

X 光预电离源实验研究

王又青 李再光

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 对于准分子激光器这样的高压气体脉冲放电器件, 为保证放电的均匀性, 预电离是必不可少的。本文介绍了 X 光预电离的产生机理及实验装置, 并进行了详细的实验研究及理论分析, 对实际工作有较大的参考意义。

关键词: 高压气体脉冲放电 X 光预电离 初始电子浓度

Experimental research of X-ray preionization source for excimer lasers

Wang Youqing, Li Zaiguang

(National Lab. of Laser Tech., HUST)

Abstract: In order to obtain the homogeneity of pulse discharge at the high pressure, a X-ray preionization source for excimer lasers is introduced in this paper. The X-ray results from the impact of accelerated electrons against a Ta target. The shorter the wavelength of X-ray is, the ability of the preionization is much stronger. With the X-ray preionization source, the preionization electrons density of $2.9 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ can be obtained in He-Ne-Fe mixed gas atmosphere.

Key words: pulse discharge at high pressure X-ray preionization initial electron density

一、引言

准分子激光器自问世以来发展迅速, 以其高功率、短激光波长等优点广泛用于激光化学、激光生物学、激光武器、激光沉积薄膜、精细光刻、激光退火、激光扩散及激光医疗等众多领域。由于准分子的能级寿命极短(几十毫微秒), 而光波频率又很高, 因此准分子激光器的泵浦源不仅要有足够大的功率, 而且要有足够短的泵浦脉宽($\leq 100 \text{ ns}$)。而为了提高输出能量, 通常要靠提高气压或增大激活体积来实现, 这就涉及到高气压脉冲放电的均匀性问题, 为此就需要采用预电离技术。在众多的预电离技术中, X 光预电离独具以下一些优点而受到人们重视: A. X 光穿透深度远大于带电粒子与 UV 光, 所以它能用于大体积高气压预电离。B. X 光源能与激光腔分开与控制, 因此它的设计与选材更具灵活性。C. 因 X 光预电离没有火花放电及窗口问题带来的气体劣化现象, 所以它能提高脉冲重复率及延长器件寿命。

下面我们详细介绍 X 光产生机理及实验装置, 以及有关实验与理论分析结果。

二、X 光的形成

X 射线的产生: 在真空中通过电场将电子枪发射的电子加速到高速度, 使其在到达阳极前具有高能量($\geq 10^4 \text{ eV}$), 当这高能电子束轰击到阳极靶材上时, 即在靶上发射出 X 光束。

激光在电子枪中产生的 X 光能量可由下式表示: $\varepsilon = 1 \times 10^{-9} i_t \cdot V_t^2 \cdot Z$ (1)

式中, V_i 为电子枪上电压(kV), i_i 为电子枪电流(A), Z 为靶材原子序数。

$$X \text{ 射线产生效率即为: } \eta = \mathcal{E} / (i_i \cdot V_i) = 1 \times 10^{-9} \cdot V_i \cdot Z \quad (2)$$

显然, 为得到较大的 X 光产生效率, 高 Z 材料如钨, 钽或钼等是理想的金属靶材。在本实验中采用了钽靶, $Z=73$, $V_i=100\text{kV}$, X 光产生效率 $\eta=0.7\%$, 可见, X 光源的转换效率是很低的。另外, 研究表明: 随靶材 Z 的增大, X 射线的波长越来越短, 而波长越短, 则同一物质的吸收系数越小, 即 X 光透过率越大, 这就有利于提高穿过窗口材料射进主放电区中去的 X 光强度, 同时, X 光波长越短, 所具有的光子能量也越大, 对气体的预电离能力也就越强。所以这也表明 Z 越大越好。

三、X 光发生器结构

对于脉冲 X 光发生器, 其辐射仅在很短的时间内完成 ($0.01\mu\text{s} \sim 1\mu\text{s}$)^[3], 因此需要很高

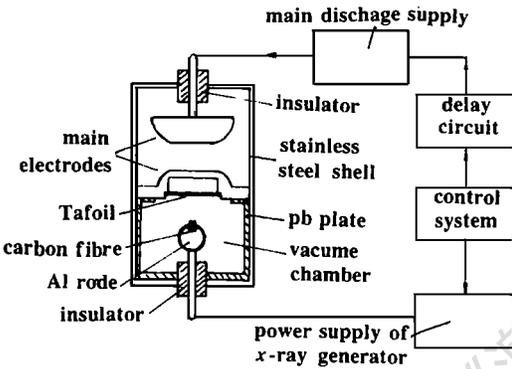


Fig. 1 The block diagram of X-ray preionization system

在 $30\text{mm} \times 500\text{mm}$ 的铝棒上嵌入 $5\text{mm} \times 10\text{mm} \times 500\text{mm}$ 的海绵状碳纤维作为电子枪阴极, 阳极为一块 $20\text{mm} \times 500\text{mm}$ 的钽箔, 该钽箔与铝棒平行并固定在主电极的低压电极上, 低压电极中间正对着钽箔处有一个厚 $1\text{mm} \times$ 宽 $50\text{mm} \times$ 长 500mm 的铝质窗口。将主放电区与电子枪真空室隔离, 因为铝是能同时满足窗口高机械强度与 X 光透过率两方面要求的理想材料, 对 1mm 厚的铝板, X 光透过率达 95.5% ^[5]。

另外, 为防止 X 光的有害辐射, 在真空室内, 除 X 光输出窗口外, 其它表面全用厚 3mm 的铅板覆盖, 因铅对 X 光有较强的吸收能力。

X 光源电路如图 2 所示。其中, 闸流管为 CX1525, 最高阳极电压达 70kV , 平均电流与最大峰值电流分别为 5A 与 3.5kA 。

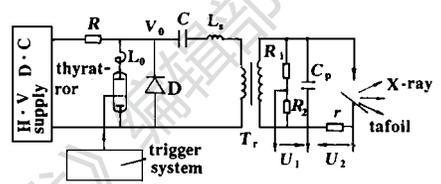


Fig. 2 The circuit of X-ray generator

的电流 ($0.1\text{kA} \sim 1\text{kA}$) 来得到足够的辐射用于预电离, 这样大的电流可方便地用冷阴极电子枪系统来实现^[1, 4]。我们所设计制作的 X 光发生器结构如图 1 所示。

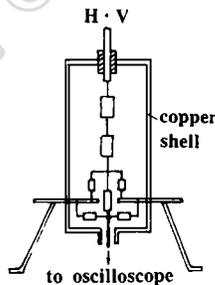


Fig. 3 The divider construction for impulse H.V. measurement

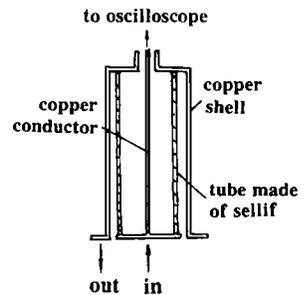


Fig. 4 The scheme of shunt for large impulse current measurement

脉冲变压器选用多个 MXQ-2000 $\varnothing 100\text{mm} \times 50\text{mm} \times 10\text{mm}$ 铁氧体组成,并用高压同轴电缆绕制以提高陡度,变比 $n=3$,整个脉冲变压器都浸在变压器油中,以提高绝缘强度。

贮能电容器 C 与峰值电容 C_p 全为低感陶瓷电容器, $C=10\text{nF}$, $C_p=1000\text{pF}$,单脉冲贮能为: $W=CV_0^2/2=4.5\text{J}$ ($V_0=30\text{kV}$)

L_0 为空心电感,用于限流; R 为充电限流电阻, L_s 为漏感。

R_1, R_2 为高压同轴分压器,分压比为 11.2×10^3 ,如图 3 所示。 r 为分流器, $r=0.005\Omega$,见图 4。

四、实验结果与计算分析

实验中电子枪真空室气压 $P \leq 10^{-5}\text{Torr}$ 。

在 $V_0=30\text{kV}$, $f=400\text{Hz}$ 时,用日本 100MHz 存贮示波器 TS-8123 测得实验波形如图 5 所示, U_1, U_2 分别为电子枪电压与电流的取样电压波形。

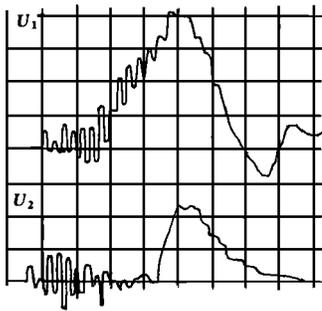


Fig. 5 The waveforms of voltage and current on electron gun (2V/div, 20ns/div)

从波形可知:电子枪电压峰值 $V_b \cdot 90\text{kV}$ ($V_b=U_{1m} \times$ 分压比),脉宽约为 90ns ,电流峰值 $I_b \cdot 920\text{A}$ ($I_b=U_{2m}/r$)。

另外,实验表明:当 $f=1 \sim 400\text{Hz}$ 变化时, U_1, U_2 波形保持不变,并且可连续稳定工作 4h。

由于条件限制, X 光产生的预电离电子浓度没能直接测量,因为直接测量 $10^4 \sim 10^9\text{cm}^{-3}$ 范围内的电子密度是相当困难的^[1,6]。我们可作如下估算:

用于预电离的 X 光强度可用下式表示^[1,6,7]:

$$S_0 = (V_b \cdot j_b \cdot \eta \cdot f \cdot \mu) / (2w) = V_b \cdot j_b \cdot k \cdot \eta \quad (3)$$

式中, V_b 为电子枪电压峰值(V), j_b 为峰值电流密度, $j_b=I_b/A$ (A/cm^2), A 为有效靶面积, $A=2 \times 50(\text{cm}^2)$, η 为 X 光产生效率, f 为 X 光利用因子(同时考虑了传输与扩散损耗), μ 为气体分子对 X 光的吸收系数, w 为在气体中产生一个离子对的平均能量。

从文献[6]、[1]可知,对于 1 个大气压, $\text{He}:\text{Xe}:\text{F}_2=200:8:1$ 的混合气体, $k \cdot 2.6 \times 10^{13}$,那么将 V_b, j_b 及 η 代入(3)式即得: $S_0=V_b \cdot (I_b/A) \cdot \eta \cdot k=1.5 \times 10^{17}$

在这样的吸附性气体中,预电离产生的初始电子浓度随时间的关系 $n_e(t)$ 可由下式表示^[6,7]:

$$dn_e/dt = S_0 - \beta \cdot n_e \cdot n_A \quad (4)$$

其解为:

$$n_e(t) = S_0 / (\beta \cdot n_A) [1 - e^{-\beta \cdot n_A \cdot t}]$$

式中, β 为吸附系数, n_A 为吸附性气体浓度。当时间远大于 $(\beta \cdot n_A)^{-1}$ 时,上式可表示为:

$$n_e = S_0 / (\beta \cdot n_A) \quad (5)$$

在上述混合气体中, $\beta \cdot 4 \times 10^{-9}\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $n_A = n_{F_2} = 1.3 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ^[6],那么电子浓度将在 5ns 内达到稳定平衡状态,将 S_0 代入上式即得 X 光预电离产生的电子浓度为: $n_e=2.9 \times 10^8\text{cm}^{-3}$ 。而从文献[6]知,在该混合气体中,产生均匀放电所需的最小初始电子浓度为: $(n_e)_{\min}=2 \times 10^5\text{cm}^{-3}$ 。可见: $n_e \gg (n_e)_{\min}$,即该 X 光源足以满足该混合体中均匀放电的预电离要求。

CCD检测激光束折散宽度及在柱面 镜曲率半径测量中的应用

张铁强 郭山河 申铨国

(吉林工业大学应用物理系, 长春, 130025)

摘要: 本文介绍一种检测柱面镜曲率半径方法。该方法的基本原理是利用准直激光束通过柱面镜产生扇形折射光束, 折射光束散开的宽度同柱面镜曲率半径直接相关。利用线阵 CCD 和微机数据处理系统, 可以高精度确定折散光束宽度, 进而确定出柱面半径。将这种检测技术应用汽车灯配光镜柱面半径测量, 测量精度达到 2%。

关键词: 激光束折射 柱面半径 CCD

Measurement of divergent angle width of laser beam with CCD for determination of radius of curvature of cylindrical lens

Zhang Tieqiang, Guo Shanhe, Shen Xuanguo

(Department of Applied Physics, Jilin University of Technology)

Abstract: This paper presented a method for measurement of radius of curvature of a cylindrical lens. While a laser beam goes through a cylindrical lens, the divergent angle width can be precisely determined with a high resolution CCD and a data microcomputer processing system. Then the radius of curvature of the cylindrical lens also can be calculated out. In practical application, measuring accuracy is

五、结 论

研究表明: 本 X 光预电离源电压幅度达 90kV, 电流密度达 $9.2A/cm^2$, 脉宽 $< 100ns$, $f = 400Hz$, 可长时间稳定工作。相应计算表明: 该 X 光源可在 1 个大气压的 He: Xe: Fe 混合气体中, 产生 $2.9 \times 10^8 cm^{-3}$ 的初始预电离电子浓度, 足以满足其均匀放电的要求。进一步的实验研究仍在进行中。

参 考 文 献

- 1 Levatter J I, Lin S C. J A P, 1980; 51(1): 210
- 2 H-J. 奎瑟主编. X 射线光学在固体领域中的应用. 北京: 科学出版社, 1985
- 3 Midorikawa K. IEEE J Q E, 1984; QE-20(3): 198
- 4 Sumida S. A P L, 1978; 33(11): 913
- 5 黄胜涛主编. 固体 X 射线学. 北京: 高等教育出版社, 1985
- 6 Levatter J I. A dissertation for the degree Doctor of Philosophy. San Diego: University of California, 1979
- 7 Levatter J I, Li Z G. Rev Scient Instrum, 1981; 52(11): 1651~ 1654

*

*

*

作者简介: 王又青, 男, 1963 年 7 月出生。讲师。现主要从事脉冲固体与脉冲气体激光器的研究工作。

