

# 10 $\mu\text{m}$ 超短脉冲激光系统

曹洪如

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

A. W. Kalin R. Kesselring F. K. Kneubuhl

(*Infrared Physics Laboratory Institute of Quantum Electronics ETH Ch-8093 Zurich, Switzerland*)

**摘 要** 具有新颖表面电晕预电离单模 TEA  $\text{CO}_2$  激光器、等离子体开关和热吸池的光学自由诱导衰变(OFID)激光系统产生 30~300 ps 10.6  $\mu\text{m}$  激光。

**关键词** 超短脉冲,  $\text{CO}_2$  激光器, 红外激光。

## 1 引 言

红外超短脉冲激光在诸如激光化学、激光物理、激光生物和工程学等领域有着广泛的应用<sup>[1]</sup>, 近年来受到了很大的重视和发展。本文研究的中红外超短激光系统可以用作远红外的光泵源。这种中红外和远红外超短激光系统还可以用来研究半导体的带内跃迁、分子的非线性振动效应、高温超导体的带间隙等。

从红外超短  $\text{CO}_2$  激光的发展历史来看, 自从 Patel<sup>[2]</sup> 首次观察到连续  $\text{CO}_2$  激光之后, Caddes 等人<sup>[3]</sup> 首次报道用 GaAs 腔内声光调制的主动锁模产生 5 ns 的短脉冲。Wood 和 Schwarz<sup>[4]</sup> 用  $\text{SF}_6$  作被动 Q 开关产生 20 ns 的脉冲序列峰值功率达 100 kW。TEA  $\text{CO}_2$  激光器<sup>[5]</sup> 的出现使最大输出功率有一个飞跃的提升, 也使超短激光脉冲的发展有了新的方向。Gibson 等人<sup>[6]</sup> 用热  $\text{CO}_2$  饱和吸收体的被动锁模的 TE  $\text{CO}_2$  激光器中观察到 4 ns 的短脉冲。横向激励几个大气压(TEMA)  $\text{CO}_2$  激光器导致转动带激光线展宽和重迭, 从而产生一个宽得多的增益带宽。锁模 TEMA  $\text{CO}_2$  激光器业已产生 150 ps 激光脉冲<sup>[7]</sup>。锁模激光器所给出的为短脉冲序列。从这样的序列中获得单一的短脉冲激光并非易事。Yaldonovitch 等人<sup>[8]</sup> 提出了一个完全新的脉冲成形方案产生超短脉冲。他们用激光引起气体击穿作主动开关元件在热  $\text{CO}_2$  气体中的光学自由诱导衰变(OFID)产生 30~300 ps 可调变的单一超短脉冲, 并且具有极好的对比度。其它产生超短脉冲方案值得一提的是得用锗半导体中光感应载流子作开关。用这种锗开关在同步运转的锁模钕玻璃激光器和 TEA  $\text{CO}_2$  激光器系统中业已观察到 5 ps 的光脉冲输出<sup>[9]</sup>。联合两个这种半导体开关甚至已经获得了 130 fs 的 9.5  $\mu\text{m}$   $\text{CO}_2$  激光输出<sup>[10]</sup>。同光学自由诱导衰变方案相比较, 它所获得的单脉冲对比度差且输出功率相对低。

## 2 实验装置

本文的 10  $\mu\text{m}$  超短脉冲激光系统实验装置如图 1 所示。利用一个高压低气压混合激光系统产生单纵模运转的 10  $\mu\text{m}$   $\text{CO}_2$  激光输出, 由锗透镜聚焦至充有流动  $\text{N}_2$  气、截止时间只有数 ps 的等离子体开关。该光学开关的启动是经由激光触发的球隙和延时线路来实现的。这种光学开关可以被看作一个快速的幅值调制, 在频率域引起边频带。只要有一个合适的滤波器(热  $\text{CO}_2$  吸收池)抑制初始激光脉冲的频率就能形成一个超短脉冲。

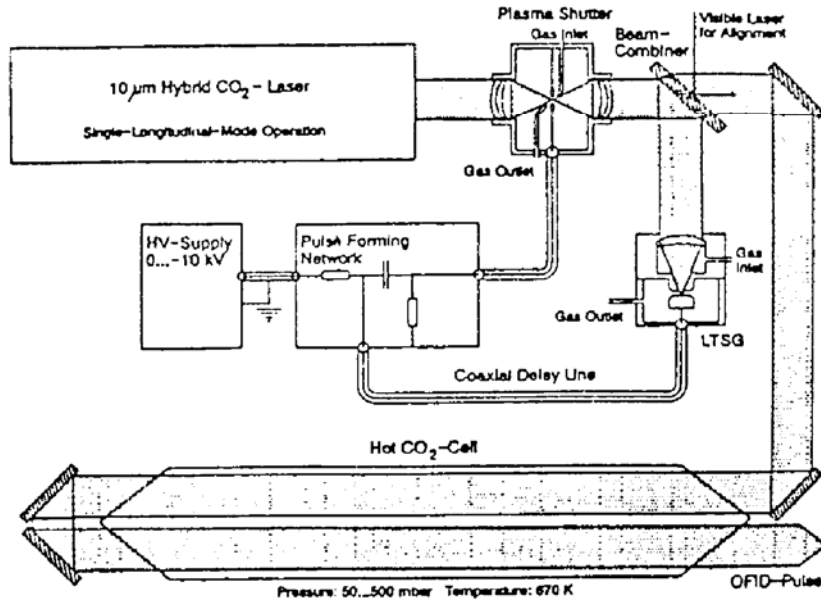


Fig. 1 Schematic of 10  $\mu\text{m}$  ultrashort pulse laser system

事实上超短光脉冲是由热  $\text{CO}_2$  气体中的光学自由诱导衰变产生的。加热  $\text{CO}_2$  气体是为了布居激光下能级从而增加  $\text{CO}_2$  激光的吸收。只要热吸收池足够长, 输入的光脉冲几乎完全被热  $\text{CO}_2$  气体吸收。输出的电场可以看作是输入光场和由吸收体的线性极化所产生电场干涉的结果。因为输入光束几乎完全被吸收了, 介质产生的场与输入光场有相同的幅值, 但相位差  $180^\circ$ 。假设输入光场忽略被切断, 热  $\text{CO}_2$  气体中分子的极化将继续在与横向弛豫时间相关的一段时间内辐射, 由于该波不再被输入光场干涉所抵消。横向弛豫时间依赖于热气体气压, 所以通过改变热气体气压在一定范围内可以改变输出脉冲宽度。

输入光脉冲必须在短于横向弛豫时间内在接近光脉冲峰值的地方被切断。这就不但需要有一个快速的光学开关和准确延时的触发线路, 还需要有一个在空域和时域稳定的激光脉冲。

### 2.1 单纵模运转的 $\text{CO}_2$ 激光系统

为了获得在空域和时域都稳定的激光脉冲通常需要激光器运转在单纵模、单横模状态。本文的  $\text{CO}_2$  激光系统包含有一个 70 cm 长、内径为 16 mm 的低气压纵向放电部分和一个由两段 40 cm 长电极串接的大气压横向放电部分的混合型  $\text{CO}_2$  激光系统。由于低气压部分产生的窄增益宽度有可能获得单纵模运转。而为了获得单横模运转除了用光阑对高阶横模进行限制外, 还必须获得大体积的均匀放电。本文发展了一种利用 Ernst 面型作横向放电电极、放电体积为 0.2 l、新颖的表面电晕预电电离 TEA  $\text{CO}_2$  激光器。

图 2 为 TEA  $\text{CO}_2$  激光器装置图。为了获得均匀的横向放电可以采用类 Blumlein 的快放电

电路。与阴极相联的铜片通过外面的绝缘介质膜片(2 mm PVC)同阳极之间发生电晕放电而使整个放电体积产生有效的预电离。同时为了使预电离源与放电体积更加接近,还采用一种更为紧凑的 Ernst 面型。

在横向放电高压激光器,为了获得大体积均匀放电通常采用张氏(T. Y. Chang)电极<sup>[11]</sup>。这种电极剖面在平滑性、紧凑性和场的均匀性方面比以往的 Rogowski、Bruce 和 Harrison 剖面更好<sup>[12]</sup>。从纯数学角度看,Ernst 剖面是在 Chang 剖面的保角度变换式中加入第三项得来的。

$$Z = W + K_0 \sinh W + K_1 \sinh 2W \tag{1}$$

式中以  $x, y$  为空间坐标,  $Z = x + iy, W = u + iv, u$  和  $v$  分别为电通量和电位函数。对于每一个  $v$  值( $|v| < \pi$ ), 对应的等电位剖面为

$$\begin{aligned} x &= u + K_0 \cos v \sinh u + K_1 \cos 2v \sinh 2u \\ y &= v + K_0 \sin v \cosh u + K_1 \cos 2v \cosh 2u \end{aligned} \tag{2}$$

式中  $u$  为剖面参量。由上式不能唯一地确定剖面,因为这里有三种独立变量  $K_0, K_1$  和  $v$ 。Ernst<sup>[13]</sup> 根据 Chang 剖面计算了这些变量后发现最佳均匀场时有:

$$v = \pi/2 \quad \text{和} \quad K_1 = [1 - (1 - K_0^2)]^{1/2}/4 \tag{3}$$

图 3 给出  $K_0 = 0.02$  时相对应的 Rogowski、Chang 和 Ernst 电极剖面。从图中清楚地看到,Ernst 剖面比 Rogowski 和 Chang 剖面更为紧凑。

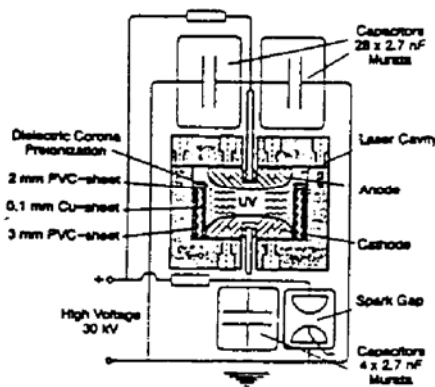


Fig. 2 Schematic configuration of the TEA CO<sub>2</sub> laser

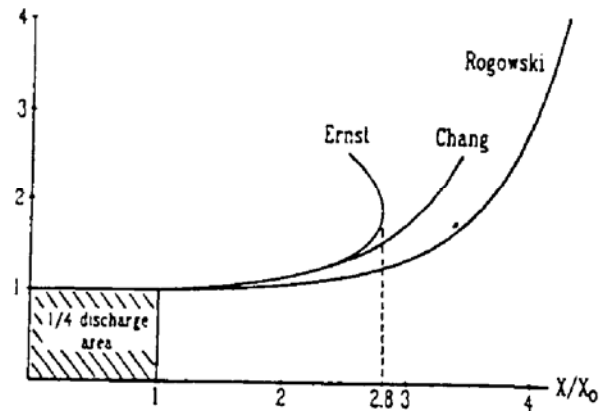


Fig. 3 Electrode profiles for  $k_0 = 0.02$  according to Rogowski, Chang and Ernst

### 2.2 等离子体开关

对于利用光学自由诱导衰变产生短脉冲来说,快速光学开关也是实验装置中的关键之一。会聚足够强度的激光束在空气中或者某种气体中就能形成一个自击穿等离子体,这就成了最简单的等离子体开关。但是这样的等离子体开关不可能精确地控制光学击穿总是发生在激光输出的峰值处。当然可以调整在开关里的气压使得自击穿发生在峰值附近。但是重复性很差,从而使超短脉冲的强度起伏很大。

Kowk<sup>[14]</sup> 首先提出用焦点附近的光触发。充有某种纯气体的开关装置可避免激光的自击穿。当光束中一部分经延迟后聚焦在主光束旁的靶面上时,在靶面上形成的等离子体导致主光束的击穿。为了改进这种形式的光学触发以及减少麻烦的调整,研究了另外一种电触发方案。让一个受控制的电弧放电直接通过主光束的聚焦区而不是象通常的电触发方案那样表面

放电发生在主光束聚焦区的外面。但是该方案需要几千伏的高电压和应用于高电压脉冲的快速高电压开关。TEA 激光器的触发脉冲和输出激光脉冲之间的拌拦动时间在 200 ns 量级, 不能用该触发脉冲去触发等离子体开关。

在实验中, 用同轴激光触发的火花球隙(LTSG, 见图 4)作高电压快速开关。抛光的黄铜电极的间隙为 1 mm。从主光束来的约 1% 激光经 1.5 英寸焦距 ZnSe 透镜聚焦通过镀增透膜 ZnSe 窗口和阳极上 1.5 mm 直径的小孔达阴极之上。ZnSe 透镜安置在 LTSG 的外面以便精确地调整焦点。实验表明当焦点在靶电极之后约 1~2mm 时延迟和抖动为最小。LTSG 经同轴电缆连接一个简单的脉冲形成线(上升时间小于 2 ns), 达到等离子开关里的两个触发电极。

### 2.3 热吸收池

前面提到一个迅速截断的光脉冲通过一个适当的滤波器时能产生超短脉冲。这种特殊的滤波器的作用就是衰减激光波长而让迅速形成等离子体发生的边带频率通过。很显然利用  $\text{CO}_2$  气体对激光的共振吸收可做成这种特殊的滤波器。为了提高气体的吸收系数, 有必要加热气体以便增加激光下能级的布居。实验上发现当气体温度在 400~900 $^\circ\text{C}$  时吸收系数几乎是常量。

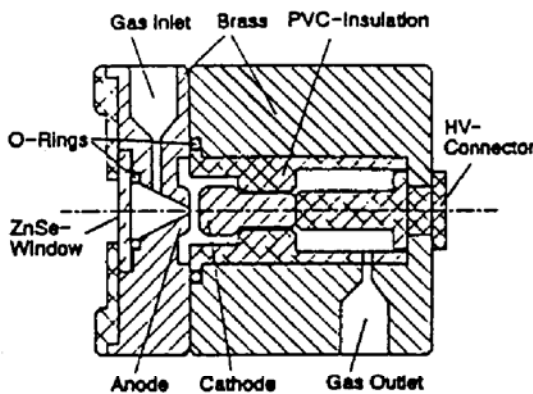


Fig. 4 Cross-section of the laser triggered spark gap

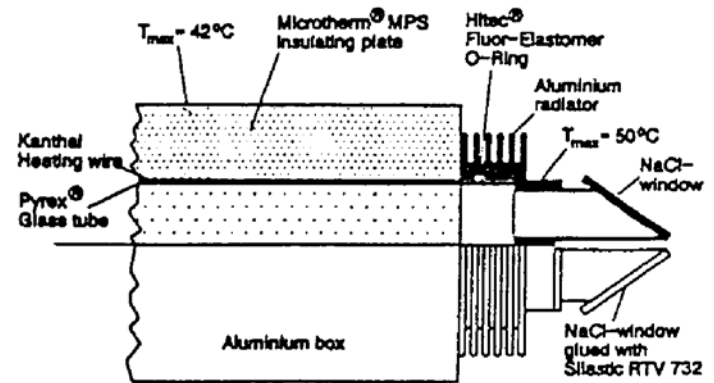


Fig. 5 The hot  $\text{CO}_2$  cell

实验所用的热吸收池如图 5 所示。池体是由内径为 77 mm 外径为 85 mm 的 Pyrex 玻璃制成的。三种不同长度的管子分别为 1.5、3 和 4 m。为了避免横向的温度梯度引起折射率梯度而导致光束的横向偏转, 将池体装入含有绝热材料的 0.8 mm 铝皮弯成的管子里。池体玻璃管的两端通过耐高温的 O 形圈与铝质散热器连接。这是因为 O 形圈只能耐 200 $^\circ\text{C}$  的高温而池体温度在 400  $^\circ\text{C}$  以上

## 3 实验结果及讨论

一个高功率脉冲  $\text{CO}_2$  激光器通常存在多个纵模同时运转。这就使输出激光脉冲出现不同程度锁模现象。为了获得稳定、光滑的脉冲输出就必须使激光器运转在单模状态。在混合式  $\text{CO}_2$  激光体系中低气压连续放电区具有比腔纵模窄的增益宽度, 使得在该增益宽度内的某一纵模有额外增益从而获得单纵模输出。低气压连续放电区可以运转在激光振荡阈值之下, 也可以运转在阈值之上。如图 6 所示 A 是在连续放电区运转在阈值之下。B 是在阈值之上, 单独运转时的总功率输出约为 3 W。很明显 A 的峰值功率比 B 要大, 然而 A 和 B 的总能量相等。相对放电而言, B 的激光振荡要比 A 早几十纳秒。

改变连续放电区的气压和激光腔长,可以在一个增益宽度内具有两个纵模。图 7 中的 A 就是典型的两个模拍频现象,很强的调制表明两个纵模具有几乎相同的幅值。用压电陶瓷来微调腔长使其中一个模的增益减小,而另一个模的增益加大,观察到这种拍频现象逐步减弱。最终获得了只有一个纵模运转的 B。它是一个输出功率相对稳定,脉冲波形光滑的激光输出。该激光器主要参量由表 1 给出。

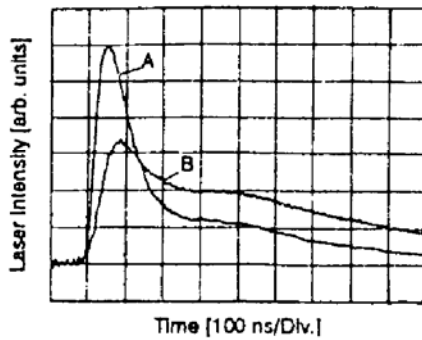


Fig. 6 Single mode pulse from a hybrid CO<sub>2</sub> laser. A; The CW section operates under the laser threshold. B; The CW section lasing over the threshold

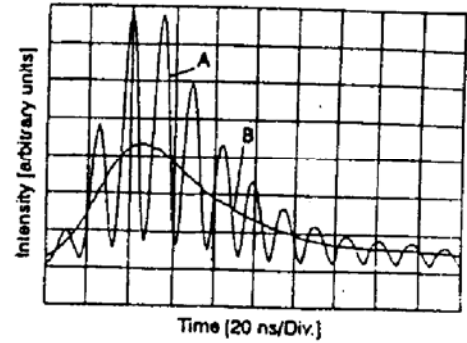


Fig. 7 A two mode beating pulse train (A) and a single mode pulse (B) from a hybrid CO<sub>2</sub> laser

Table 1. Characteristic data of the hybrid 10 μm CO<sub>2</sub> Laser

resonator length	2.3 m
discharge volume	0.2 l
storage capacitor	2 × 75 nF
operating voltage	30 kV
TEA discharge length	2 × 40 cm
CW discharge length	70 cm
pulse energy	1.0 J
peak power (SLM)	7 MW
repeating rate	2 Hz
total gas flow	4.5 l/min
gas mix (CO <sub>2</sub> : N <sub>2</sub> : H <sub>2</sub> )	32 : 7 : 61

测试了激光触发火花球隙的启动延迟和抖动时间对会聚在阴极上不同的激光能量以及自击穿电压之间的关系(见图 8)。随着激光能量递增,延迟下降。当电压从 97% 减小时,延迟时间的递增几乎是线性的。但是电压约为 60% 自击穿电压时,延迟和抖动时间会迅速增加。对于 37 mJ 激光能量,电压在 14% 自击穿电压时,激光触发火花球隙仍可启动,而对于 5 mJ 激光能量电压小于 65% 自击穿电压时,触发就不稳定。实验中作者用大约 10 mJ 激光来启动激光触发火花球隙。为使抖动减至最小,触发电压应选在 80% 自击穿电压或略高,此时抖动时间小于 5 ns。图 9 示出用等离子体开关截断的激光脉冲。

通常对短于 1 ns、10 μm 激光脉冲不可能直接测出其脉冲宽度和真实波形。这是由于现有的红外探测器上升时间和示波器带宽的限制。然而这种直接测量对观察是否有短脉冲发生还是有价值的。实验时用 P5-00 型热电探测器 (Molection Inc. USA) 和 PDM-2 光子牵引探测器以及 Tektronix 7912 HB 示波器进行直接光脉冲测量。图 10 给出热吸收池不同气压对超短激光脉冲的直接测量结果。当光脉冲上升时间小于探测系统的上升时间时,探测器系统对超短脉冲是一个积分过程。因而测得信号的峰值正比于脉冲能量。假定对热吸收池的不同气压,测量信号的峰值是常数。可用简单的方法估算出脉宽与热吸收池气压之间的关系。

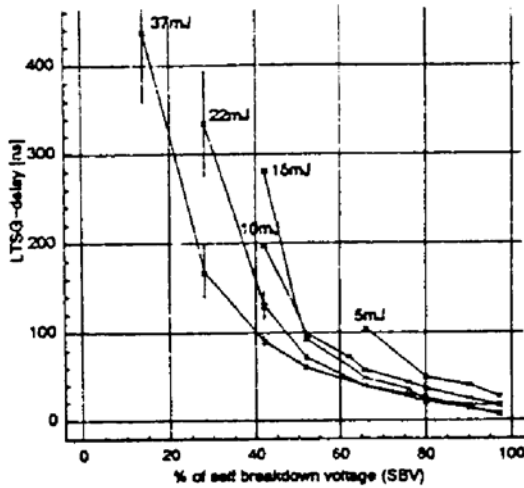


Fig. 8 Delay of LTSG firing vs applied SBV for various pulse energies. The jitter for pulse energies of 22 and 37 mJ is also indicated

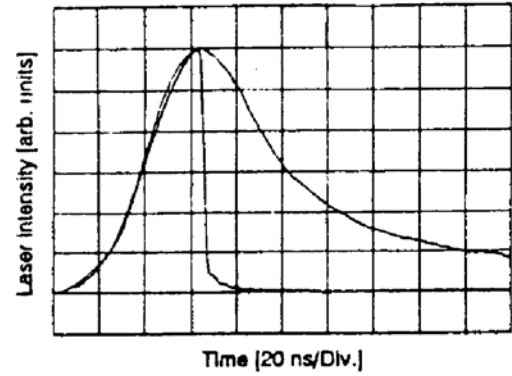


Fig. 9 Truncated and untruncated single mode CO<sub>2</sub> laser pulse

在实验中用基于二次谐波发生的光学自相关函数技术来测量超短脉冲宽度。所用的非线性晶体是 ZnSe 和 GaAs。典型的测量数据由图 11 给出。图中显示相关测量的噪声较大，这主要是受激光单纵模稳定度的影响。整个测量具有 531 个测量点，而每个测量点需作 10 次平均，所需时间为 5 个半小时。TEA 激光器的稳定度为 ±5%，而二次谐波产生信号的波动约为 ±10%。如果有纵模的拍频存在时，这种波动就会更加厉害。光学自由诱导衰变激光系统输出脉宽为 33 ps 时，单脉冲能量约为 99 μJ 而相应的峰值功率达 3 MW。当热 CO<sub>2</sub> 吸收池的气压在 (7~1) × 10<sup>4</sup> Pa 变动时，相应的激光脉冲可在 30~300 ps 之间调变。

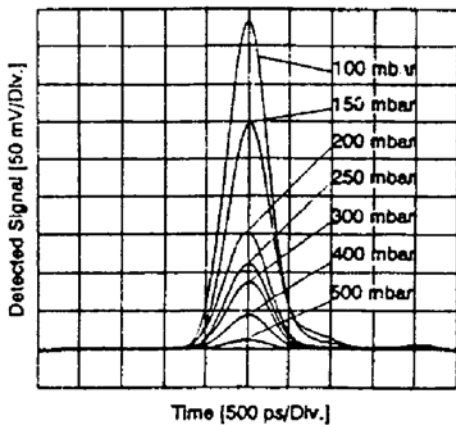


Fig. 10 The direct measurement of ultrashort laser pulses for various pressures of the hot CO<sub>2</sub> gas

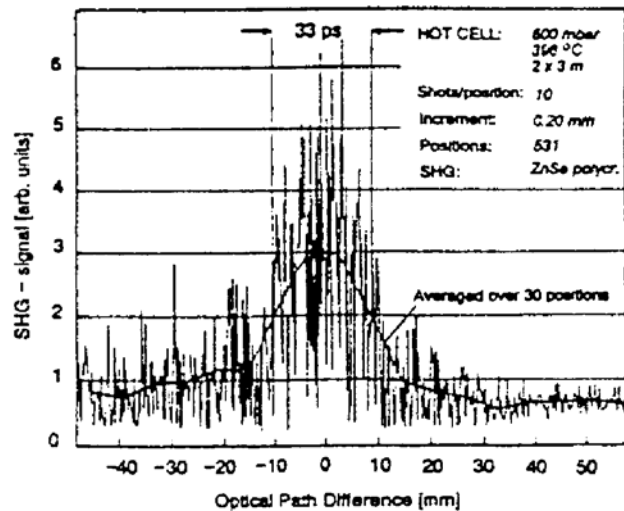


Fig. 11 The typical laser pulse duration measured with optical autocorrelation method

**结 论** 本文发展了一种新颖的表面预电离 TEA CO<sub>2</sub> 激光器利用更为紧凑的 Ernst 面型作横向放电电极，成功地实现了大体积均匀放电，获得了输出能量达到 1 J，峰值功率为 7 MW，重复频率为 2 Hz 单频 10 μm 激光输出。运用等离子体开关作快速光学开关，用热吸收池的饱和吸收作滤波器，获得了脉宽 30 ps 峰值功率达数兆瓦的超短激光输出。利用改变热气压的



方法可以调变输出激光脉冲宽度。与通常的锁模技术比较,该方法可以产生几乎是无本底的脉宽可调变的单脉冲激光。该方法所产生的超短脉冲宽度的极限似乎是 30 ps,这主要是由等离子体开关的有限速度来决定。在该激光系统中获取稳定的超短激光输出的关键是单频 TEA CO<sub>2</sub> 激光脉冲的产生和稳定触发等离子开关的方法。

### 参 考 文 献

- [1] S. L. Shapiro (editor), *Ultrashort Light Pulses Picosecond Technique and Pulses. Topics in Applied Physics*, Springer-Verlag, Berlin 1977, 18: 123~371
- [2] C. K. N. Patel, Continuous-wave laser action on vibrational-rotational transitions of CO<sub>2</sub>. *Phys. Rev. (A)*, 1964, 136: 1187~1189
- [3] D. E. Caddes, L. M. Osterink, R. Targ, Mode locking of the CO<sub>2</sub> laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1968, 12(3): 74~76
- [4] O. R. Wood, S. E. Schwarz, Passive mode locking of CO<sub>2</sub> laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1968, 12(8): 263~265
- [5] A. J. Beaulieu, Transversely excited atmospheric pressure CO<sub>2</sub> lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1970, 16(12): 504~505
- [6] A. F. Gibson, M. F. Kimmit, C. A. Rosito, Passive mode locking of a high-pressure CO<sub>2</sub> laser with a CO<sub>2</sub> saturable absorber. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, 18(12): 546~548
- [7] A. J. Alcock, A. C. Walker, Generation and detection of 150 P-sec mode-locked pulses from a multi-atmosphere CO<sub>2</sub> laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1974, 25(5): 299~301
- [8] E. Yablonovitch, J. Goldhar, Short CO<sub>2</sub> laser pulse generation by optical free induction decay. *Appl. Phys. Lett.*, 1974, 25(10): 580~582  
H. S. Kwok, E. Yablonovitch, 30-psec CO<sub>2</sub> laser pulses generated by optical free induction decay. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, 30(3): 158~160
- [9] S. A. Jamison, A. V. Numikki, Generation of picosecond pulses of variable duration at 10.6 μm. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, 33(7): 598~600
- [10] C. Rolland, P. B. Corkum, Generation of 130-fsec midinfrared pulses. *J. Opt. Soc. Am.*, 1986, B3(12): 1625~1629
- [11] T. Y. Chang, Improved uniform field electrode profiles for TEA laser and high-voltage applications. *Rev. Sci. Instrum.*, 1973, 44(4): 405~407
- [12] 曹洪如, 张氏电极的设计计算程序. *应用激光联刊*, 1983, 3(5): 61~64
- [13] G. J. Ernst, Uniform-field electrodes with minimum width. *opt. Commun.*, 1984, 49(4): 275~277
- [14] H. S. Kwok, E. Yablonovitch, A simple self-triggered plasma shutter. *Opt. Commun.*, 1977, 21(4): 252~254

## A 10 μm Ultrashort Pulse Laser System

Cao Hongru

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Hefei 230031)

A. W. Kalin R. Kesselring F. K. Kneubuhl

(Infrared Physics Laboratory Institute of Quantum Electronics ETH Ch-8093 Zurich, Switzerland)

(Received 26 November 1993; revised 7 March 1994)

**Abstract** 10 μm laser pulses with a duration of 30~300 ps is produced by a optical free induction decay (OFID) laser system with a single mode TEA CO<sub>2</sub> laser preionized by a novel surface corona discharge, and with plasma shutter and hot absorber cell.

**Key words** ultrasort pulse, CO<sub>2</sub> laser, infrared laser.