

大气中激光等离子体通道寿命的延长及测量分析

董全力 燕 飞 张 杰 金 展 杨 辉 郝作强 陈正林 李玉同 魏志义 盛政明

(中国科学院物理研究所光学开放实验室,北京 100080)

(2004 年 10 月 26 日收到 2004 年 11 月 19 日收到修改稿)

介绍了一种反卷积方法,利用该方法分析了实验中测得的等离子体通道的光电信号特征,获得了空气中等离子体通道的真实寿命,还证明了利用双脉冲激光结构,可以将等离子体寿命延长近 5 倍.

关键词:反卷积,大气激光等离子体通道,等离子体寿命

PACC:5250J,4262

1. 引 言

高强度激光在空气中传输的时候,会发生很多有意思的现象,诸如锥角辐射^[1-4],超连续辐射^[5,6]以及激光三次谐波的产生^[7,8]等等.其中丰富的物理过程及潜在的应用吸引了很多科学家和工程人员.利用激光在空气中产生的等离子体通道引雷是一个很有意思也很有意义的课题.设想(实验)中的激光引雷工程是利用激光等离子体通道,将云块中的电荷定向引到地面上指定目标或者空中别的云块.这样的工程,要求产生的等离子体通道有足够的长度和寿命,以缩短云块和地面目标的电阻,并有充足的时间让整个通路建立,如在没有等离子体的地方通过地面和云块之间的电压,导致空气电离等等.空中的积雨云一般距离地面约几公里,通过电压电离空气所需要的时间约为微秒量级^[9,10].现实中要建立这样一条完整的等离子体通道是不可能的.研究者们往往合理利用激光在空气中的非线性效应,在地面目标和云块之间产生一段一段的等离子体.虽然闪电并不一定会沿着产生的等离子体传输,但是可以极大提高闪电在地面目标和空中云块发生的可能性^[10].在实验室里,人们通常研究激光等离子体通道的产生、优化条件以及等离子体的各种性质如电子密度,电阻和寿命等.

我们要报道的研究集中在等离子体通道的寿命测量和分析上.电子和离子复合时所发射的光的寿命,反应了等离子体存在的时间.通过测量这个量,可以简单估计通道存在的时间.不幸的是,用于测量的光电系统自身存在的时间响应约为几个纳秒,即

便采用比较先进的示波器(500MHz , $2 \times 10^{-4}\text{T/s}$),来测同量级的等离子体寿命,所得到的信号也无法精确.我们编了程序,对实验中测得的信号做了成功的反卷积,使得对等离子体通道寿命的测量接近示波器的精度.

在实验中,为了延长等离子体通道的寿命,我们采用了双脉冲的方式,前后两个脉冲之间时间延迟为 10ns ,大约相当于单脉冲等离子体通道的寿命.实验的初衷是集中研究第二个脉冲对等离子体寿命的影响方式.但由于光电系统的响应时间,使得我们无法直接从信号中得到需要的信息.利用我们的反卷积程序,比较精确地分离出了前后两个脉冲导致的等离子体信号.分析得到的实验结果,通过和流体力学程序 MEDUSA 所做模拟进行比较,揭示了双脉冲产生等离子体通道的特点.

2. 实 验

我们采用的实验安排如图 1 中所示.约 15mJ , 50fs 的激光脉冲,在空气中,由焦距 2m 的凸透镜聚焦,产生了直径约 $100\mu\text{m}$,长约 1m 的等离子体通道.在垂直于激光传输的方向上,设置一光电管,将所测的荧光信号转化为电信号,输入数字示波器分析储存.为了避免背景光的干扰,光电管和被观测的一段等离子体通道被封在一个黑圆柱筒里,仅在筒子的两端留有直径约 5mm 的孔供激光和等离子体穿过.图 2 是利用 30fs 激光脉冲做信号产生的整个探测系统的响应.由于光电系统固有的特点, 30fs 的光脉冲,在示波器上给出了大于 $5\text{--}7\text{ns}$ 宽的信号.这么宽的响应,给我们的信号测量带来了困难.图 3(a)

中给出了利用一个激光脉冲和相隔 10ns 的先后两个激光脉冲产生的空气等离子体通道发射的荧光信号演化. 只有一个脉冲的时候, 从信号看, 等离子体似乎约存在了 10 到 15ns. 但也很明显, 双脉冲可以极大的延长等离子体通道的存在时间, 尤其是信号尾部, 显示等离子体的寿命可以延长至几百 ns. 之所以采用双脉冲结构而不是简单的提高单脉冲的能量或强度, 是基于我们的实验结果. 单脉冲情况下, 随着能量的提高, 等离子体的寿命仅有微小的增加, 比如, 激光能量从 10mJ 提高到 80mJ, 等离子体的寿命却只增加了两倍, 效率不高. 而采用双脉冲结构, 如我们实验看到的, 虽然激光的能量并没有增加很多, 等离子体的寿命却大大延长了. 可是, 我们所关心的单脉冲条件下, 等离子体到底存在多长时间, 以及双脉冲结构中第二脉冲是怎样具体影响(延长)等离子体寿命等问题, 却不能从测得的信号中清楚地看出来. 在随后的内容中, 我们将简单介绍所用的反卷积方法, 并分析实验测到的信号. 通过与流体力学程序的模拟结果进行比较, 获得了对等离子体通道演化的比较清晰的认识.

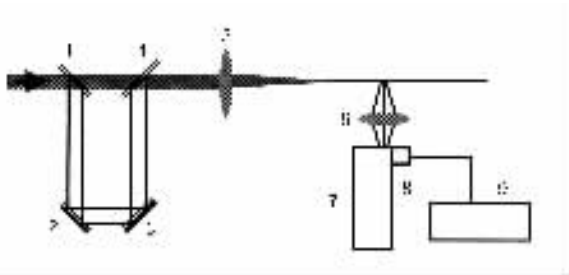


图 1 实验装置示意图

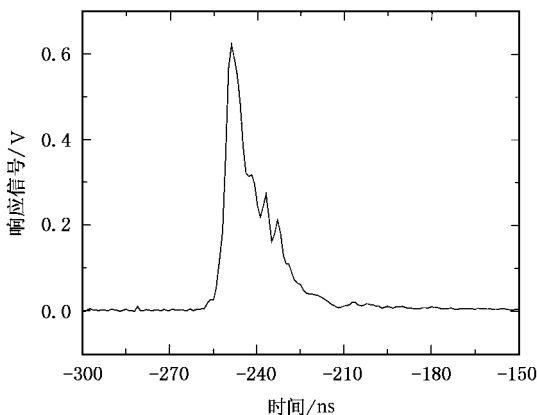


图 2 利用 30fs 脉冲激光得到的整个光电系统的响应曲线

3. Tikhonov 调整方法及实验结果分析

我们在实验中测得的信号 $S(\omega)$, 一定是仪器响应函数 $R(\omega)$ 和真正信号 $T(\omega)$ 的卷积, 即

$$R(\omega) * T(\omega) = S(\omega), \quad (1)$$

这个方程, 从数学上看, 是不稳方程. 就是说, 方程右边的 $S(\omega)$ 的微小扰动, 往往会导致方程的解, 就是物理系统变量 $T(\omega)$ 巨大变化. 即这个方程是个多解方程, 方程右边的微小变化, 可以导致方程产生非常不同的解. 利用卷积定义对实验数据的反卷积处理, 由于实验数据不平滑, 往往失败. 我们发现 Tikhonov 曾研究过这个问题, 且给出了解决这个问题的比较简单有效的方法^[11]. 通过对方程(1)添加稳定项的方法, 使得方程右边的微小变动, 如误差 δ 大小, 仅能引起方程解的相同数量级的改变. 这样可以得到虽然是近似, 但却唯一的方程解, 从而消除了方程的不稳定性. 为了获得这个稳定项, Tikhonov 引进了一个“光滑函数” $M^{\alpha}[T, S^{\delta}] \equiv \rho^2(R * T, S^{\delta}) + \alpha Q[T]$. 其中, δ 是实验中测得的信号的误差(扰动), α 叫做调整变量, $Q[T]$ 是稳定算子. 求解方程(1)的唯一解, 等价于求解“光滑函数” M^{α} 的最小值 $\min M^{\alpha}[T^{\alpha}, S^{\delta}]$, 其约束条件是 $\rho(R * T^{\alpha}, S^{\delta}) \equiv \|R * T^{\alpha} - S^{\delta}\| = \delta$. $T^{\alpha}(\omega)$ 是使 M^{α} 有最小值的试探函数. 为了求解 $\min M^{\alpha}[T^{\alpha}, S^{\delta}]$ 根据 Tikhonov 建议, 简单有效的稳定算子 $Q[T]$ 可以取 $\|T\|^2$. 设 M^{α} 对 $T(\omega)$ 的一阶导数为零, 可以得到调整后的与方程(1)等价的方程组 $(\hat{R}\hat{R} + \alpha\hat{I})T^{\alpha} = \hat{R}S^{\delta}$, 其约束条件变为 $\|\hat{R}T^{\alpha} - S^{\delta}\| = \delta$. 数值求解上面的方程的过程中, α 的方便的初始选值是实验误差 δ , 以求得的试验解 T^{α} 满足 $\|\hat{R}T^{\alpha} - S^{\delta}\| - \delta < \epsilon$ 作为程序结束循环的条件.

利用所编程序, 我们对实验中得到的等离子体通道荧光演变信号做了解谱, 得到了真正的荧光寿命. 图 3(b) 给出了解谱以后的单脉冲及双脉冲产生的等离子体荧光演化曲线. 单脉冲的情形下, 荧光演化特征很有意思. 从光电系统可以探测到荧光开始, 信号迅速上升, 达最大值后, 快速下降, 荧光信号的半高全宽约为 7ns; 但信号有一个相当长的尾巴. 随后的荧光信号衰减变得很缓慢, 表明等离子体经历了两个状态. 整个荧光信号持续了大约 10 到 15ns, 其半高全宽约为 7ns, 与我们所用的光电系统的响应函数宽度相当. 我们利用 Medusa, 采用相同的激

光参数和空气靶,对等离子体产生及消失过程进行了模拟.图3(c)给出了模拟得到的电子密度随时间的演化.以此与实验测得的等离子体的荧光信号演化进行比较,我们发现,激光脉冲刚过的很短一段时间内等离子体的荧光信号快速上升和衰减主要是因为电子和离子的快速复合.这导致的等离子体密度降低,离子和电子都减少.在随后的过程中,缓慢的荧光衰减主要因为电子和离子的减少使得它们之间的碰撞复合机会大大减少.但我们同时注意到,Medusa模拟得到的等离子体后期电子和离子的复合速率要慢于实验中观察到的速率.对于这个不同点,可以通过引进实验中,空气中存在于等离子体中的中性原子、分子对电子的吸附加以理解.在Medusa中,由于只考虑了电离以及电子和离子的碰撞复合,而没有考虑中性原子对电子的吸附作用,使得一旦电子、离子密度降低到一定程度后,复合辐射信号就会变化相当缓慢.虽然等离子体初期,由于其中电子平均能量高,中性原子对电子的吸附比之电子和离子的碰撞复合要弱得多,但随着平均电子能量的降低,等离子体中吸附作用就开始占主导地位^[12].比较实验和模拟信号,我们还发现,对应每个脉冲,实验测到的荧光快速上升和下降部分的宽度要大于模拟得到的数值.我们认为这是应该有的现象.由于在反卷积过程中,并非所有的响应函数都被考虑在内,而且,实验中,激光脉冲的前、后沿并非如模拟中采用的那样,是很标准的Gauss形状.一般认为,脉冲的前沿1ps处和峰值的强度比是 10^{-5} 时,脉冲的质量就很好了.而这个强度,在空气中存在尘埃的情况下,是很容易击穿产生等离子体的.类似的效应,在反卷积的过程中,也不可能全部考虑到.对于双脉冲,荧光信号演化过程中的两个峰值之间的延迟是10ns,这正是实验中双脉冲之间采用的延迟时间. Medusa模拟也很好的再现了这两个峰值之间10ns的时间延迟.如图3中垂直的双虚线所标出.这一点也表明,我们的反卷积程序工作很好.对于在第一个脉冲前的荧光信号的振荡,不应当被认为是信号的振荡.我们将之归为反卷积过程中的方程的不稳定性,是由于该处荧光信号快速增加造成的.

被吸附的电子,当然不会对激光引雷有所贡献.通过在适当延迟后引入第二个激光脉冲,可以起到解放被吸附电子,甚至重新电离出新电子的作用.双脉冲的信号显示,这个目的达到了.第二激光脉冲后的荧光信号也快速地上升和下降,和第一个脉冲过

后等离子体荧光信号演化原因相同.但更有意义的是,等离子体的寿命并不是简单地增加了又一个10到15ns,而是增加到了100ns以上.究其原因有两个:其一,在第一个脉冲后,由于吸附作用,导致许多电子存留了下来.这些电子,即便被很弱的激光辐照,即可被解离成为自由电子,这部分自由电子由于还具有相当的能量,不易被再次吸附.其二,在间隔10ns期间,等离子体的膨胀,明显降低了离子的密度,即便第二个激光脉冲再电离出相当的离子来,总的电子和离子的碰撞机会也相对只有一个激光脉冲产生的等离子体要少得多.因而电子和离子的复合机会也少,等离子体发射光也就较弱且变化比较缓慢了.

我们对两个脉冲之间的延长时间对全部等离子体荧光演化曲线的影响做了研究,发现10ns或者更长的时间延迟,对我们所使用的激光条件能够较大地延长等离子体的寿命.另外我们还设想,是否可以通过采用脉冲序列的方式,将等离子体的寿命再加以延长至微秒量级.等离子体通道的长度也需要在不同的条件加以研究.有关的实验在准备和实

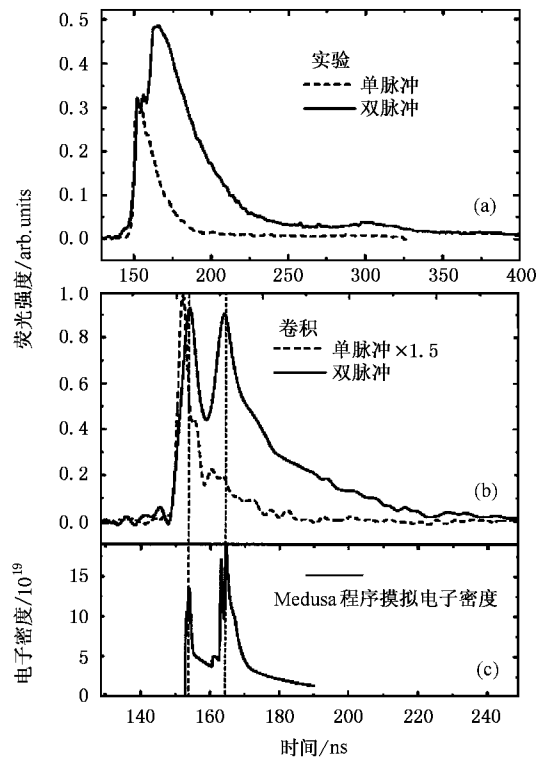


图3 实验测得的单激光脉冲及双激光脉冲产生的等离子体通道的荧光演化曲线.显示了双激光脉冲对等离子体通道寿命的增长作用(a).经过反卷积得到的由双激光脉冲产生的等离子体荧光演化曲线(b).图中同时给出了Medusa模拟给出的等离子体电子密度的演化曲线(c).

施中.

4. 结 论

描述了我们对空气等离子体通道的寿命所做的

研究.利用 Tikhonov 的调整方法,我们编写的程序,使得能够将信号精确到示波器的精度.这使对等离子体的荧光演化及等离子体的状态掌握成为可能.另外,这个程序还可以被利用在其他的方面,如各种光谱仪,及其他存在响应函数宽度的问题.

- [1] Nibbering E T J , Curley P E , Grillon G , Prade B S , Franco M A , Salin F and Mysyrowicz A 1996 *Opt. Lett.* **21** 62
- [2] Kosareva O G , Kandidov V P , Brodeur A and Chin S L 1997 *Opt. Lett.* **22** 1332
- [3] Golub I 1990 *Opt. Lett.* **15** 305
- [4] Luther G G , Newell A C , Moloney J V and Wright E M 1994 *Opt. Lett.* **19** 789
- [5] Rairoux P *et al* 2000 *Appl. Phys. B* **71** 573
- [6] Yang H *et al* 2005 *Opt. Lett.* **30** 534
- [7] Akozbek N , Iwasaki A , Becker A , Scalora M , Chin S L and Bowden C M 2003 *Phys. Rev. Lett.* **89** 143901
- [8] Yang H , Zhang J , Zhang J , Zhao L Z , Li Y J , Teng H , Li Y T , Wang Z H , Chen Z L , Wei Z Y , Ma J X , Yu W and Sheng Z M 2003 *Phys. Rev. E* **67** 015401(R)
- [9] Yang H *et al* 2002 *Phys. Rev. E* **66** 016406
- [10] Rodeguerz M *et al* 2002 *Opt. Lett.* **27** 772
- [11] Tikhonov A M and Arsenin V A 1977 *Solutions of Ill-posed Problems* (Washington , Winston & Sons) p181
- [12] Tzortzakos S , Franco M A , Andre Y B , Chiron A , Lamouroux B , Prade B S and Mysyrowicz A 1999 *Phys. Rev. E* **60** R3505

The measurement and analysis of the prolonged lifetime of the plasma channel formed by short pulse laser in air

Dong Quan-Li Yan Fei Zhang Jie Jin Zhan Yang Hui Hao Zuo-Qiang Chen Zheng-Lin
Li Yu-Tong Wei Zhi-Yi Sheng Zheng-Ming

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

(Received 26 October 2004 ; revised manuscript received 19 November 2004)

Abstract

The Tikhonov regularization method is applied to analyze the lifetime of the plasma channel produced by femtosecond laser pulses propagating in air. Experiments show that by using double laser pulses separated by several nanoseconds , the lifetime of the plasma channel can be prolonged by 5 times that of only using one laser pulse.

Keywords : de-convolution , plasma channel in air , plasma lifetime

PACC : 5250J , 4262