

电磁脉冲在实验室等离子体中传播时间的实验研究

王 亮 曹金祥[†] 王 艳 牛田野 王 舸 朱 颖

(中国科学院基础等离子体物理重点实验室, 中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026)

(2006 年 8 月 18 日收到, 2006 年 9 月 1 日收到修改稿)

利用矢量网络分析仪, 对频域 9—11 GHz 的电磁脉冲在实验室稳态无磁场等离子体中传播时间的问题进行了实验研究. 实验发现当等离子体密度在 $0.65\text{—}1.43 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 范围内时, 电磁脉冲通过该等离子体传播的时间将会小于该电磁脉冲在真空中传播同样距离所需要的时间, 在密度约为 $1.10 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 时, 这两个时间差会出现一个极值. 进一步的研究表明在此密度范围内, 非磁化 Xe 等离子体中的电磁波色散关系将不再成立.

关键词: 电磁脉冲, 脉冲传播时间, 等离子体密度, 色散关系

PACC: 5225, 5235H, 5240D, 5270G

1. 引 言

关于电磁信号在色散介质中的传播问题, 多年来, 一直有许多人致力于该领域的研究, Sommerfeld 和 Brillouin^[1]对瞬时信号在色散介质中的传播问题, 作了系统的研究. 当一个电磁脉冲进入到介质中时, 其群速度 $v_g = c/n_g$, 这里 $n_g = n(\omega) + \omega dn(\omega)/d\omega$, $n(\omega)$ 为介质的折射系数. 在通常情况下, 群速度 v_g 小于真空中的光速 c , 称之为正常色散. 然而在一定的条件下 v_g 可以超越真空中的光速 c , 达到无限, 甚至还可能为负值^[2-4], 称之为反常色散, 然而这并不违反 Einstein 的相对论和因果律. 在关于波传播的文献 [1] 指出尽管有反常传播的效应, 但实际所传播的真实信号的传播速度并不能超越真空中的光速, 因此也就不违背 Einstein 相对论和因果律. 不过研究表明 $v_g > c$ 及 $v_g < 0$ 确实有其实际的物理意义^[2,5,6]. Garrett 和 McCumber^[5]用数值计算的方法研究了高斯光脉冲在反常色散介质中的反常传播, 得到即使群速度异常时, 脉冲依然能维持其形状; Chu 和 Wong^[6]实验研究了线性电磁脉冲在色散介质中的反常传播, 证实了 Garrett 和 McCumber 的预言; Bolda 等人^[7]对色散介质中的群速度作了理论研究, 提出了对于任何色散介质, 一定存在某一频率, 在此

频率电磁脉冲的群速度是异常的; Wang 等人^[2]进行了光脉冲穿越铯原子气体的实验, 得到 $n_g = -31(\pm 5)$; George 等人^[3]实验观察到了脉冲通过介质以负群速度传播; Gunnar 等人^[4]实验上得到了相速度、群速度同时为负. Siegman^[8]认为, 电磁脉冲在色散介质中的传播之所以会出现 $v_g > c$, 或 $v_g < 0$ 的情况, 是由于对于所研究的脉冲, 其任何有限的一段都包含着这个脉冲形状的所有信息, 在介质内部或出射位置, 当脉冲被其前导边缘段所包含的信息重构出来时, 电磁脉冲即使以真空中的光速 c 传播也还没有传到, 而实际上能量在局域的传播速度并没有超越真空中的光速 c . 类似的工作还有对粒子隧穿的超光速效应的研究, Aharonov 等人^[9]从量子力学的角度所做的理论研究, 同样不违反相对论和因果律. Steinberg 等人^[10-14]用光子作为粒子的隧穿实验研究证实了粒子穿越宽度为 d 的势垒所需要的时间确实可以小于 d/c . 国内近年来对超光速的研究^[15-21], 已进行了超慢光速实验和负群速实验^[15]和负介电常数与负磁导率方面的实验^[16]. 在理论方面, 项元江等^[19]研究了势垒为单负介质时光子隧穿的性质, Xu 等^[20]研究了多普勒展宽对共振相关介质吸收色散性质的影响, Yu 等^[21]计算分析了光脉冲通过含色散与增益型一维光子晶体的传播行为.

最近, 我们对频域为 9—11 GHz 的电磁脉冲在

[†] E-mail: jxcao@ustc.edu.cn

实验室稳态非磁化等离子体中的传播时间问题进行了实验研究,研究表明当等离子体密度在一定范围内时,微波电磁脉冲通过等离子体传播所需要的时间将会小于等离子体所在区域为真空时传播所需要的时间(不违反 Einstein 相对论),并且发现该微波电磁脉冲通过等离子体传播所需要的时间随着等离子体密度的增长呈现规律性变化,我们将在后面的讨论中详细阐述.

2. 实验装置

实验装置如图 1 所示.实验仪器由等离子体发生装置、E8362B 矢量网络分析仪、微波天线及吸波材料、等离子体探针诊断系统等组成.等离子体放电腔是直径 20 cm、长 35 cm 的柱形玻璃容器,周围无外磁场.

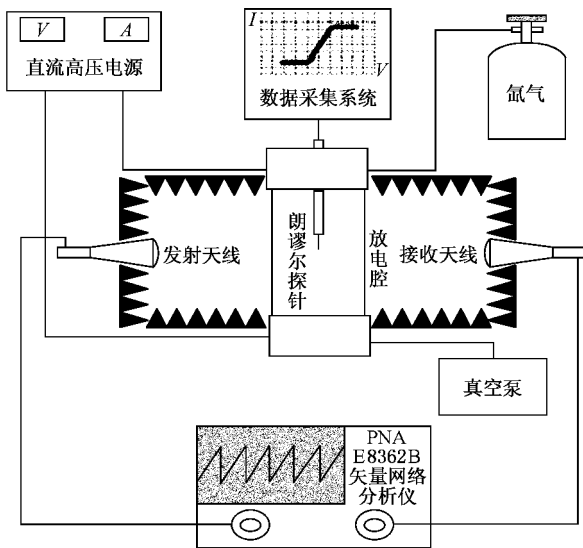


图 1 实验装置及诊断测量示意图

应用矢量网络分析仪的时间测量法^[22-23],可以测得电磁波通过等离子体的传播信息,该仪器的时间精度为 12.5 fs.发射和接收天线为标准的 X 波段圆锥喇叭天线,增益 20 dB,两天线间距 88 cm.为防止周围金属器件的影响,在强反射点的地方放置 X 波段的尖锥形吸波材料.

实验中我们采用高压直流放电产生 Xe 等离子体,放电腔内本底真空为 10^{-3} Pa,放电时 Xe 气压强选择在 20 Pa.等离子体密度由静电探针诊断系统完成,使用 EEDF(电子能量分布函数)方法获得等离子体密度.

3. 实验结果与讨论

图 2 是装置内无等离子体,本底压强为 10^{-3} Pa 时,接收天线接收到的信号.图中纵坐标所表示的脉冲峰值为 1 是归一化后的值,横坐标为脉冲信号时间.

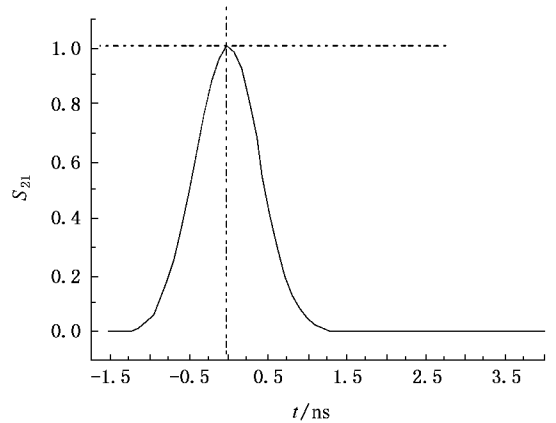


图 2 放电区域无等离子体且为真空时,接收天线接收到的信号

图 3 给出了等离子体密度 n_e 不同时,接收天线所接收到的信号,横坐标是脉冲通过等离子体所需的时间 t_p 与通过真空所需的时间 t_0 之差 $\Delta t (= t_p - t_0)$,纵坐标表示的是归一化后的脉冲幅度.

比较图 2 和图 3(b),不难发现当有等离子体存在时,对密度介于 $(0.80-1.52) \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 范围内的等离子体,相对于放电腔内无等离子体且为真空时,各脉冲幅度有显著的衰减,表明此密度范围内的等离子体对该频段的电磁波具有很强的散射作用,使得电磁波的前向散射最大衰减可达到近 99% ($n_e \approx 1.10 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 时),此时 Δt 最小,其值为 -0.28 ns .从图 3(a)可以看出等离子体密度不高时,其衰减并不显著.从图 3 还可以看出,对密度介于 $(0.56-1.52) \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 的等离子体,当 $\Delta t < 0$ 时,脉冲衰减的幅度与 Δt 有关, Δt 越小电磁脉冲衰减得越显著.

图 4 是当等离子体密度变化时, Δt 随等离子体密度的变化关系.可以看出, Δt 随着等离子体密度的升高呈现谷型结构,即当等离子体密度介于 A ($n_e \approx 0.65 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$) 与 B ($n_e \approx 1.43 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$) 之间时,电磁脉冲在等离子体中传播的时间小于在真空中传播所用的时间.除此之外,在 AB 之间这一密度范围内, Δt 存在一个极值点 C ($n_e \approx 1.10 \times$

10^{11} cm^{-3}) 此时 Δt 有最小值 -0.28 ns 。

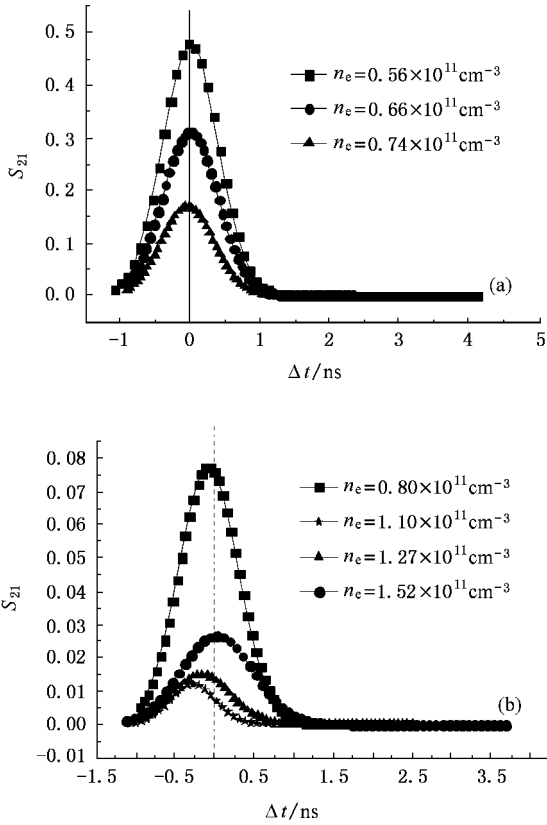


图 3 微波脉冲通过不同密度的等离子体时,接收天线接收到的脉冲信号的比较

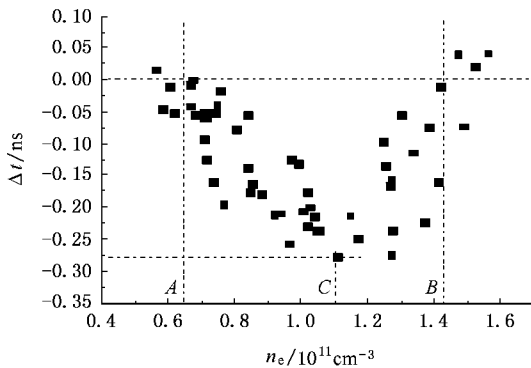


图 4 Δt 随等离子体密度的变化关系

我们采用经典非磁化等离子体中电磁波的色散关系,从理论上给出随等离子体密度改变,电磁脉冲在其中传播群速度的解析表达式,并且与我们的实验结果相比较。

当载波频率为 ω 的电磁脉冲穿过折射系数为 $n(\omega) = n_r(\omega) + in_i(\omega)$ 的介质时,波数的实部 $k(\omega) = \omega n_r(\omega)/c$,其群速度^[1]

$$v_g(\omega) = \left[\frac{dk(\omega)}{d\omega} \right]^{-1} = c \left[n_r(\omega) + \omega \frac{dn_r(\omega)}{d\omega} \right]^{-1}, \quad (1)$$

这里群速度为脉冲能量传递的速度.脉冲在其传播方向上穿越距离 z 所需的传播时间

$$t(\omega) = \frac{dk}{d\omega} z = \frac{z}{v_g(\omega)}. \quad (2)$$

相比该脉冲在真空中传播同样距离所需的时间 z/c ,这两个时间差称为群延迟^[7],即

$$\Delta t(\omega) = \left[\frac{1}{v_g(\omega)} - \frac{1}{c} \right] z. \quad (3)$$

当群速度反常时($v_g > c$, $v_g = \infty$ 或 $v_g < 0$), $\Delta t(\omega) < 0$.由(3)式可以得到 v_g 的实验值。

然而对于通常的等离子体,当无外磁场时,对于频率为 ω 的电磁波,其折射率^[24]

$$n(\omega) = \sqrt{\epsilon} = \left[1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega - i\nu)} \right]^{1/2}, \quad (4)$$

其中 ϵ 为 Lorentz 介电常数, $\omega_{pe} = \left(\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e} \right)^{1/2}$ 为等离子体的电子振荡频率, ν 为电子与中性粒子碰撞的有效碰撞频率。

结合(1)式可以得到 v_g 的理论值

$$v_g = c \left[\frac{\frac{\omega^2}{\omega_{pe}^2} A^2 + \frac{A^2}{2M} \left(2 \frac{\omega^2}{\omega_{pe}^2} - B^2 - 1 \right)}{\sqrt{2(1 - A + M)}} + \sqrt{\frac{1}{2}(1 - A + M)} \right]^{-1}, \quad (5)$$

其中 $A = \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + \nu^2}$, $B = \frac{\nu}{\omega}$, $M = \sqrt{A^2 B^2 + (1 - A)^2}$.在我们的等离子体中, $\nu \ll \omega$, ω_{pe} , 脉冲的中心频率 $f_0 = 10 \text{ GHz}$.图 5 给出了 v_g 的实验值、理论值与等离子体密度的关系,真空中的光速 c 取值 $2.99 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

我们可以把实验所研究的等离子体的密度分成三个区:

- I 区: $n_e < 0.65 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$;
- II 区: $0.65 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3} < n_e < 1.43 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$;
- III 区: $n_e > 1.43 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 。

从图 5 我们可以看出,在 II 区实验与理论偏离较大, I 区、III 区与 II 区相邻的区域,实验与理论均有相符合的趋势.研究^[22]表明:对 Ar 等离子体,在 III 区

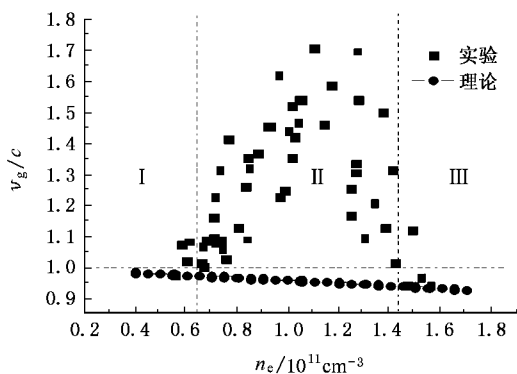


图5 归一化的 v_g/c 的实验值、理论值与等离子体密度的关系图

内 $n_e < 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 时, $n(\omega) = \left[1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega - i\nu)} \right]^{1/2}$

是成立的. 时间测量法、微波干涉法以及 Langmuir 探针测量三种方法测得的等离子体密度符合得很好. 在

实验的 II 区, 实验得到 $v_g/c > 1$, $\left. \frac{dn_r(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=2\pi f_0} < 0$, 并

且 v_g/c 的值随着等离子体密度的增加先增大后减小. 而非磁化等离子体中通常的折射系数

$n(\omega) = \left[1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega - i\nu)} \right]^{1/2}$ 得到 $\left. \frac{dn_r(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=2\pi f_0} > 0$ 这

就表明对于密度 $n_e = (0.65 - 1.43) \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 的由高压直流放电产生的 Xe 等离子体 (4) 式将不再能够准确的描述 9—11 GHz 的微波电磁脉冲在其中的传播特性. 这可能是由于诸如反常色散^[5, 25, 29]、原子布居数翻转^[26—28]、脉冲重构^[2, 29]、等离子体位垒^[17] 等效应引起的. 进一步的研究我们将在以后的工作中进行.

4. 结 论

本文实验研究了柱形非磁化实验室 Xe 等离子体对频域在 9—11 GHz 的微波电磁脉冲的传播时间的影响. 当等离子体密度 $n_e = (0.65 - 1.43) \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 时, 电磁脉冲通过等离子体传播的时间将会小于放电区域为真空时脉冲传播所需要的时间 (不违反相对论), 并且在等离子体密度约为 $1.10 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 时, Δt 达到最小值 -0.28 ns . 在此密度范围内, 非磁化 Xe 等离子体中的电磁波色散关系将不再成立. 上述实验结果对量子通信和超光速物理的研究有一定的参考价值.

[1] Brillouin L 1960 *Wave Propagation and Group Velocity* (New York: Academic)

[2] Wang L J, Kuzmich A, Dogariu A 2000 *Nature* **406** 277

[3] George M G, Aaron S, Christopher B, Natalie K, Robert W B 2006 *Science* **312** 895

[4] Gunnar D, Christian E, Martin W, Costas M S, Stefan L 2006 *Science* **312** 892

[5] Garrett C G B, McCumber D E 1970 *Phys. Rev. A* **1** 305

[6] Chu S, Wong S 1982 *Phys. Rev. Lett.* **48** 738

[7] Eric L, Bolda, Chiao R Y, Garrison J C 1993 *Phys. R. A* **48** 3890

[8] Siegman A E 1986 *Lasers* (University Science Books, Mill Valley, CA)

[9] Aharonov Y, Reznik B, Stern A 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 2190

[10] Steinberg A M, Kwiat P G, Chiao R Y 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 708

[11] Steinberg A M, Chiao R Y 1995 *Phys. Rev. A* **51** 3525

[12] Chiao R Y, Steinberg A M 1997 *Tunneling Times and Superluminality, in: Progress in Optics* (New York: Elsevier)

[13] Chiao R Y, Steinberg A M 1998 *Physica Scripta T* **76** 61

[14] Spielmann Ch, Szpöcs R, Stingl A, Krausz F 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 2308

[15] Chen X Z, Xiao F, Li L M et al 2004 *Journal of Beijing Broadcasting Institute* (Science and Technology) Supplement **11** 19 (in Chinese) [陈徐宗, 肖峰, 李路明等 2004 北京广播学院学报(自然科学版)增刊 **11** 19]

[16] Sui Q, Li L L, Li F 2003 *Science in China Series G* **33** 416 (in Chinese) [隋强, 李廉林, 李芳 2003 中国科学 G **33** 416]

[17] Huang Z X 2005 *Theory and Experiment of Superluminal research* (Beijing: Science press) (in Chinese) [黄志洵 2005 超光速研究的理论与实验(北京: 科学出版社)]

[18] Huang Z X 2002 *New Development of Superluminal research* (Beijing: National Defence industry Press) (in Chinese) [黄志洵 2002 超光速研究新进展(北京: 国防工业出版社)]

[19] Xiang Y J, Wen S C, Tang K S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2714 (in Chinese) [项元江, 文双春, 唐康淞 2006 物理学报 **55** 2714]

[20] Xu W H, Gao J Y 2005 *Chin. Phys.* **14** 2496

[21] Yu T B, Liu N H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3049 (in Chinese) [于天宝, 刘念华 2004 物理学报 **53** 3049]

[22] Song F L 2005 *Thesis of Doctor's degree* (University of Science and Technology of China) (in Chinese) [宋法伦 2005 博士学位论文(中国科学技术大学)]

[23] PNA Series Network Analyzer Help 2003 Agilent Technologies

[24] Heald A and Wharton C B 1985 *Plasma diagnostics with microwaves* (New York: John Wiley & Sons Inc)

[25] Dogariu A, Kuzmich A, Cao H, Wang L J 2001 *Optics Express* . **8** 344

[26] Chiao R Y 1993 *Phys. Rev. A* **48** R34

[27] Steinberg A M, Chiao R Y 1994 *Phys. Rev. A* **49** 2071

[28] Chiao R Y , Boyce J 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 3383

[29] Crisp M D 1971 *Phys. Rev. A* **4** 2104

Experimental study of propagation time of electromagnetic pulse through laboratory plasma

Wang Liang Cao Jin-Xiang[†] Wang Yan Niu Tian-Ye Wang Ge Zhu Ying
(*Key Laboratory of Basic Plasma Physics , Chinese Academy of Sciences , Department of Modern Physics ,
University of Science and Technology of China , Hefei 230026 , China*)
(Received 18 August 2006 ; revised manuscript received 1 September 2006)

Abstract

The propagation time of electromagnetic pulse (EMP) through nonmagnetic stationary laboratory Xe plasma was investigated by using network analyzer , with EMP frequency of 9—11 GHz . The research indicates that the propagation time of EMP through plasma will be less than that through the same distance in vacuum when the plasma density is in the range of $0.65—1.43 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ and the time delay will be a minimum at $n_e \approx 1.10 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$. In this range of plasma density , the dispersion relation of electromagnetic wave in Xe plasma without magnetic field will be invalid .

Keywords : electromagnetic pulse , propagation time of pulse , plasma density , dispersion relation

PACC : 5225 , 5235H , 5240D , 5270G

[†] E-mail : jxcao@ustc.edu.cn