

以激光辐射连续维持的等离子体和光等离子体器

苏联科学院力学问题研究所气动过程物理学研究室，非常注意基于连续激光辐射的光等离子体发生器即光等离子体器的工作。所指的过程和装置是：由于光束（激光）输入能量使得在一个大气压左右能够长时间维持或产生干净、稠密的等离子体。这个崭新的问题在我们这里是三、四年以前提出的，为了弄清楚这个问题在一系列与其相近的等离子体物理与等离子体技术中的地位，简短地谈一下等离子体发生器是适宜的。

不少物理学、工艺和技术问题迫切需要产生或维持一种高压、低温的等离子体¹，因此，等离子体发生器——等离子体器——得到更加广泛的应用。通常用以产生或维持高压、低温等离子体的现代方法，都是基于利用电磁能和放电现象的。依据电磁场频率的特征，等离子体器可分为电弧、高频和超高频几种，虽然结构形式有时相当复杂，其原理却异常简单。

在电弧等离子体器中，直流电弧或低频电流电弧在两电极之间的气体中燃烧。若有冷气体流过放电区，则冷气体在电弧中变为等离子体，并以连续等离子体射流的形式流出来。电弧等离子体器的主要缺点是，得到的等离子体为电极损坏的产物所污染。在高频和超高频等离子体器中，由于利用无电极放电，这个缺点得以消除。

I 依照通常的术语，一万度或几万度的等离子体称为“低温等离子体”（区别于百万度的“高温等离子体”）“高压”指的是一个大气压的数量级或更高一些。

在高频等离子体器中，通过感应线圈放出兆赫量级的高频电流，涡流造成的感应放电在线圈内部燃烧。气体在插入线圈中的管子内流动，流过放电区域，气体变为等离子体，若装置为封闭容器中静高频放电，则无气体管路。最后，在超高频等离子体器中，气体沿管子流动，管子穿过波导管，在二者交叉的地方放电燃烧，放电是由沿波导管移动的超高频辐射（频率为千兆赫量级）所维持的。也还有其他种结构形式的超高频等离子体器。卡皮察（N. A. Kanuya）的著名实验（在共振器中心连续燃烧的定常放电）也实现了超高频场的放电。

上述用以产生等离子体的每一种方法，均具有自己的优点与缺点，但他们又具有一共同的从某方面来说不希望有的特点。在这些装置中，为了将电磁能（造成放电及维持等离子体）送到放电处，必需使用特殊的结构部件，即电极、感应线圈，波导管，共振器。

光等离子体发生器原则上消除了这个缺点，它借助于光束将能量送给等离子体。因为用光束输送电磁能到一定距离不需要任何结构另件，所以光放电可以在自由空间燃烧。此外，在光放电中，应获得比高频或超高频所能获得的更高温度，同时产生无污染的十分干净的等离子体。

这种用光辐射法维持等离子体的过程原则上是可能的，从物理上来说已很清楚了，问题其实在于，这时是否需要一个大得不现实的辐射功率。为了得到这个问题的答案，发展了相应的理论，特别是，解决了下述一个简单问题。

我们设想空气中有一长时间存在细而平行的光束。若在光束中某一

处人为地产生一初始等离子体，则等离子体吸收光，气体被加热，热传导机制使热量向所有方向传播，其中也包括沿着光束面对光波的方向传播。这时冷气体被加热，电离，得到吸收光能的本领；光在这时是在新的，原先是冷的一薄层内被吸收。这样一来，等离子体的前阵面，吸收光以后，迎着光束向前移动。

于是，产生了某种吸收光和加热气体的波，或者说沿光束传播的放电波。过程很象管道中可燃混合气的燃烧，或缓燃导火线²的燃烧。也可以说，发生了光束“燃烧”过程。就物理方面与数学方面而言，其与燃烧的类比是很深刻的。差别只在于，燃烧中放出的化学能是物质本身储存的，而这里的光能是外界光束给予的。

这样放电传播方式的数学问题的提法也和火焰传播问题的提法一样。问题的解答决定了等离子体温度（在一个大气压的空气中应得到约20000℃），放电传播速度（光束中光能量越大，这个速度越高），以及存在放电传播的伐值，即尚能维持不衰减“燃烧”的最小光功率。伐值取决于等离子体的能量损失。

如果指望用 CO_2 激光光束，这是目前唯一连续作用的大功率激光器，则为了在一个大气压的空气中《燃烧》很细的光束（直径1毫米），根据计算，必须给出大约4瓩的功率。光束直径更大就需要更大的功率，例如直径3毫米时需要7瓩。这个数值是巨大的，但决不是荒诞的。今

2 在 Ф. В. Бункин, В. И. Канюк, А. М. Крохоров & В. Б. Фегорюк
毫秒脉冲激光实验中也观察到类似的短时间过程。

天已有了一瓦的二氧化碳激光器，不久前还报导过得到成十上百瓦的激光器。

当然，初步的实验只能利用容易达到的功率。计算表明，如果不是产生行波，而是光束聚焦于某一点的静放电，则可降低所需功率。这时等离子体只在光束最强的焦点附近燃烧，而且，由于放电不能离开焦点，否则光强减弱，故燃烧应该是稳定的。根据计算，在聚焦良好的条件下，空气中燃烧的静放电功率为2瓦左右；如采用重的单原子气体（氙，氙），并且压力高，则需要功率更小，几百瓦的量级也就够了。上述的概念与理论计算是作为我们实验工作的基础，实验是在我们研究部科兹洛夫（Г. И. Козлов）领导下的实验室中进行的。参加实验的工作人员有格涅拉洛夫（Н. А. Генералов），吉马科夫（В. И. Зимаков），马秀科夫（В. А. Машков）和阿巴里耶夫（А. Э. Абариев）。1970年春天用150瓦的激光器首次成功地获得连续燃烧的光放电。目前我们用0.5瓦的CO₂激光器，但原则上无甚变化——只是功率大时可以得到更大的效果。送入等离子体的激光束聚焦在充满氙或氙气的小室的中心，压力为几个大气压。为了点燃等离子体，象通常燃烧一样需要“火柴”。任何一种过程，只要能在激光束聚焦处产生初始等离子体，均可当作“火柴”。

在我们的实验中是用另一CO₂激光器使气体击穿而实现等离子体点火的，这个激光器有足以使气体击穿的大功率重复短脉冲。放电点火后，引燃的激光器可移开，而放电可在离四壁较远的小室中心随

意长时间地燃烧，即理论上可认为处于自由空间燃烧。

等离子体发出闪耀夺目的白光，在一定条件下燃烧完全稳定。

图1给出全景。照片是通过小室侧窗拍摄的。窗中看得出小孔，光束通过这小孔进入小室。

图2是放电的放大照片（虚线指示光束的外形）。放电相对焦点迎着光束而移动。生成的等离子体尺寸为几毫米（图上每格为1毫米）。

伐值与气压和气体种类有关：压力越高，一般来说伐值功率越低。提高功率，等离子体尺寸就加大。氩等离子体的计算温度近于 20000°C 而氦，近于 15000°C 。温度测量得到的初步数据，与计算相符。

* * *

实验结果说明，原则上可建立光等离子体器。由于从原则方面来说问题可认为已解决，目前一切均取决于我们所提供的激光功率。应当强调，移动光束（不要太快，理论上不超过放电传播速度即可），可使等离子体在空间移动。

最后指出上述效应的这种可能的应用。特别是，因为等离子体温度很高，连续燃烧的光放电是一种亮度很大的光源。这么大亮度的连续光源，也许还不曾有过。毫无疑问，未来必将有更多的领域，实际应用连续燃烧的光放电。

译自：Ю. П. Райзер, Непрерывное подержание плазмы лазерным излучением и оптический плазмотрон, ВАН СССР, 1971 (Окт.), No. 10, стр. 28-32.