

TEA CO₂ 激光脉冲整形用等离子体开关技术的进展

任德明 胡孝勇 周波 曲彦臣 刘逢梅
(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨, 150001)

摘要: TEA CO₂ 激光脉冲整形技术是高功率、高重复率、捷变频的 TEA CO₂ 激光器研究和用 TEA CO₂ 激光产生倍频、高次谐波技术的必不可少的重要技术。等离子体开关是目前应用较广的一种简单可行的激光脉冲整形技术。综述了等离子开关技术的原理和技术的发展过程, 并对其作了简要分析, 展望了其广泛的应用前景。

关键词: TEA CO₂ 激光器 脉冲整形 等离子体开关

The development of plasma shutter pulse-shaping technique for TEA CO₂ laser

Ren Deming, Hu Xiaoyong, Zhou Bo, Qu Yancheng, Liu Fengmei
(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

Abstract: The pulse-shaping technique for TEA CO₂ laser is one of the most important techniques to study high power and high repetition rate tunable TEA CO₂ laser and its frequency conversion. The plasma shutter is a simple and practical pulse-shaping technique. The development of the plasma shutter theory and technique has been analyzed and revised. Finally it makes a conclusion that the plasma shutter has wide application prospect.

Key words: TEA CO₂ laser pulse shaping plasma shutter

引 言

高功率、高重复率、捷变频的 TEA CO₂ 激光器的研究已经成为差分吸收雷达(DIAL)的关键技术, 而使 TEA CO₂ 激光器的脉冲输出稳定、光束质量好的脉冲整形技术也成为了重要的研究课题之一。与此同时, 随着倍频技术的不断发展, 处于大气窗口且具有更好大气传播特性的波长为 3~ 5 μ m 的中红外激光作为一种优异的相干光源受到人们的关注。目前, 最令人瞩目的频率转换技术就是利用高功率、高重复率 TEA CO₂ 激光作为基频光源, 利用 AgGaSe₂ 等非线性晶体产生高次谐波获得 3~ 5 μ m 波长的相干光技术^[1]。随着深入的研究, 人们发现 TEA CO₂ 激光脉冲波形对倍频的转换效率有很大的影响^[2]。TEA CO₂ 激光的输出波形前沿很陡、但后沿存在严重的拖尾现象。这段占激光脉冲部分能量的拖尾, 功率较低, 转换效率极低, 它不仅不能转换成二次谐波, 而且还会对晶体产生严重损伤。因此, 对 TEA CO₂ 激光进行脉冲整形已经成为了用 TEA CO₂ 激光产生高次谐波的必不可少的重要技术。

等离子体开关是目前应用较广的一种简单、可行的激光脉冲整形技术。通过调节等离子体开关内的充气气体种类和气压, 激光触发气体产生等离子体, 可以截止激光脉冲的低频部分, 使高频的短脉冲通过。这种截断拖尾脉冲的方法, 不仅可以避免由于拖尾产生的晶体热损伤, 而且可以在不降低转换频率的基础上提高可承受的脉冲能量和重复率。因此, 这种利用光学等离子体开关缩短脉冲的方法已经成为了解决高重复率脉冲激光经过非线性晶体产生非线性

性转换辐射问题的一种先进技术和有效手段。

等离子体开关技术作为一种良好的脉冲整形方法,将具有广泛应用价值的 TEA CO₂ 激光的应用前景得到飞跃性的扩展,使其在激光雷达、激光测距、红外对抗、高密度的空中光通信等方面得到广泛应用。此外,它还可以在远红外光谱分析、半导体技术、光学自感应衰变系统、单脉冲产生技术、生物医学、环境检测等方面有进一步应用和拓展。

1 等离子体开关工作原理

等离子体开关理论的形成最初源自人们对激光和气体或等离子体之间相互作用的研究。1964年,Maker等人首次报道了激光感应气体击穿现象,从而使高强度的激光辐射与气体粒子之间的相互作用受到了科学界的广泛关注。1970年,Smith^[3]用一个调Q的CO₂激光测定了对10.6 μm 波长的气体击穿阈值,发现当激光强度达到10⁹W/cm²时,没有立即产生自击穿现象,而当最初的低程度的电离产生以后,才会出现大量气体被电离和击穿的现象。1973年,Yablonoich^[4]观察到,在气体击穿瞬间会发生很强的谱线展宽,这是由于形成的等离子体密度快速变化而使激光光束的相位或幅值发生改变。与此同时,他还观察到,当光束通过击穿的等离子体后,激光功率会有一个突然的下降。根据这一现象,Yablonoich认为激光击穿气体产生的等离子体可以起到截断光束的开关作用。

一般来说,气体初始电离产生等离子体有两种重要的机制——多光子吸收过程和级联或碰撞的感应电离过程。在多光子吸收过程中,气体原子同时吸收多个光子而发生光电效应,使电子脱离原子。例如,红宝石激光的光子能量为1.78eV,而氙的电离能是15.8eV,这就表明氙原子发生电离必须吸收9个光子,这样才能使一个电子从氙原子中脱离出来。级联电离过程是自由电子吸收激光辐射后与分子、原子和离子发生碰撞产生的,它在高压及宽脉冲的条件下占主导地位。电离分子中的电子通过反韧致辐射过程从激光辐射场中吸收能量,直到获得足够的能量去电离跟它碰撞的其它分子,从而产生了新的自由电子。这一过程使电离速率呈指数增长,直至在焦点处引起击穿。

综上所述可知,气体击穿主要受最初出现在焦点处的自由电子的影响。在红外激光辐射气体击穿过程中,初始自由电子主要通过红外电离作用产生。在此过程中,一个束缚电子经入射激光辐射后,其前半波沿得到加速,后半波沿被减速,电子获得的平均能量为0,电子仍然处于束缚状态。然而,如果在前半波沿,光场就已经达到足够加速电子并且电离的强度,那么气体分子或原子将发生电离,这时就伴随着初始自由电子的产生,正如上面所说的多光子吸收过程。在紧接着的时间里,这个激光早期辐射释放的自由电子不断从激光的电磁场中获得能量,并和周围的原子发生碰撞,一直持续到产生足够的电子数,在焦点区引发级联电离过程。

一旦气体被击穿,在焦点区域等离子体开始形成并向四周扩散,同时在已电离的区域内伴随着强烈的吸收现象,气体被快速加热,导致等离子体发生快速球形膨胀。在入射光方向上,激光的辐射能极快地注入焦点区,被等离子体吸收。等离子体形成一个强吸收波,称作“激光维持吸收波”(LSAW),沿着激光传播方向不断地快速生长。等离子体波前沿传播速率是依靠激光的强度和等离子体的传播机制来确定的,速度可达 $2 \times 10^6 \text{ m/s}$ ^[5]。因此,激光通过局部瞬时变化的等离子体区域时被强烈的吸收了,其折射率将发生快速的变化。折射率为:

$$n(x, t) = [1 - N(x, t)/N_c]^{1/2} \quad (1)$$

$$N_c = m_e \omega_0^2 / 4\pi e^2 \quad \Omega_p = (4\pi N_e e^2 / m_e)^{1/2} \quad (2)$$

式中, $N(x, t)$ 表示等离子体中电子的密度, N_c 表示等离子体的频率 Ω_p 达到激光频率 ω_0 时的临界密度, N_e 和 m_e 分别表示电子的密度和电子的质量。当 $N(x, t) \ll N_c$ 时, 气体的折射率接近不变, 因此, 光束可以传输; 当达到临界密度时, 折射率就会发生改变, 这就意味着等离子体对激光辐射产生了强烈的吸收作用, 入射激光发生截断。上述分析可知, 等离子体的快速增长导致了入射光束的快速截断, 从而产生了对激光脉冲的整形。

2 等离子体开关技术的应用发展与分析

等离子体开关技术是伴随着等离子体开关控制触发系统的发展而不断成熟起来的。目前比较成熟方案有两种。

(1) 利用光束触发气体击穿的等离子体开关技术。

从等离子开关的工作原理来看, 最简单的等离子开关可以通过在注入空气或纯净气体的密封腔内对激光束充分聚焦产生光学自击穿离子的方法来实现。目前, 这种方案的不足是存在很大的控制问题。由于设计方案没有考虑精确的控制方法, 因此, 光学自击穿很可能发生在激光脉冲达到峰值之前的某一时刻。可见, 该方法不能对激光脉冲起到有效的脉冲整形的作用。装置图见图 1。

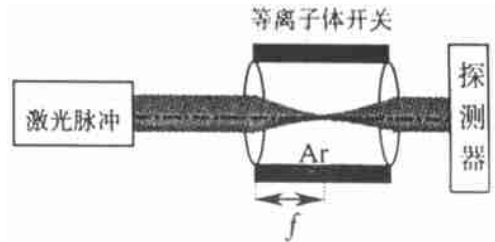


图 1 激光触发的等离子体开关的实验装置

该方案的一个改进方法是调节开关内气体气压, 使激光在其峰值附近产生自击穿。它可以简单地控制等离子开关中气体击穿。但是, 这种方法对激光脉冲一次次发射的再现能力很差, 导致了短脉冲强度起伏。虽然这在某些应用中可以被忽视, 但在一些需要对其脉冲强度同时进行控制的应用中, 例如, 测量由二次谐波产生的脉冲强度时, 这个起伏就不能忽略了。

1977 年, Kwok 和 Yablonoitch^[6] 引入了一个位于焦点附近的光学触发火花靶。该方法让从激光光束中分束出来的一小部分光发生延迟, 然后聚焦在主光束焦点附近的火花靶上。这样在火花靶上就可以产生一个表面等离子体, 并开始引发主光束方向上的气体击穿。随后的几年里, 人们又相继报道了不同物质的火花靶对气体击穿的影响, 以寻求容易形成表面等离子体的物质成分。

虽然光学触发焦点附近的火花靶很容易实现, 且其物质组成研究又使它在自触发击穿方面有了很大的改善, 但这种方法仍然表现出许多缺陷。例如实验中观察到, 一旦充气气压发生变化, 表面等离子体的形成条件就会改变, 为了实现触发时间的精确控制就需要立即进行重新调节。此外, 火花靶应该尽可能地靠近激光主光束的焦点, 同时又不能阻碍光束传输, 一旦靶与聚焦位置的距离增大, 将会导致等离子体开关截断时间的抖动, 这就给火花靶的精确调节带来了难度。

(2) 利用激光触发火花隙进行电触发的等离子体开关技术。

早在 1975 年, Kwok 和 Yablonoitch^[7] 报道了一种利用小型电火花隙装置代替激光触发等离子体来进行光学触发气体击穿的研究方法。这种方法可以实现用一个较小的电信号去控制大功率的激光束的传输。为了减少触发抖动, 表面等离子体与聚焦位置的距离必须控制在 1mm 之内。1983 年, Hasslbeck 等人^[8] 设计出一种高速、低价格的等离子开关, 它是利用针式电阻器型火花隙产生表面等离子体的装置。这种触发方式, 要求的工作电压小于 500V, 但在

经过几千次的激光脉冲发射后,分路的电阻器表面会产生损伤现象,因此,针尖必须重新更换。1992年,K $\frac{3}{4}$ in等人受到了Pendleton和Guenther研究红宝石激光触发系统的启发,在等离子体开关内引入了一个很有应用前景的激光触发火花装置(LTSG)。这种等离子体开关是利用反射的一部分激光束触发LTSG后产生脉冲信号,驱动高压电路产生高压脉冲,供给两个等离子体触发电极,用于触发气体击穿。这种设计不但可以减少脉冲的抖动,而且具有良好的自持运作能力和稳定性。结构装置见图2。

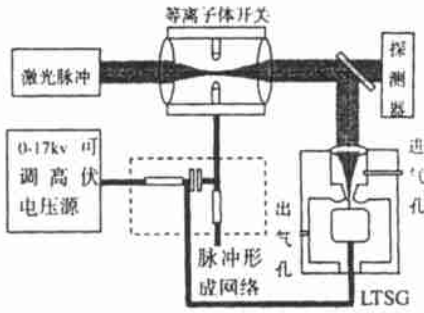


图2 LTSG(激光触发火花带)触发的等离子体开关的实验装置

等离子体开关的逐渐应用也促进了等离子体开关技术的不断发展。1977年以来,Kwok和Yablomovich^[6]致力于将光学触发等离子体开关应用在光学自感应衰变(OFID)系统中,用混和CO₂激光脉冲触发产生皮秒级CO₂激光脉冲。

1985年,Kwok^[5]经过进一步的研究,将电触发的等离子体开关应用在OFID中,使电触发方式的等离子体开关得到了极大的应用和发展。

1994年,Knittel等人在利用可调谐单模高压CO₂激光器设计的光学感应衰变系统中,也使用了

LTSG触发的等离子体开关,使产生的CO₂激光脉冲达到90ps。

同年,Knittel等人^[9]首次把等离子体开关应用在远红外激光辐射中,并使496 μ m的远红外激光脉冲产生的截断时间达到0.7ns。

同年,Masek等人^[10]根据激光脉冲在抗辐射的穿孔薄片上产生的等离子体的相互作用,研制出带孔的等离子体开关。实验分析出脉冲的截断缩短是依赖于孔的直径,他采取基于流体动力学的计算方法,用简单的分析模型显示其物理过程。

同年,Gold等人^[11]进行了等离子体开关压缩脉冲特性的研究,实验比较证明这个基于光学的等离子体开关是一种可适用于高强度、亚皮秒级激光脉冲截断的宽带宽的超快速开关。

1995年,Knittel等人在用高压单模CO₂激光器产生皮秒级脉冲的研究中,把等离子体开关用于产生截断的10 μ m激光脉冲。

1996年,Knittel又把等离子体开关应用在单脉冲选择领域,通过对远红外激光脉冲序列的截断,可以选择获得脉宽为1.2ns的单脉冲。这不但扩大了等离子体开关的适用范围,而且使等离子体开关技术的发展得到了延伸。

1997年,Williams等人^[12]进行了等离子体开关对CO₂激光脉冲进行截断的实验研究。他们使用一个短脉宽的YAG激光聚焦在一个低气压的气体中(约26.7kPa),这个YAG激光沿着一个长脉宽的CO₂激光,并使气体中产生等离子体,快速截断了CO₂激光脉冲。

1998年,Williams等人又测量了YAG和CO₂激光脉冲光束聚焦到气体(He和Ar)内同一个点产生的等离子体。目的是为了设计一个适用控制CO₂激光脉冲长度的等离子体开关。

1999年,Gorobets等人^[13]报道了用于TEA CO₂激光频率转换的红外非线性光学特性晶体的研究,其中利用等离子体开关改善脉冲波形来产生二次谐波。

同年,Williams等人^[14]对低能量电子束探针下的相对等离子体进行模型实验,同时在等离子体开关中用CO₂激光对He和Ar气的光学击穿进行了定性的实验。

在国内, 等离子开关技术的研究起步较晚, 主要从事于等离子电光开关技术的研究^[15], 其它方向尚未见报道。

3 发展前景展望

从现有的等离子体开关技术的研究成果可以看出, 等离子体开关是一种良好的脉冲整形技术, 并且具有较低的光辐射损失、结构简单易于研制的特点。目前, 针对国内的激光应用研究, 设计研制特定的等离子体开关, 用于截断 TEA CO₂ 激光器的输出脉冲, 产生高质量、无拖尾、窄脉宽的激光束, 是完全可以实现的。等离子体开关技术已经成为 TEA CO₂ 激光倍频转换技术进入实用化阶段的关键技术, 它使 TEA CO₂ 激光的应用前景得到了飞跃性的扩展。人们可以利用经过脉冲整形的高质量的 TEA CO₂ 激光束作为优质光源进行激光雷达、激光测距、红外对抗、高密度的空间光通信等方面的实验研究。此外, 在远红外光谱分析领域, 等离子体开关以其简单的结构、易于控制、较低的光辐射损失等特点, 成为了替代半导体开关的最佳选择; 在半导体技术和生物学领域, 等离子体开关可以作为产生超短单脉冲技术的核心方法, 这种经过等离子体开关整形的超短脉冲可以作为激发半导体中核间电子转移和研究生物体内原子间进行能量转移的的激励光源; 在光学自感应衰变系统中, 等离子体开关也可作为一种产生超短脉冲的必要方法。

参 考 文 献

- 1 原崎亚纪子, 松井正克, 内田裕 *et al.* レー — 研究 1995; 23: 280~ 287
- 2 Russell D A, Ebert R. Appl Opt, 1993; 32: 6638~ 6644
- 3 Smith D C. J A P, 1970; 41: 4501
- 4 Yablonovitch E. Phys Rev Lett, 1973; 31: 877
- 5 Kwok H S. Infrared Phys, 1985; 25: 53~ 59
- 6 Kwok H S, Yablonovitch E. Opt Commun, 1977; 21: 252
- 7 Kwok H S, Yablonovitch E. A P L, 1975; 27: 583
- 8 Hasselbeck M, Huang L, Hsu S C *et al.* Rev Scient Instrum, 1983; 54: 1131
- 9 Knittel J, Scherrer D P, Kneub hl F K. Infrared Phys Technol, 1994; 35: 67~ 71
- 10 Masek K, Kralikova B, Laska J *et al.* Laser and Particle Beam, 1994; 12: 445~ 454
- 11 Gold D M. Opt Lett, 1994; 19: 2006~ 2008
- 12 Williams R L, Chase K M. IEEE International Conference on Plasma Science Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Plasma Science May 1997: 166
- 13 Gorobets V A, Petukhov V O, T ochitskiĭ S Ya *et al.* J Opt Technol, 1999; 66: 53~ 57
- 14 Williams R L, Gebre Amlak K D. Proceedings of the IEEE Particle Accelerator Conference The 18th Biennial Particle Accelerator Conference March 27~ April 2, 1999: 3681~ 3683
- 15 鲁敬平, 吕传信, 张雄军 *et al.* 强激光与粒子束, 1997; 9: 72~ 78

* * *

作者简介: 任德明, 男, 1968 年 8 月出生。博士, 副教授。现从事 CO₂ 激光技术、CO₂ 激光倍频技术、CO₂ 激光差分吸收技术研究。