

# 带磁开关的冲击-自持脉冲放电技术及其应用

周 卫 东 余 吟 山

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥, 230031)

**摘要:** 本文通过对带磁开关的冲击-自持脉冲放电电路放电过程的分析, 指出了该电路在激发准分子激光时的优点, 在考虑准分子激光形成过程特点的基础上, 进一步指出了利用该电路有利于制成高效率、高功率、长脉冲准分子激光器件。

**关键词:** 磁开关冲击-自持脉冲 准分子激光

## Magnetic-spiker-sustainer excitation technology and uses in excimer laser

Zhou Weidong, Yu Yinshan

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

**Abstract:** Based on the analysis of operating principles of magnetic-spiker-sustainer excitation used in excimer laser, this paper points out the technique is suitable to provide the laser pulses with the high efficiency, high average power and long duration. Experiment results show that the using the technique can generate the 170ns KrF laser pulses and 140m XeCl laser pulses.

**Key words:** magnetic-spiker-sustainer excimer laser

### 引 言

冲击-自持脉冲放电技术(Spiker-Sustainer Circuit)最早见于 70 年代初, 并且被用于高效地激发低压准连续 CO<sub>2</sub> 激光<sup>[1, 2]</sup>, 该技术能先后产生两个放电脉冲: 冲击脉冲(Spiker Pulse)和自持放电脉冲(Sustainer Pulse)。冲击脉冲具有高  $E/P$  值但能量比较小, 其作用是快速击穿气体并且在电极两端产生维持自持放电所需的均匀分布的电子数密度, 而后把合适的低  $E/P$  值自持放电脉冲加到电极两端, 使放电能量高效地耦合到 CO<sub>2</sub> 激发态分子中去。

80 年代初, Long<sup>[3]</sup> 等人成功地把该技术引入准分子激光器, 并使准分子激光器效率提高了将近一倍(4.2%)。不同的是, 由于准分子激光气体中存在着较强的电子吸附和复合过程, 自持放电电路中的电压值相对较高, 以产生足够的电离维持雪崩放电。遗憾的是, 电路中用于隔离两个脉冲的球隙开关的不稳定性和有限寿命, 限制了它在高重复频率准分子激光器中的应用。后来, Taylor<sup>[4]</sup> 和 Fisher<sup>[5]</sup> 用被动开关元件——磁开关代替球隙, 成功地解决了电路中的隔离问题。此后, 带磁开关的冲击-自持脉冲放电技术在高效率、高功率、大能量、长脉冲等准分子激光器中得到广泛的应用<sup>[5-9]</sup>。

### 一、放电电路及其工作原理

冲击-自持脉冲放电技术中, 用了两个线路, 分别产生冲击和自持放电脉冲, 为了防止在冲击脉冲作用期间自持电路对其能量的吸收, 用可饱和电感  $L_{st}$  作隔离元件, 典型原理图如图 1。

冲击电路是一个典型的小容量  $C-C$  转移快放电路, 具有较高的阻抗和充电电压  $V_{sp}$ , 可以在电极两端产生一个高压陡脉冲快速击穿放电气体, 形成一个均匀的低阻抗放电等离子体。自持放电电路则由一个低阻抗、大容量 PFL 或 PFN 构成, 通过一个可饱和磁开关接到电极两端, 其充电电压  $V_{PFL}$  常常是等于两倍气体准稳态放电电压  $V_s$ , 以满足阻抗匹配和电压匹配的放电条件, 主放电能量储存在 PFL 中, 其能量转移的好坏直接影响激光器的性能和效率。根据电路中  $C_{sp}$  和 PFL 充电电压极性的不同, 可以分为两种基本工作模式<sup>[5]</sup>: 二极管工作方式和开关工作方式。

1. 二极管工作方式(图 2)

该方式下用于隔离两个电路的磁分离器工作在磁二极管状态,  $C_{sp}$  和 PFL 充上不同极性的电压, 冲击电压  $V_{br}$  和 PFL 充电电压极性相同, 在气体击穿前后流过磁开关的电流方向相反, 由于可饱和电感的作用, 在气体击穿和主放电电流之间有一段时间延迟, 这对形成均匀的气体放电是不利的, 应该尽量避免, 故现在已经很少采用这种工作方式。

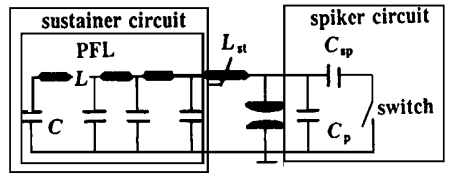


Fig. 1 Schematic diagram of the typical magnetic-spiker-sustainer circuit

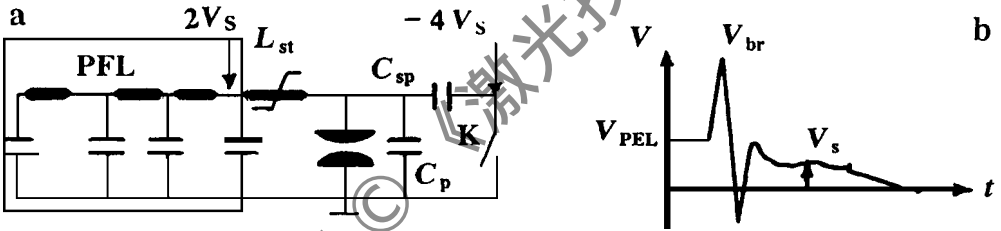


Fig. 2 a- Schematic diagram of the diode model circuit  
b- Schematic diagram of the voltage waveform across the electrode for the diode mode

2. 开关工作方式(图 3)

在这种工作方式下, 磁分离器的作用相当于一个磁开关。  $C_{sp}$  和 PFL 上充电电压极性相同, 但冲击电压  $V_{br}$  和 PFL 充电电压极性相反, 放电过程中, 流过可饱和电感的电流方向不变, 因而气体击穿电流和主放电电流之间无时间延迟, 用这种工作方式已经获得 4% 的效率, 由于

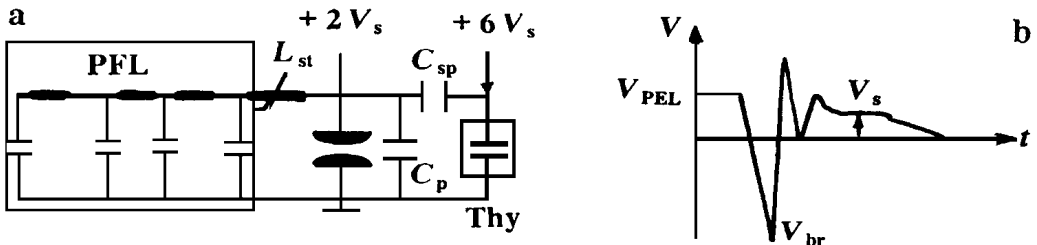


Fig. 3 a- Schematic diagram of the switch mode circuit  
b- Schematic diagram of the voltage waveform across the electrode for the switch mode

气体击穿前后电极两端电压极性相反, 导致气体击穿电流和主放电电流方向相反, 这也不利于稳定高效地放电。

### 3. Resonant-Overshoot 方式

为了避免开关工作方式下气体击穿前后电极两端电压极性反向, 还有一种经改进的开关工作方式, 又称 Resonant-Overshoot 工作方式。其电路和电极两端电压波形如图 4 所示。它同开关工作方式的主要区别在于  $C_{sp}$  充电电压较开关方式下低, 通常为开关工作方式下的  $2/3$ , 因而在触发开关  $T_{hy}$  后, 峰值电容两端电压迅速反向, 由于  $C_{sp}$  两端充电电压较低, 反向负峰电压不足以击穿气体, 但这时磁开关已经饱和呈低阻抗状态, 随后出现电荷快速从 PFL 流向峰值电容  $C_p$ , 谐振充电到足够高的电压击穿气体, 主放电电流也就随着立即把能量沉积到放电气体中, 用这种方式已获得 5% 的高转换效率, 是迄今为止最好的结果。

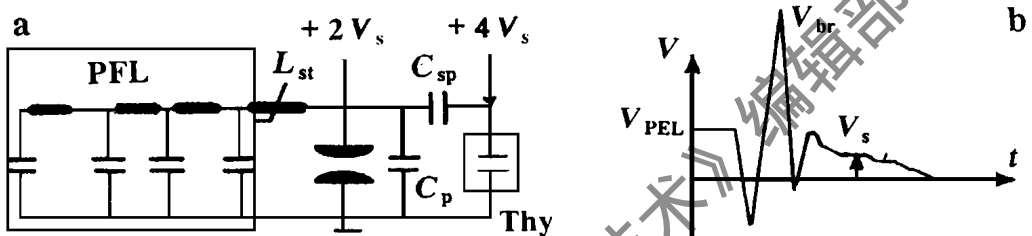


Fig. 4 a- Schematic diagram of the overshoot mode circuit.

b- Schematic diagram of the voltage waveform across the electrode for the overshoot mode.

从上述分析可以看出, 气体击穿前后, 电极两端电压极性和流过的电流方向都没有变化, 气体击穿电流和主放电电流之间也没有时间延迟, 因而具有较好的放电效果。

此外, 由于磁开关阻断时间  $T$  与两端电压  $V(t)$  满足关系:

$$\int_0^T V(t) dt = \Delta B^* N^* A \quad (1)$$

式中,  $\Delta B$  是磁感应强度的变化量,  $N$  是线圈匝数,  $A$  是磁性材料截面。由于这时负峰电压低, 所用的磁性材料的体积也减少, 降低了磁性材料中的能量损失。

## 二、冲击、自持脉冲放电技术在高效率准分子激光器中的应用

准分子激光器的光电转换效率依赖于两个过程, 一是从储能电容到放电等离子体的能量转移, 二是上述沉积到等离子体中的能量向光子能量的转换, 这与放电气体中电子密度分布函数、化学反应动力学过程有关。而第一个过程的好坏取决于放电回路。

自持放电建立过程中, 在电极两端高压作用下, 等离子体电阻  $R_D$  是一个非线性的变化过程, 满足关系式:

$$R_D(t) = d/e^* S^* \mu^* N_e(t) \quad (2)$$

式中,  $d$  是放电间隙,  $e$  是电子电荷,  $S$  是放电截面积,  $N_e(t)$  是电子密度分布函数,  $\mu$  是电子漂移速率。随着快放电的建立,  $R_D(t)$  在几十个毫秒秒内由几十千欧姆迅速降至  $0.1 \sim 0.25 \Omega$  之间, 从而建立起一个准稳态放电过程, 而准稳态放电电压  $V_s$  的大小主要取决于电极间隙, 放电面积, 以及气体气压和气体成分等。

理想的 PFN 向等离子体沉积能量时, 有  $R_D = Z_0^* V_s / (V_{PFN} - V_s)$  (3)  
 $Z_0$  是 PFN 阻抗, 可见当  $V_{PFN} = 2V_s$  时,  $R_D = Z_0$ , 可实现匹配放电, 获 100% 能量转移效率。

高效率地把能量沉积到放电等离子体中,要求 PFN 充电电压等于  $2V_s$ ,且特征阻抗很低,但快速击穿气体,建立均匀稳定的放电,则要求有很高的电压,这样用一个放电脉冲就不能同时满足这两个要求。从前面的分析知道,冲击-自持脉冲电路既能产生一个高压冲击脉冲均匀击穿气体,又能在低阻抗 PFN 上充上  $2V_s$  电压与负载匹配放电,因而能获得较高的效率<sup>[5,6]</sup>。

### 三、冲击-自持脉冲放电技术在高功率准分子激光中的应用

高功率准分子激光器,要求激光器工作在很高的重复频率下,并有较大的单脉冲能量,显然,激光器具有较高的效率是很诱人的,由于这时主放电输入能量可以减少,其结果是气体寿命和所用器件的寿命都延长了。

典型的 G-C 转移电路(图 5),尽管可以使用低感火花隙作为快开关元件来满足大功率激光器中大放电电流的要求,但只能低重复频率触发且不稳定。可以在高重复频率下使用的闸流管,由于它允许流过的峰值电流  $I_{pk}$ ,有效值电流  $I_{rms}$ ,特别是电流变化率  $dI/dt$  都受到限制,因而也难满足大功率器件的要求。

带磁开关的冲击-自持脉冲放电技术,具有高放电质量和效率,同时由于快速冲击脉冲中能量很小,大大减轻了闸流管的使用强度,使其使用寿命显著提高,这都有利于高功率激光器的运转。目前,该技术已成功地应用于 2000 W XeCl 激光器的放电电路中。

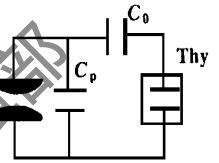


Fig. 5 Typical G-C transfer circuit

### 四、长脉冲准分子激光器和光束质量的改善

由于准分子激光器介质上能级寿命短,以前放电泵浦的准分子激光器都采用高泵浦功率密度的放电脉冲,以获得较高的电光转换效率,这时介质的小信号增益系数高达  $30\%/cm^{[9]}$ ,激光在腔内仅几个来回就可以达到饱和,激光脉宽也往往只有几十个毫微秒,输出激光中含有很高的放大的自发辐射(ASE)成分,这时输出激光发散角大,也很难对其光谱线宽、偏振特性加以控制。

研究表明,丝状放电形成速率线性依赖于放电电子数密度<sup>[10]</sup>,降低能量沉积密度可延长光脉冲时间<sup>[11]</sup>,冲击-自持脉冲放电电路,其冲击脉冲前沿很陡,有利于形成大面积均匀辉光放电,也使放电稳定性得到了提高,再者,主放电过程中,通过 PFN 电路参数的变化,可以控制放电脉冲宽度和能量沉积速率,并获得稳定的泵浦能量密度,这都为长脉冲的产生创造了条件。截至目前,应用该技术已成功得到了脉宽 170ns 的 KrF 和脉宽  $1\mu s$  的 XeCl 激光输出<sup>[12]</sup>。

在长脉冲基础上,利用传统的控制光束质量的方法,在腔内加入色散元件、偏振片以及通过光学谐振腔参数的选择,就可以改善输出光束的偏振特性以及空间和时间相干性,使高光束质量的准分子激光输出成为可能,也为准分子激光在更广泛领域内得到应用提供了保证。

### 五、结 束 语

从上述讨论可以看出,带磁开关的冲击-自持脉冲放电技术,既有利于形成稳定均匀的气体放电,又能较好地提高能量沉积效率,这对于横向激励高压气体激光的激发是非常合适的。这种放电技术的使用,为高效率、大功率、高光束质量的准分子激光以及其它放电激励的气体激光的运转创造了条件,也必将得到越来越重要的应用。

# 自锁模 Ti: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器的色散补偿分析

黄斐然 魏志义 杨 杰 余振新

(中山大学超快速激光光谱学国家重点实验室, 广州, 510275)

摘要: 本文对自锁模激光器中使用的双棱镜对和四棱镜两种色散补偿系统作了详细的理论分析, 给出了二、三阶色散的准确表达式, 并且对使用不同材料组成系统所产生的效果作了比较。

关键词: 色散 高阶 自锁模

## Investigation of dispersion compensation in self mode-locked Ti: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> lasers

Huang Feiran, Wei Zhiyi, Yang Jie, Yu Zhenxin

(Ultrafast Laser Spectroscopy Laboratory, Zhongshan University, Guangzhou, 510275)

**Abstract:** The dispersion compensation systems with a pair of double prisms or a group of four prisms used in self mode-locked Ti: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> lasers are theoretically studied in detail. The accurate expressions of second order and third order dispersion. The compensation results provided by the systems consisting of different optical materials are experimentally investigated.

**Key words:** dispersion high-order self mode-locked

### 参 考 文 献

- 1 Reilly J P. J A P, 1972; 43: 3411
- 2 Hill A E. A P L, 1973; 22: 670
- 3 Long W H, Plummer M J, Steappeares E A. A P L, 1983; 43: 735
- 4 Taylor R S, Leopold K E. A P L, 1985; 46: 335
- 5 Fisher C F, Kushner M J, Dehart T E *et al.* A P L, 1986; 48: 1574
- 6 Gerritsen J W, Keet C A L, Ernst G J *et al.* J A P, 1990; 67(7): 3517
- 7 Efimovskii S V, Brown A J W, Sergoyan E G *et al.* IEEE Photonics Technol Lett, 1991; 3: 433
- 8 Sato Y, Inoue M, Haruta K *et al.* A P L, 1994; 64(6): 679
- 9 Taylor R S, Leopold K E. J A P, 1989; 65(1): 22
- 10 Weeks R W, Donaldson M, Mckee T J *et al.* Conference on Lasers and Electro-Optics, 1986, Technical Digest Optical Society of America, Washington D C. 1986: 144
- 11 Taylor R S. Appl Phys, 1986; B41: 1
- 12 Taylor R S, Leopold K E. A P L, 1983; 47: 81

作者简介: 周卫东(附照片), 男, 1966年9月出生。研究生。现从事高功率准分子激光技术的研究。

余吟山, 男, 1945年出生。研究员。长期从事光电子技术科学的研究工作, 目前主要从事准分子激光器件及其应用的研究。

收稿日期: 1995-10-30 收到修改稿日期: 1996-03-12