

紫外预电离 20 W XeCl 准分子激光器的研究

霍芸生 楼祺洪 魏运荣 董景星 丁爱臻 丁泽安 高鸿奕

(中国科学院上海光机所, 201800)

提要: 从一台紫外预电离 XeCl 激光器中得到单脉冲能量 ~ 400 mJ、平均功率 22 W 的激光输出, 其总体效率约 2%。分析和实验测量表明, C-C 能量转移效率对激光器的工作特性有着重要影响。

关键词: 准分子激光器, 脉冲重复频率

A 20 W XeCl excimer laser with automatic UV preionization

Huo Yunsheng, Lou Qihong, Wei Yunrong, Dong Jinxing, Ding Aizhen, Ding Ze'an, Gao Hongyi

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: A pulsed laser energy of ~ 400 mJ and an average power of 22 W have been obtained from a XeCl excimer laser with automatic UV preionization, the overall laser efficiency is $\sim 2\%$. It is indicated by both theoretical analyses and experimental measurements that the efficiency of C-C energy transfer has significant effect on the characteristics of excimer lasers.

Key words: excimer laser, pulse repetition rate

工作在紫外波段的准分子激光器在激光化学、激光材料处理、激光医学及光电子工业中有着广阔的应用前景。采用自动预电离及 C-C 能量转移技术的放电型 XeCl 准分子激光器, 作为一种实用化的器件, 近年来得到了很快的发展。它结构紧凑, 主放电对预电离之间的时延可自动得到满足, 与横向气体流动技术结合, 可以在高重复频率条件下稳定运转^[1~3]。

在 C-C 能量转移过程中, 激光器气体介质击穿前, 转移到峰化电容器上的电能与储能电容器所贮电能的比率, 对激光器的总体效率有着重要影响^[4, 5]。在我们研制的一台重复频率 XeCl 准分子激光器中, 选用储能与峰化电容之比 $C_1/C_2 < 1$ 。在高充电电压条件下, 实现了较高的 C-C 能量转移效率。获得激光输出能量 400 mJ 及总体激光效率 2%。当脉冲重复频率为 65 pps 时, 常规运转下激光器平均输出功率为 22 W。100 pps 时最大输出功率大于 40 W。

一、实验装置

激光器结构简图及 C-C 转移等效电路示于图 1。激光器放电部分的阳极为张氏电极, 阴极为平面网状电极。阴阳极间距为 3cm, 有效放电体积 $3 \times 2 \times 50$ cm³。为使主放电回路有低电感及高泵浦功率密度, 采用 C-C 转移电路。储能电容 C_1 为低感 Maxwell 电容器, 峰化电

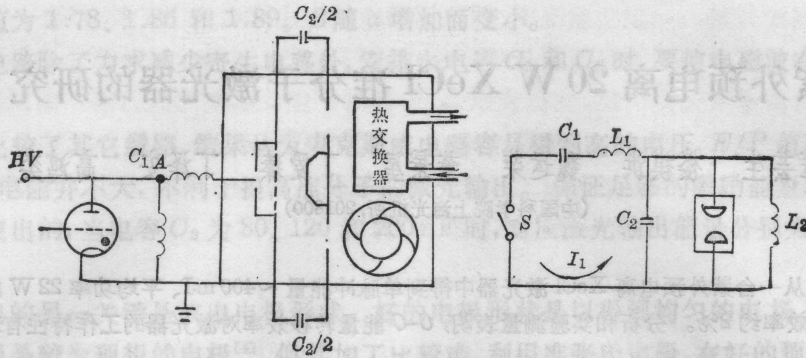


图1 激光器结构简图及C-C转移等效电路图

容 C_2 由约 20 个容量为 2.7 nF 的陶瓷电容并联组成。在电荷由 C_1 向 C_2 转移过程中, 击穿多组相互并联的预电离火花隙。所产生的紫外辐射穿过网状阴极, 在放电区产生均匀的预电离, 并使主放电对预电离的时间延迟自动得到满足。实验中使用的开关元件为国产 4060 型阴极接地闸流管。其最高工作电压为 40 kV, 平均电流约 1 A。为使器件在高重复频率条件下获得均匀放电, 激光器内安装了横切风机及热交换器, 放电区气体流速约 10 m/s。

二、C-C 转移电路分析

C-C 转移电路的等效电路如图 1 中所示。其中 C_1 、 C_2 分别为储能电容及峰化电容, L_1 为包括预电离火花隙在内的转移电路电感。从闸流管 S 开始导通到激光器气体击穿前, 电流 I_1 随时间的变化满足方程

$$L_1 \frac{dI_1}{dt} + \int_0^t I_1 \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) dt = V_0 \quad (1)$$

其中 V_0 为充电电压。解方程 (1) 可得

$$I_1 = V_0 \cdot \sqrt{C/L_1} \sin \omega t \quad (2)$$

其中 $C = C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$, $\omega = 1 / \sqrt{L_1 C}$ 。因此峰化电容 C_2 的电压 V_2 随时间的变化为

$$V_2 = \frac{-\beta V_0}{1 + \beta} \cdot (1 - \cos \omega t) \quad (3)$$

这里 $\beta = C_1 / C_2$ 。由式 (3) 显然可见, 当 $\omega t = \pi$ 时, $|V_2|$ 达最大值, $V_{2\max} = 2\beta V_0 / (1 + \beta)$ 。与此相对应的电压转移效率 η_V 及能量转移效率 η_T 分别为

$$\eta_V = V_{2\max} / V_0 = \frac{2\beta}{1 + \beta} \quad (4)$$

$$\eta_T = \frac{1}{2} C_2 V_{2\max}^2 / \frac{1}{2} C_1 V_0^2 = \frac{4\beta}{(1 + \beta)^2} \quad (5)$$

由 (4)、(5) 两式所算得的 C-C 转移电路的电压及能量转移效率随 β 的变化如图 2 所示。当 $\beta = 1$ 时, η_T 有最大值。对于 $\beta > 1$ 及 $\beta < 1$ 的区域, η_T 均随 β 与 1 偏离的增大而下降。但是电压转移效率 η_V 随 β 的增大单调上升。

对准分子激光器的实验测量及理论分析表明, 对于激光有贡献的电能, 主要由工作气体开始击穿时, 峰化电容 C_2 所贮存的能量 $C_2 V_2^2 / 2$ 所决定^[5]。此击穿电压随激光器电极间距、工

作气压、气体比分及转移电路电感大小等因素而改变,呈现较复杂的变化关系。但是通常 V_b 小于理论值 V_{2max} , 因而对 $C-C$ 转移电路所能获得的电压及能量转移效率有着较大影响。

在一些准分子激光器中,选择参数 $\beta \geq 1$ ^[4,5]。其优点是 $\eta_V > 1$, 而 η_T 亦接近 1, 因而在较低的充电电压值 (V_0) 即可得到较高的总体激光效率。而随着 V_0 的提高, 虽然激光输出能量仍在提高, 但由于击穿相角 ωt_b 的逐渐提前, V_b 与 V_0 的差别逐渐增大, 此时 η_T 实际所能得到的值, 将远低于理论值, 总体激光效率也随之迅速下降^[4,5]。

若选择 $\beta < 1$, 其对应的 $\eta_V < 1$ 。当充电电压 V_0 较低时, 由于器件的 E/P 值较低, 因而总体激光效率也较低。但在高充电电压条件下, 由于 V_b 与图 2 中 V_{2max} 的理论值偏差不大, 因而仍能维持较高的 η_T 值, 有可能在获得较高的激光输出能量的同时, 维持较高的总体激光效率。

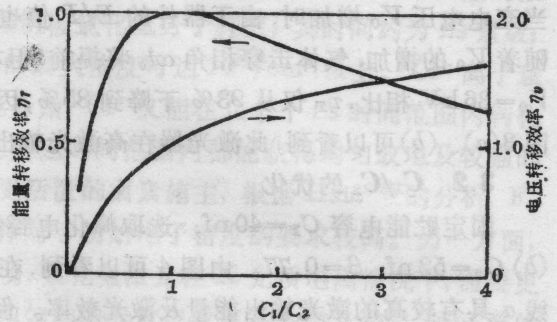


图 2 能量转移效率 η_T 及电压转移效率 η_V 随 C_1/C_2 的变化

三、实验结果及讨论

3.1 激光能量及效率随充电电压的变化

选取贮能电容 $C_1 = 30 \text{ nf}$, 峰化电容 $C_2 = 48 \text{ nf}$, 相应的 β 值为 0.625。由(4)、(5)两式得到 η_V 、 η_T 的理论值分别为 0.77 及 0.95。在图 3(a)中给出了实验测得的激光器气体击穿电压随充电电压 V_0 的变化, 当 V_0 从 26 kV 增加到 36 kV 时, V_b 从 19.6 kV 上升到 25.6 kV, 相应的 η_T 在 0.75 至 0.71 之间变动, 略低于 η_V 的理论值 0.77。在上述 V_0 范围内, 除了阈值附近区域以外, 激光输出能量 E_L 近似线性上升。

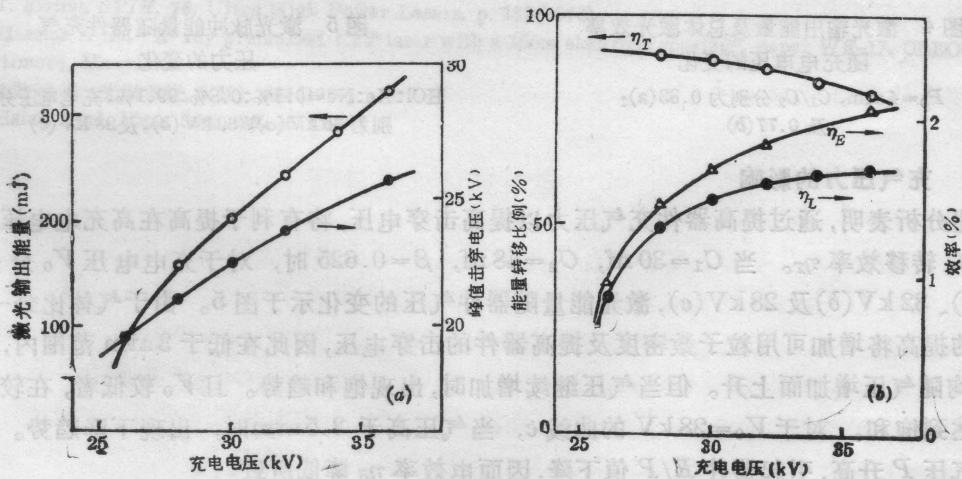


图 3 (a) 激光脉冲能量, 峰值击穿电压; (b) $C-C$ 能量转移比率及激光效率随充电电压的变化

$C_1 = 30 \text{ nf}$, $C_2 = 48 \text{ nf}$, $P_g = 4 \text{ atm}$

由图 3(a) 所示 $E_L \sim V_0$ 及 $V_b \sim V_0$ 曲线所算得的激光总体效率 $\eta_L = E_L / \frac{1}{2} C_1 V_0^2$, 能量转移效率 $\eta_T = \frac{1}{2} C_2 V_b^2 / \frac{1}{2} C_1 V_0^2$, 及电效率 $\eta_E = E_L / \frac{1}{2} C_2 V_b^2$ 随 V_0 的变化如图 3(b) 所示。当充电电压 V_0 增加时, 由于器件的 E/P 值也随之增大, 因此电效率 η_E 有显著的上升。虽然随着 V_0 的增加, 气体击穿相角 ωt_b 将提前, 但在本实验所选用的 β 值条件下, 以 $V_0 = 26 \text{ kV}$ 与 $V_0 = 36 \text{ kV}$ 相比, η_T 仅从 93% 下降到 85%, 因而总体效率 $\eta_L = \eta_T \cdot \eta_E$ 随 V_0 的升高而增大。由图 3(a)、(b) 可以看到, 此激光器在高激光输出能量处, 获得较高的总体激光效率。

3.2 C_1/C_2 的优化

固定贮能电容 $C_1 = 40 \text{ nf}$, 选取峰化电容量 C_2 及相应的 β 值: (a) $C_2 = 48 \text{ nf}$, $\beta = 0.83$; (b) $C_2 = 52 \text{ nf}$, $\beta = 0.77$ 。由图 4 可以看到, 在充电电压 V_0 低于 28 kV 时, 具有较高 β 值的曲线 a 具有较高的激光输出能量及激光效率。但当 V_0 高于 30 kV 时, (b) 优于 (a)。在 $V_0 = 34 \text{ kV}$ 处, 用 $C_2 = 52 \text{ nf}$ 所得到的激光脉冲能量为 480 mJ, 效率约为 2%。

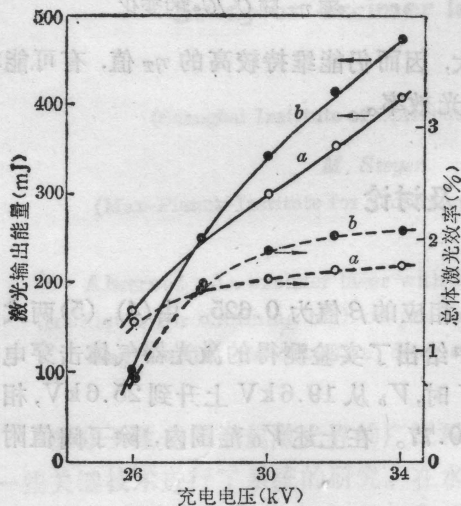


图 4 激光输出能量及总体激光效率随充电电压的变化

$P_0 = 4 \text{ atm}$, C_1/C_2 分别为 0.83(a); 及 0.77(b)

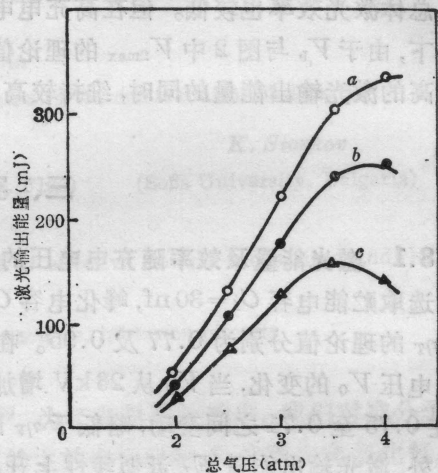


图 5 激光脉冲能量随器件充气压力的变化

$\text{HCl}:\text{Xe}:\text{Ne} = 0.1\%:0.8\%:99.1\%$, 充电电压分别为 36 kV(a), 32 kV(b), 及 28 kV(c)

3.3 充气压力的影响

上述分析表明, 通过提高器件充气压力以提高击穿电压, 将有利于提高在高充电电压条件下的 $C-C$ 转移效率 η_T 。当 $C_1 = 30 \text{ nf}$, $C_2 = 48 \text{ nf}$, $\beta = 0.625$ 时, 对于充电电压 V_0 分别为 36 kV(a)、32 kV(b) 及 28 kV(c), 激光能量随器件气压的变化示于图 5。由于气体比分一定, 总气压的提高将增加可用粒子数密度及提高器件的击穿电压, 因此在低于 3 atm 范围内, 曲线 a、b、c 均随气压增加而上升。但当气压继续增加时, 出现饱和趋势。且 V_0 较低者, 在较低气压处即达到饱和。对于 $V_0 = 28 \text{ kV}$ 的曲线 c, 当气压高于 3.5 atm 时, 出现下降趋势。这可归因于气压 P 升高, 引起器件 E/P 值下降, 因而电效率 η_E 降低所致。

3.4 电压、电流波形

在图 1 中的 A 点所测得的激光室放电电压及闸流管的阳极电流的同步波形图分别示于

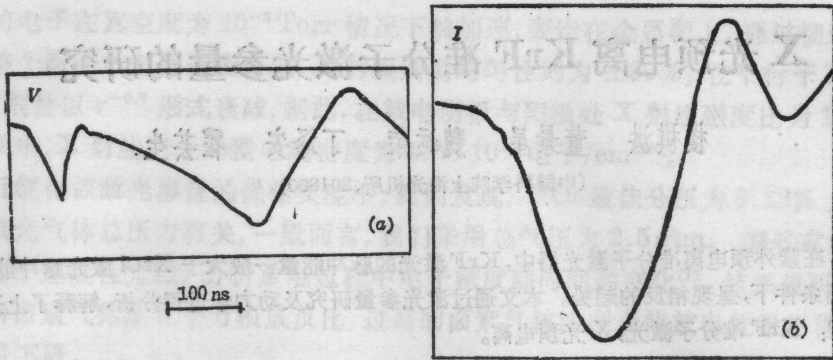


图 6 激光室电压波形(a)及闸流管阳极电流波形(b)

图 6 的(a)与(b)。闸流管电流的峰值约为 6.4 kA, 电流上升时间约 100 ns, 峰化电容 C_2 上的电压上升时间约 180 ns。由图 6(a) 可以看到, 在电压波形的首部, 有一幅度较小的次峰, 它与预电离火花隙的击穿相对应。即在闸流管开始导通后, 经过大约 65 ns, 图 1 中测量点 A 的电压上升到 16 kV 时, 预电离火花隙才击穿, 并开始对峰化电容 C_2 充电。在此期间内, 由图 6(b) 可见闸流管阳极电流很小。由于闸流管在施加触发脉冲后约 100 ns 时间内, 其阳极管压降处于由大而小以至最终稳定在 150 V 左右的变换过程之中, 因此阳极电流相对于触发脉冲的这种数十个 ns 的延迟, 对于减小闸流管的功耗应是有利的。

3.5 重复频率运转

$C_1=30$ nf, $C_2=48$ nf, 充电电压 $V_0=34$ kV 时, 平均激光功率与脉冲重复频率的关系如图 7 所示。当重复频率为 65 Hz 时, 平均激光功率约为 22 W。由图 7 可见, 在脉冲重复频率低于 50 Hz 范围内, 平均功率随重复频率基本成线性上升。但在更高重复频率处, 平均功率上升的速率已偏离线性。增加放电区气体流速当使器件可工作于更高的重复频率处, 并进一步提高激光器件的平均功率输出。

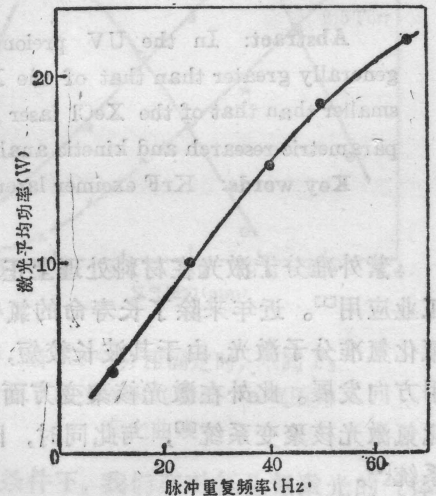


图 7 激光平均功率随脉冲重复频率的变化

参 考 文 献

- 1 Manlio Matera et al., *Rev. Sci. Instrum.*, **56**(2), 205(1985)
- 2 V. M. Borisov et al., *Sov. J. Quant. Electr.*, **17**(5), 595(1987)
- 3 堀田和明, $\nu-\nu$ -研究, **16**(4), 191(1988)
- 4 Kenzo Miyazaki et al., *Rev. Sci. Instrum.*, **56**(2), 201(1985)
- 5 Kenzo Miyazaki et al., *J. Appl. Phys.*, **60**(8), 2721(1986)