

长脉冲大面积强流电子束源*

洪 浦

(中国科学院电子学研究所)

提 要

本文介绍的长脉冲大面积强流电子束系统是为横向泵浦和控制放电泵浦大能量气体激光而设计和研制的。电子束能量为 200—250keV, 脉宽约为 1—3 μ s, 电流密度在 0.5—8A/cm² 范围内可调, 束截面积约为 100 $\times$ 10cm²。用这台电子束系统已成功地控制放电泵浦 XeCl 激光, 在 1.9 l 的激活体积中获得激光能量为 1J。今年又用它作为 CO₂ 激光的泵浦源, 在 7.85 l 的体积内初步获得 360J 的激光能量。

一、引 言

采用冷阴极电子枪的大面积长脉冲强流电子束源, 不仅能量大功率密度高, 而且能量交付速率快, 因此成为大能量气体激光器最有效的泵浦源之一。近几年国外用这种装置横向直接泵浦或控制放电泵浦从红外、可见到紫外波段的各种大体积、高气压气体激光器, 已获得大能量输出和高效率的结果^[1], 很有发展前途。

我们为研制百焦耳能量的稀有气体卤化物准分子激光器和 300J 的 CO₂ 激光器, 研制了这台多用途强流电子束源。现已成功地用于控制放电泵浦 XeCl 激光^[2]。而用该电子束系统进行 CO₂ 激光器的实验, 初步获得的最大输出能量为 360J。

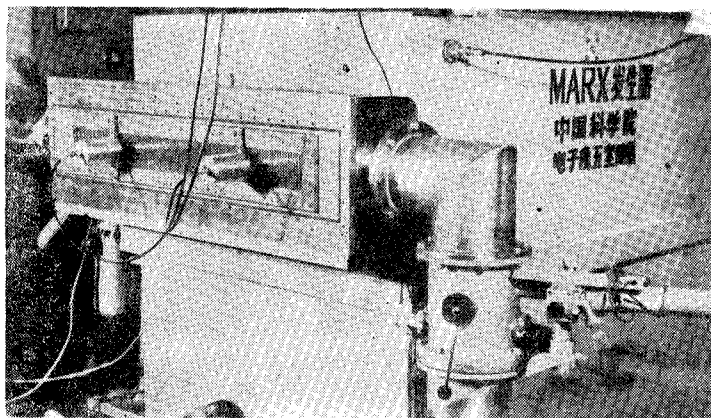


图1 强流电子束系统的外观照片
Fig. 1 Photograph of intense electron beam system

* 1980年2月22日收到。

二、冷阴极电子枪及其电源

电子束源主要由冷阴极电子枪和 Marx 发生器两部分组成, 它们组装在一起成为结构紧凑的装置, 其外形照片如图 1 所示。

电子枪采用不锈钢壳体, 其结构如图 2 所示。电子枪的阴极使用多条 (3—8 条) 钼箔

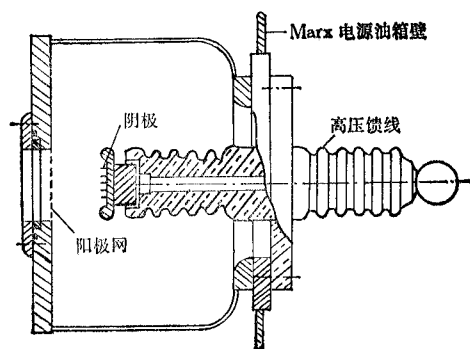


图 2 冷阴极电子枪的结构简图

Fig. 2 Configuration of cold cathode diode

结构, 用长 91cm、厚约 $13\mu\text{m}$ 的钼箔相隔 10 mm 平行地夹持在铝制阴极托板上。钼箔高出托板约 5mm, 整个阴极面积约为 540cm^2 。阴极托板四周加工成直径为 20mm 的均压环, 它不仅使阴极边缘的电场均匀, 而且略起聚束作用。阴极托板由两个高压馈线与 Marx 发生器输出端相连, 并使极间距离在 3.5—11.5cm 范围内可调, 以改变二极管阻抗, 达到调节电流密度的目的。

电子枪的阳极为一透过率为 90% 的平面钼网。电子束输出窗口面积为 100×10

cm^2 , 用厚约 $50\mu\text{m}$ 的聚酰亚胺膜 (或 $30\mu\text{m}$ 的钛箔) 密封。该箔用透过率为 90% 的不锈钢

筋条支撑。实验证明, 由于聚酰亚胺膜的耐热性能较好, 寿命长于同样厚度的聚酯膜。我们也用过钛箔作输出窗, 寿命可延长至上百次脉冲。

电子枪由两台 JK-10 型真空机组抽气, 真空度可达 1×10^{-5} 托。

电子枪的电源采用四级双回路 Marx 发生器线路 (见图 3)。发生器每半级电容量

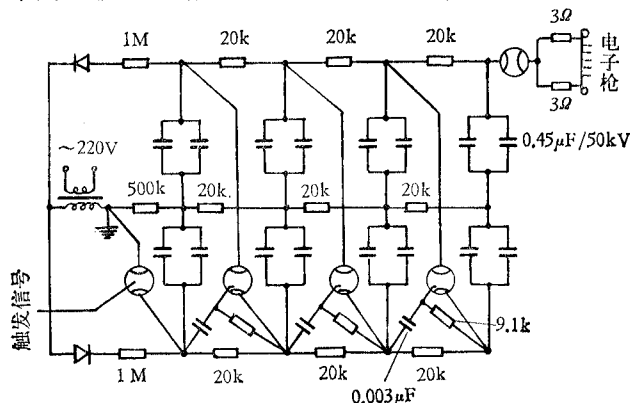


图 3 四级双回路 Marx 发生器简图

Fig. 3 Diagram of four stage dual circuit Marx generator

$C = 0.9\mu\text{F}$, 共用 16 个 $0.45\mu\text{F}/50\text{kV}$ 的电容器组成, 冲击电容为 $0.11\mu\text{F}$ 。级间由四个充气开关串接。电源输出端由一充气开关串接 1.5Ω 线绕电阻与高压馈线相连。整个电源组装在充满变压器油的油箱里, 结构紧凑, 减小了回路电感, 提高了性能和稳定性, 降低了干扰噪声。Marx 发生器可达到的指标如下: 输出峰值电压 200—250kV, 脉宽约为 1—3

μs , 前沿上升时间约 200ns 。电压利用效率随电子枪阻抗变化, 可达 $60\text{—}90\%$ 。

三、工作原理和实验结果

电子束系统的工作过程如下: Marx 发生器各级并联充电, 而后经触发串联放电, 产生的负高压脉冲加到冷阴极电子枪上。于是在钽箔阴极的锐边产生强电场, 使其产生场致发射。随着电压的升高, 刀边电场一旦超过某一临界值, 发射点立即爆炸形成向四周喷射的等离子体流^[3]。如果这样的发射点足够多, 喷射的等离子体流互相迭接, 沿整个阴极面形成等离子体层, 并以恒定的速度向阳极扩展。该等离子体层成为有效的电子源。二极管的发射电流是空间电荷限制流, 遵循平面二极管的 Child-Langmuir 定律:

$$I = 2.34 \times 10^{-6} S V^{3/2} / D^2(t) \quad (\text{A}) \quad (1)$$

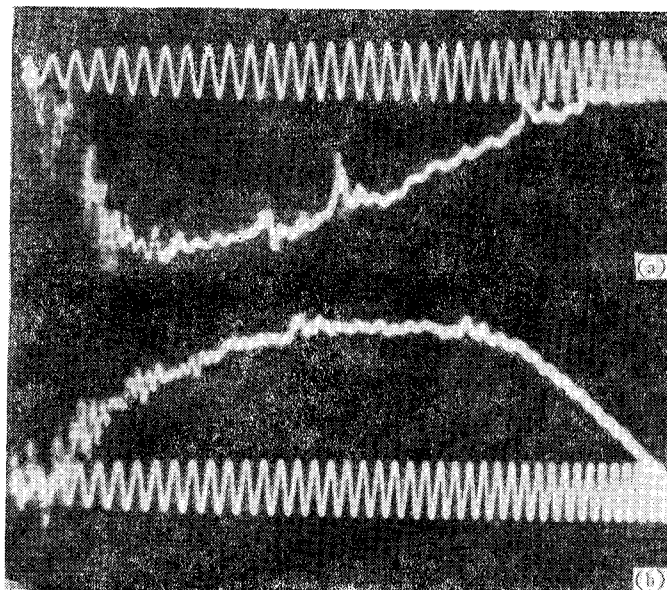


图 4 电子枪电压(a)和电流(b)波形(充电电压 38kV , $D_0 = 5\text{cm}$, 五条钽箔阴极, 时标 11.5MHz)

Fig. 4 Oscillograms of diode voltage (a) and current (b) (charged voltage 38kV , $D_0 = 5\text{cm}$, five strip Ta foil cathode, time base 11.5MHz)

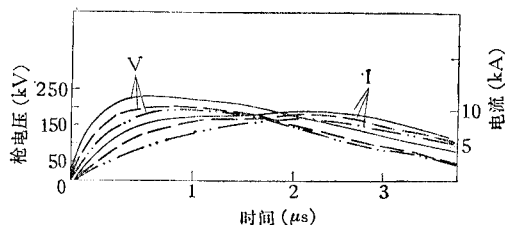


图 5 不同充电电压下的电压电流波形 ($D_0 = 7.1\text{cm}$, 八条钽箔阴极)
电源充电电压 ——— 35kV - - - 30kV ··· 27.5kV

Fig. 5 Oscillograms of voltage and current of diode for different charged voltage ($D_0 = 7.1\text{cm}$, eight strip Ta foil cathode)

式中, V 是电子枪电压 (V), S 是阴极面积 (cm^2), $D(t)$ 为变化的极间距 (cm), 它等于 $D_0 - vt$. 这里, D_0 是二极管起始极间距 (cm), v 为等离子体速度 ($\text{cm}/\mu\text{s}$), t 为等离子体面形成以后的时间 (μs).

电子枪电压用电阻分压器测量, 电流用罗柯夫斯基线圈测量. 在充电电压为 38kV 时, 测得的电子枪电压和电流波形如图 4 所示. 电压上升时间约为 200ns, 电压峰值达 250kV, 总电流峰值达 15.9kA, 脉宽约为 1—3 μs . 为了提高电子束的均匀性, 要求阴极表面必须快速形成等离子体层. 为此要求电压上升时间尽可能短. 在不同充电电压下, 测得一组电压电流波形, 如图 5 所示. 从图可以看出这样的趋势, 随着枪电压的提高, 枪电流上升速度加快, 电流滞后于电压的时间减小, 即阴极起动快, 这是我们所希望的. 在电压上升时间 200ns 情况下, 电流滞后于电压约 20—30ns. 如果上升时间缩短, 滞后时间还可减小.

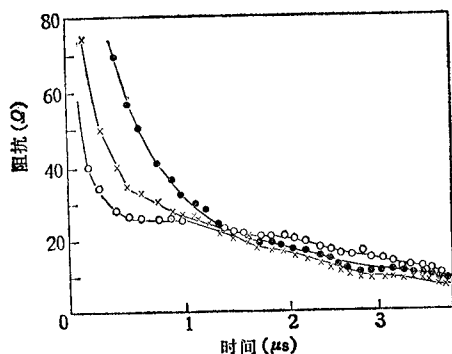


图 6 电子枪的阻抗特性曲线
电源充电电压 ● 27.5kV × 30kV ○ 35kV
($D_0 = 7.1\text{cm}$, 八条钽箔阴极)

Fig. 6 Impedance curve of diode ($D_0 = 7.1\text{cm}$, eight strip Ta foil cathode)

$$P = I/V^{3/2} = 2.34 \times 10^{-6} S / (D_0 - vt)^2 \quad (3)$$

这个关系式说明, 电子枪的导流系数与电压电流无关, 仅与它的几何结构有关. 如果不考

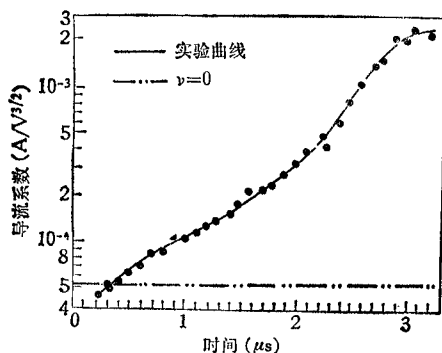


图 7 电子枪的导流系数曲线
(充电电压 38kV, $D_0 = 5\text{cm}$, 五条钽箔阴极)

Fig. 7 Perveance curve of diode (charged voltage 38kV, $D_0 = 5\text{cm}$, five strip Ta foil cathode)

阻抗特性是冷阴极电子枪的重要特性, 从式(1)导出的阻抗关系式如下:

$$Z = \frac{428}{\sqrt{V}} \frac{(D_0 - vt)^2}{S} \quad (2)$$

式中, 电压 V 以 MV 为单位. 从图 5 电压电流波形导出的阻抗曲线如图 6 所示. 从曲线可以看出, 在电压起始的 20ns 内, 由于阴极处于场致发射状态, 发射的总电流较小, 阻抗接近无穷大. 一旦等离子体层形成, 阻抗迅速下降. 此后二极管进入空间电荷限制电流状态, 阻抗缓慢下降, 电流逐渐增大.

电子枪的特性亦可用导流系数这一概念来分析, 从式(1)导出的导流系数公式如下:

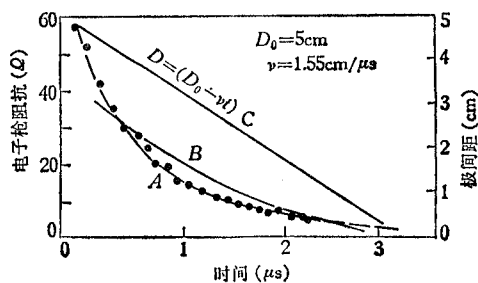


图 8 阻抗曲线和极间距 $D(t)$ 曲线

Fig. 8 Impedance curve and gap space $D(t)$ curve

考虑等离子体运动 ($v = 0$), 导流系数则是一条直线。图 7 所示实验导流系数曲线由图 4 导出。由于极间距离随时间变化, 导流系数是一条上升的曲线。从实验曲线导出的等离子体运动速度与文献[4]报道的大体相同, 约等于 $1.55\text{cm}/\mu\text{s}$ 。

当阴极等离子体到达阳极时, 电子枪短路, 这种现象称为阻抗崩溃。就所述电子枪而言, 由于阳极等离子体很弱, 间隙闭合速度即为阴极等离子体速度。对于 $D_0 \geq 5\text{cm}$ 的情况, 一般不发生阻抗崩溃现象。这可从图 8 看出。曲线 A 为从图 4 导出的实验阻抗曲线, 曲线 B 为从式(2)计算的阻抗曲线, 曲线 C 为 $D(t) = D_0 - vt$ 曲线。当 $t = 3\mu\text{s}$ 时, 二极管尚未闭合。

电子束的电流密度用置于窗外的法拉第筒测量, 结果如图 9 所示。法拉第筒未抽真空, 这样较直观地反应激光腔 (一个大气压) 内电子束密度。改变极间距离和阴极钽箔条数, 可使电子束电流密度在 $0.5\text{--}8\text{A}/\text{cm}^2$ 范围内变化。对于大电流密度电子束, 束流利用率为 60% ; 对于低电流密度 ($0.5\text{A}/\text{cm}^2$), 由于阻抗不匹配, 束流利用效率仅为 10% 。

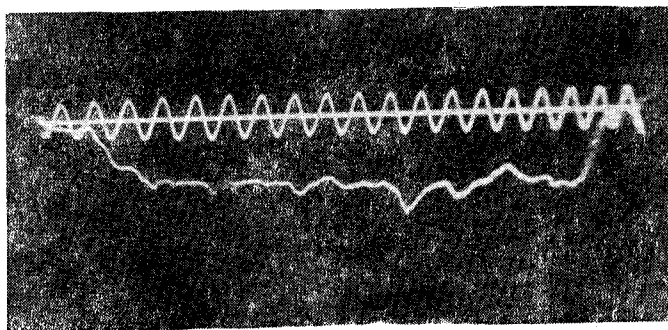


图 9 电子束电流密度示波图

(Marx 发生器充电电压 30kV , 法拉第筒电阻 5Ω , 时标 11.5MHz , 最大电流密度 $3.44\text{A}/\text{cm}^2$)

Fig. 9 Oscillogram of beam current density (charged voltage 38kV , Faraday cup resistance 5Ω , time base 11.5MHz , maximum current density $3.44\text{A}/\text{cm}^2$)

为了使激光腔获得均匀泵浦, 束电流密度的均匀性是重要因素之一。束流密度的均匀性与枪电压上升速率有密切关系。也与阴极结构是否优良 (包括钽箔的整齐和厚度的均匀) 相关。如果钽箔某个部位相对于托板较为突出, 则那里就比其他地方先产生场致发射, 继而出现弧道而局部导通, 这时电流密度极不均匀。我们在窗口放置酸敏纸, 定性地

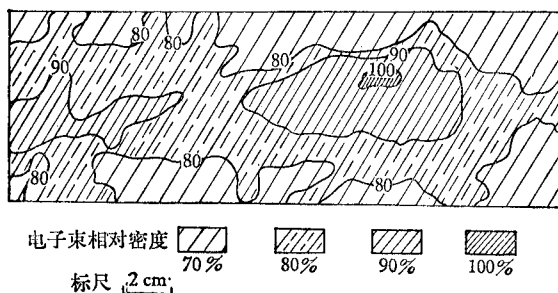


图 10 电子束电流密度的相对均匀性 (一次脉冲)

Fig. 10 Relative uniformity of beam density (one pulse)

显示了电子束的均匀性,如图 10 所示。测量结果表明,束流密度变化 20% 的面积为总面积的 76% 以上。纵向不均匀性(中间密度较大)的原因可能是由于阴极托板均压环的作用太强。如果适当地改变电极结构,会使电子束更趋均匀。

四、结 论

我们研制的这台大面积长脉冲强流电子束系统,经过一年多的实验和应用,证明它是一台性能良好、工作稳定的装置。电子束系统可达到的指标如下:束能 200—250keV,脉宽约为 1—3 μ s。束流密度:对于高阻抗为 0.5—1A/cm²,可用于 CO₂ 激光器的控制放电泵浦源;对于低阻抗为 5—8A/cm²,可用作准分子激光器的电子束源。

参 考 文 献

- [1] Charles Coson, et al., Appl. Phys. Lett., **23**(1973), 110; J. C. Hsia, et al., AD-AO47684.
- [2] 洪浦, 电子学通讯, **2**(1980), 37.
- [3] R. K. Parker, et al., J. Appl. Phys., **45**(1974), 2463.
- [4] 的場幹史, レーザー研究, **6**(1978), 168.

A LONG PULSE LARGE AREA INTENSE ELECTRON BEAM SOURCE

Hong Pu

(*Institute of Electronics, Academia Sinica*)

The long pulse electron beam system reported here was constructed for transverse pumping and e-beam sustained discharge large energy gas laser. The electron beam parameters are: the beam energy about 200—250 keV, pulse duration (FWHM) about 1—3 μ s, current density in 0.5—8 A/cm² range and beam area 100 $\times$ 10cm². With this system, we have performed XeCl laser experiments and obtained laser energy output $\sim$ 1J in 1.9 l active volume. Recently this system was used as a pumping source for CO₂ laser, and we have preliminarily obtained 360 J laser energy in 7.85 l active volume.