够超过真空光速 c , 从而说明光脉冲的波前速度不能超光速.

参考文献

- [1] 费兆宇, 马宇翰, 孙昌璞. 相速度和群速度超光速问题再辨析[J]. 现代物理知识, 2022, 34(1): 3-7.
- [2] 钟采池. 相速度、群速度与超光速问题[J]. 大学物理, 1985, 1(10): 16-18.
- [3] 张元仲. 反常色散介质“超光速”现象研究的新进展[J]. 物理, 2001, 30(8): 456-460.
- [4] 郭奇志, 谭维翰. 超光速群速度与信息传输的有效速度[J]. 光学学报, 2007, 27(2): 344-349.
- [5] 王号, 张春光, 李晖. 光速调控中的信息速度问题研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(3): 031902-1-031902-5.
- [6] 杜胜望. 光前驱波[J]. 物理, 2013, 42(5): 315-327.
- [7] 谭业武. 关于 X 光折射率小于 1 的讨论[J]. 大学物理, 1994, 13(11): 22-23.
- [8] Léon Brillouin. Wave Propagation and Group Velocity[M]. New York-London: Academic press, 1960: 125.
- [9] Yandong Peng, Aihong Yang, Yan Xu, et al. Coherent control of optical precursors in warm atomic system with Doppler effects[J]. Optik, 2013, 124: 5 340-5 343.

Analysis on the Issue about Superluminal Velocity of Light Pulse in Medium

BAO Qianqian KANG Dawei MENG Shaoying

(School of Physics, Liaoning University, Liaoning, Shenyang 110036)

Abstract: Light has phase velocity, group velocity, and wavefront velocity. It is necessary to identify the relationships between these three velocities of light in a dispersive medium and the velocity of light in vacuum. In a medium with a refractive index of less than 1, the phase velocity can exceed the light speed in vacuum. When propagating in a medium with anomalous dispersion, the group velocity of a light pulse can exceed the light speed in vacuum. However, the wavefront speed and information propagation velocity of a light pulse cannot exceed the light speed in vacuum. By introducing the phenomenon of optical precursors into the physics courses, we can clearly show that the wavefront velocity of light pulses cannot exceed the light speed in vacuum.

Key words: phase velocity; group velocity; wavefront velocity; superluminal velocity; optical precursor