

采用磁压缩器的 XeCl 准分子激光器

楼祺洪 祁建平 王润文 魏运荣 丁爱臻 董景星 丁泽安 吴国庆

(中国科学院上海光机所)

提要: 研究了采用磁压缩器的 XeCl 准分子激光器特性。采用这种技术可将电流脉冲上升时间从 200 ns 压缩到 50 ns, 计算了电流脉冲的增幅和压缩现象, 并解释了反向电流幅度减小的原因; 给出了旁路电感对压缩效果的影响。

An XeCl excimer laser with magnetic compressor

Lou Qihong, Qi Jianping, Wang Runwen, Wei Yunrong

Ding Aizhen, Dong Jinxing, Ding Zian, Wu Goqing

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

Abstract: The characteristics of an XeCl excimer laser using magnetically assisted switch techniques were investigated. The pulse rise time discharge current was compressed from 200ns to 50ns, and the amplitude of reversal current was reduced extraordinarily. These results are in good agreement with theoretical calculated ones. The effects of by-pass inductance on the compression were discussed.

一、引言

为了提高准分子激光器的重复频率和延长激光器的工作寿命, 在放电回路中加入磁饱和和线圈被认为是关键技术之一^[1]。当磁饱和和线圈流经的电流较小时, 它具有较大的电感值, 阻止电流值的变化, 使回路处于关闭状态; 当电流增大到一定值时, 磁饱和和线圈的磁性材料达到饱和, 磁导率 μ 趋近于 1, 电感突然变小。其结果使回路电流发生突变, 因此它具有压缩脉冲的特性, 称为磁压缩器。

经过磁压缩器的快速变化, 电脉冲具有很短的上升时间, 有利于形成大体积均匀脉冲雪崩放电。另一方面, 它允许磁压缩器前面使用的开关元件在较长的脉宽下工作, 从而承受较小的电流和电流变化率 $\frac{dI}{dt}$ ^[2]。无论对闸流管或球隙均可大大延长它的使用寿命。

本文从理论上分析采用磁压缩器后脉冲电流的压缩效果, 在实验上设计研制了磁饱和和线圈, 并将它应用于 X 射线预电离激光器

收稿日期: 1985年8月3日。

中, 实验观察到电流脉冲宽度从 200 ns 压缩到 50 ns。为设计一个最佳的压缩线路, 我们还研究了旁路电感对压缩效果的影响。

二、理论分析

如图 1 所示, (a) 图表示一般实验中采用的电容转移放电路, 电容 C_1 由直流电源充电至 V_0 , 当开关元件 K 导通后, C_1 上的电能转移到 C_2 , 一旦 C_2 上的电压超过激光器的击穿值, 激光开始放电。在本实验中我们加入磁饱和线圈 L_m 。图 1(a) 的等效线路由图 1(b) 给出, 其中 L_k 是开关 K 导通后的线路中的分布电感, R 为开关 K 导通后线路中的分布电阻。

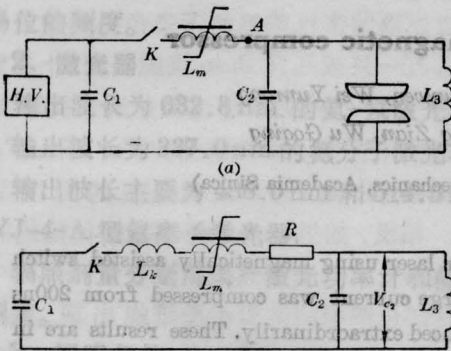


图 1

(a) 采用磁压缩器的激光放电电路; (b) 等效线路。
($C_1=27\text{ nF}$; $C_2=18\text{ nF}$; $L_3=8\text{ }\mu\text{H}$; $R=0.5\text{ }\Omega$)

对电容 C_2 的充电过程可以用如下微分方程来描述:

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} + Ri + \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \int i dt = 0; \\ i|_{t=0} = 0; \\ V_{c_2}|_{t=0} = -V_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $L=L_k+L_m$; L_m 为磁饱和线圈的电感值。令:

$$C=C_1C_2/(C_1+C_2);$$

$$b=R/2L;$$

$$\omega = \left(\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2} \right)^{1/2};$$

可求得电流 i 的随时间变化表达式:

$$i = -\frac{V_0C_1}{\omega LC} e^{-bt} \sin(\omega t) \quad (2)$$

若 $\frac{di}{dt}=0$, $|i|$ 达最大值, 此时可求得电流达

到最大值时的时间 t_0 :

$$\begin{aligned} t_0 &= \frac{1}{\omega} \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega}{b} \\ &= \frac{1}{\omega} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{4L}{R^2C} - 1 \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (3)$$

电容 C_2 上的电压 V_{C_2} 可表示为:

$$\begin{aligned} V_{C_2} &= \frac{V_0C_1}{C_1+C_2} \\ &\left[1 - \frac{1}{\omega\sqrt{LC}} e^{-bt} \sin(\omega t + \varphi) \right]; \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\omega}{b} \right)$;

由(4)式也可以求出电压上升时间 t_1 :

$$t_1 = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - b^2}}; \quad (5)$$

在磁饱和线圈不存在时, $L=L_k$, 由方程(2)计算的电流波形由图 2 (上) 中的虚线给出。计算所用的参量由图注中给出。在存在磁饱和线圈 L_m 时, 由于 L_m 的未饱和电感很大, 回路电流很小。当经过一段时间 Δt 后, 电感器磁芯很快饱和, $\mu \rightarrow 1$, 电流发生突变, 在本文条件下 $\Delta t \sim 100\text{ ns}$ 。因此在电流波形计算中出现一个较窄的电流脉冲。但是上述模型还未真正反映电感饱和后的特性, 由于磁饱和线圈在饱和前电感 L_m 很大, 储存了一部分电能, 电流的变化使得饱和线圈产生相应的感生电动势 V_m 。根据磁饱和和电感公式^[3, 4]:

$$\phi = \int V dt = NA \Delta B$$

$$V_m = \frac{\phi}{T_{\text{sat}}} = \frac{\int_0^{T_{\text{sat}}} V \cdot dt}{T_{\text{sat}}} = \frac{NA \Delta B}{T_{\text{sat}}} \quad (6)$$

式中 N 为磁饱和线圈的电感匝数; A 为磁性材料的横截面; ΔB 为磁性材料的饱和磁通密

度; T_{sat} 为使磁性材料达到饱和状态所需要的时间。因此当磁饱和和线圈一旦饱和时,回路中的电压应是电容 C_1 上的电压 V_0 加上磁饱和和线圈上的感生电动势 V_m 之和。根据以上分析可求得存在磁饱和和线圈后的电流波形:

$$\begin{cases} i(t) = -\frac{V_0 C_1}{\omega(L_k + L_m)C} e^{-bt} \sin(\omega t), t \leq \Delta t \\ i(t) = -\frac{(V_0 + V_m) C_1}{\omega' L_k C} e^{-b't} \sin(\omega' t), t > \Delta t \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\omega = \left(\frac{1}{(L_k + L_m)C} - \frac{R^2}{4(L_k + L_m)^2} \right)^{1/2}$; $\omega' = \left(\frac{1}{L_k C} - \frac{R^2}{4L_k^2} \right)$; $b = R/2(L_k + L_m)$; $b' = R/2L_k$ 。根据(7)式计算出来的电流波形由图2(下)中的虚线给出。值得指出的是,饱和电感器的饱和时间很短,饱和后电流达到最大值以后,电流由大变,使饱和电感器的感生电动势 V_m 与电容 C_1 的电压 V_0 极性相反,其结果使反向电流幅度减小,该特性对于重复率运转是很有利的。

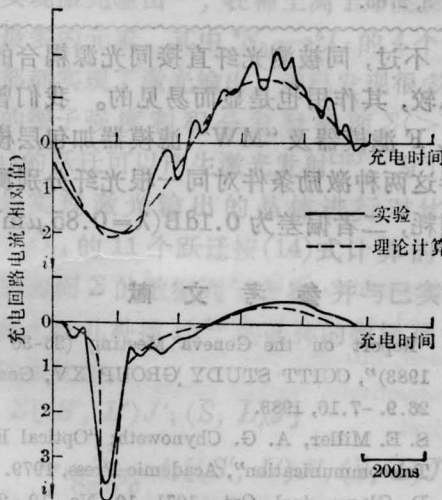


图2 磁饱和和线圈对电流波形的影响
(上)无磁饱和和线圈;(下)有磁饱和和线圈

三、实验结果及讨论

实验用的激光器是一台电容转移式放电

电路泵浦的、X射线预电离XeCl准分子激光器。磁饱和和线圈是用金属玻璃带绕线的矩形磁芯,外尺寸约为 $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 60\text{cm}$ 。磁芯截面为 25cm^2 。

激光放电体积约为 $2 \times 2 \times 60\text{cm}^3$,采用平行平面腔结构作为光学谐振腔。激光能量由炭斗卡计插测。采用儒可夫斯基线圈测量充电回路中的电流随时间的变化,测量线圈紧靠磁压缩器后,如图1(a)A处。在无磁饱和和线圈情况下,电流波形是近似的正弦波(见图2(上)的实线),与上节中我们理论估算能很好地符合。注意到在第二个半周电流波形显得不如第一个半周平滑,这主要由于放电后期预电离作用不存在,放电出现流光状细柱所引起的。当在回路中接入磁饱和和线圈后,电流波形如图2(下)中实线所示,显示了电流脉冲的变窄和反向电流的减小,其波形亦与理论模拟计算的一致。

为了获得期望的压缩比,首先要使电容 C_1 对 C_2 的充电时间与磁饱和和线圈的饱和时间 Δt 相匹配。由于磁饱和和线圈的材料选定,尺寸大小加工好以后 Δt 是一定的,而激光器中 C_1 和 C_2 值亦是一定的,一般分析中给出 C_2 的充电时间常数为:

$$T_0 = \pi(L_k C_2 / 2)^{1/2} \quad (8)$$

表面上看来,二者之间缺乏可调整的参量来使之匹配。事实上(8)式给出的 T_0 还应与旁路电感 L_3 有关,只有当 L_3 值较大时,其高频阻抗远大于电容 C_2 的高频阻抗时才能用(8)式计算 T_0 。因此,可以通过调整 L_3 的大小来进行匹配。当 L_3 值过份小时, L_3 的高频阻抗不再远大于电容 C_2 的高频阻抗,使充电时间 T_0 变小,其结果是磁饱和和线圈不能达到应有的饱和磁通值,从而影响了磁压缩效果。另一方面,如果电感 L_3 值过大,就会使电容 C_2 的放电时间变长,其结果造成饱和过程变慢。图3是将 L_3 从 $1\mu\text{H}$ 变化到 $16\mu\text{H}$ 时观察脉冲放电电流宽度(FWHM)和相应的激光输出能量的变化。实验结果证实了我们上

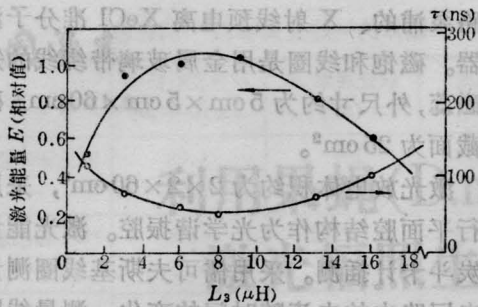


图3 旁路电感 L_3 对磁饱和和线圈压缩效果及激光输出的影响

述分析。 L_3 的合适选择可以使 T_C 和 Δt 互相匹配, 获得最佳的磁压缩效果。此时 τ 最小, 而激光输出能量 E 最大。

图4是采用磁饱和和线圈后的激光工作特性。横坐标是激光放电与 X 射线预电离之间的时间延迟。作为比较, 图中同时给出了无磁饱和和线圈时的激光输出特性。从图中可知, 采用磁饱和和线圈后, 激光输出对于时间延迟的变化较过去灵敏。不过, 由于磁饱和和线圈本身有损耗, 会消耗一部分能量, 使激光输出有所下降, 但只要选择适当的时间延迟, 磁饱和和线圈引起的损耗可控制在 10% 左右。作

为损耗所付出的代价, 磁压缩器使激光装置中开关元件的寿命有数量级的增长。对于球隙开关, 它可以延长清洗维修间隔, 对于闸流管更可以延长其使用寿命。

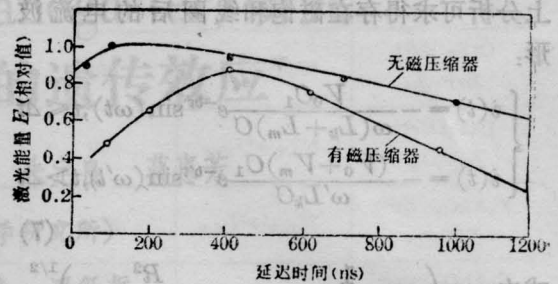


图4 磁饱和和线圈对激光输出的影响

参 考 文 献

- [1] K. Noda *et al.*; CLEO'85 Technical Digest, 21~24 May 1985, Baltimore MD USA, Paper WM-26, p. 118.
- [2] I. Smilanski *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **40** No. 7, 547.
- [3] D. Bazting *et al.*; *Laser und Optoelektronik*, 1982, No. 2, 128.
- [4] M. Stockton *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1982, **53**, No. 3, 2765.

出(上接第 698 页)
 光纤的不同, 每根光纤的滤模程度(具体为滤模圈数)是不同的。这在实际常规测试中就比较难于掌握。并且这种方法实施起来较为复杂, 不太适用于诸如产业部门的批量测试。
 由实验可以看出, 如果被测光纤直接同光源耦合而未采取任何稳模措施, 其长短光纤的末端面近场功率分布 $NF_{0.5}$ 的差值可在 $1.9 \mu\text{m}$ 至 $4.8 \mu\text{m}$ 之间, 而如果采用了 S. S. F. 滤模器, 对均匀光纤而言, 该值可减少到 0 至 $0.5 \mu\text{m}$ 。所以用 S. S. F. 滤模器后虽然 $NF_{0.5}$ 未能达到 $26 \mu\text{m}$, 但从长短光纤的模式功率分布来看, 我们可以认为此时在光纤中已近似地建立起平衡模分布, 我们暂且称之为“准”平衡模分布。当然对非均匀光纤来讲, 其效果就不是十分明显, 这是由于非均匀光纤内部的模间耦合作用更为强烈的原

因。不过, 同被测光纤直接同光源耦合的方法比较, 其作用也是显而易见的。我们曾用 S. S. F 滤模器及“MW”滤模器加包层模剥除器这两种激励条件对同一根光纤分别测试了损耗, 二者偏差为 0.1dB ($\lambda = 0.85 \mu\text{m}$)。

参 考 文 献

- [1] "Report on the Geneva Meeting (26-30 Sep. 1983)", CCITT STUDY GROUP XV, Geneva, 26.9. -7.10, 1983.
- [2] S. E. Miller, A. G. Chynoweth; "Optical Fiber Telecommunication", Academic Press, 1979.
- [3] D. Gloge; *Appl. Opt.*, 1971, **10**, No. 10, 2252-2258.
- [4] A. W. Snyder; *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1969, MTT-17, 1130-1138.
- [5] 施庆麟, 施震东; 《电子技术》, 1981, No. 11.
- [6] Leonard G. Cohen *et al.*; *P. IEEE*, 1980, **68**, No. 10, 1205.