

准分子激光器的电子束 预电离及 X 光预电离

霍芸生 郑承恩 包智香 魏运荣

(中国科学院上海光机所)

提要: 本文从预电离电子密度、激光输出能量及放电特性等方面对用于准分子激光器的电子束预电离及 X 光预电离进行了研究和比较。

X-ray preionization and e-beam preionization for avalanche-discharge excimer lasers

Huo Yunsheng, Zheng Chengen, Bao Zixiang, Wei Yunyong

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

Abstract: Both X-ray preionization and e-beam preionization are investigated for avalanche-discharge excimer lasers by studying the number density of preionized electrons, the characteristics of the laser energy output and the discharge.

近年来,随着高气压电激励脉冲气体激光器的发展,多种预电离技术例如紫外光预电离、电晕预电离、电子束预电离及 X 光预电离技术得到了相应的发展。本文着重介绍了在一台水介质传输线供电的 XeCl^{*} 准分子激光器件上进行 X 光预电离及电子束预电离研究的一些结果。

一、预电离源及预电离 电子密度测量装置

产生预电离电子的 X 光及电子束是由同一个二极管型冷阴极电子枪产生的。此装置已在文献 [1] 中作了介绍。该电子枪能产生脉宽为 1.5 微秒的高能电子束或 X 光辐

射。当该电子枪用作电子束源时,电子枪与激光放电室之间用厚 0.013 毫米的钛箔密封。当 Marx 发生器工作电压为 150 千伏时,输出电子束流密度约为 1 安/厘米²。此时虽也不可避免地伴随有 X 光产生,但从随后的实验结果可知,在这种情况下,X 光对激光介质预电离的贡献约为电子束的千分之一。当此电子枪用作 X 光源时,在电子枪窗口附近放置厚 0.013 毫米的钨箔作为 X 光管的阳极靶。电子枪窗口用厚 0.02 毫米的钛箔密封,再用两层厚度各为 0.1 毫米的聚脂膜以进一步阻挡可能从电子枪中逃逸出来的电子。电子枪加速电压为 150 千伏时,放电区 X 光强度是每个脉冲 10² 毫伦琴数量级。

收稿日期: 1982 年 2 月 1 日。

放电室中的预电离电子密度通过测量在恒定电场中的漂移电子流强度来确定^[3]。测量装置简图示于图 1。在金属网与阳极板之间加上恒定的电压，一般约 340 伏。电子在电场作用下向阳极作漂移运动，并为其所收集。电子流强度用每安培一伏的儒可夫斯基线圈测量。为了避免 Marx 发生器工作时地电位的瞬态变化所引起的干扰，测量部分与地电位隔离。测得的电流密度、电子密度值根据下面公式计算：

$$n_e = J_e / eV_d \quad (1)$$

V_d 是电子漂移速度， J_e 是所测得的电流密度值，在各种工作条件下的 V_d 见 [3]。

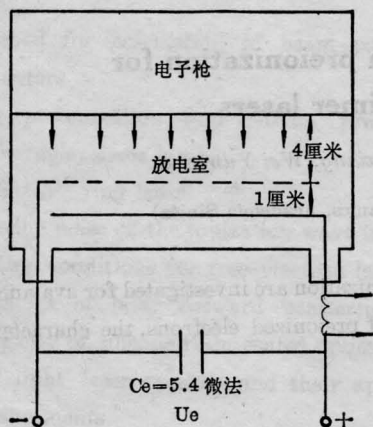


图 1 预电离测量装置示意图

二、实验结果和讨论

图 2、图 3 中分别给出在固定电子枪加速电压时，由 X 光预电离及电子束预电离产生的电子密度与放电室气压的关系。电子束在通过物质时，它的微分能量贮存速率 $\frac{dE}{dZ}$ 随所穿透质量厚度 Z 的变化，见文献 [4]。对于具有一定初始能量的电子束，它在穿透到某一质量厚度 Z 时，能量积存速率 $\frac{dE}{dZ}$ 达极大值。随后 $\frac{dE}{dZ}$ 随 Z 的增大而迅速下降，以至于最后到达一个截止点。对于 130 千电

子伏的电子束，由射程公式^[5]：

$$R = 412 E_0^{(1.265 - 0.0945 \ln E_0)} \text{ 毫克/厘米}^2 \quad (2)$$

($E_0 < 3$ 兆电子伏)

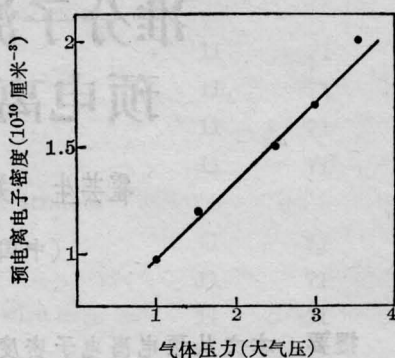


图 2 X 光预电离电子密度随气压的变化
电子枪加速电压 150 千伏；HCl: Xe: Ne = 0.1: 0.9: 99

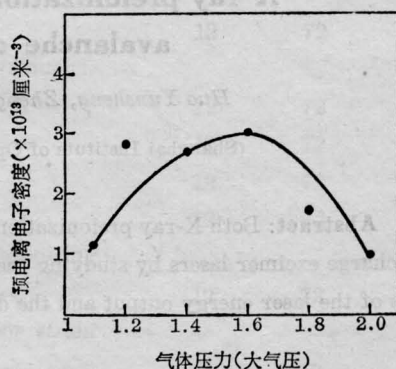


图 3 电子束预电离电子密度随气压的变化
电子枪加速电压 130 千伏；
Xe: HCl: Ne = 2.1: 0.2: 97.7

可算得射程 R_E 为 27 毫克/厘米²，其 $\frac{dE}{dZ}$ 的极大值约在 $0.37R_E$ 即 $Z = 10$ 毫克/厘米² 处。

电子束在通过气体介质时，它在单位体积中注入能量的速率 W 与气压 P 及微分能量贮存速率 $\frac{dE}{dZ}$ 的乘积成正比，即

$$W \propto P \frac{dE}{dZ} \quad (3)$$

本实验中电子束在到达测量点以前必须通过 13 微米厚的 Ti 箔，并在放电室中穿过 4 厘米厚的气体介质，其质量厚度随气压而变化。

对于加速电压为 130 千电子伏的电子束, 当放电室充气压力为 1.1 大气压时, 与其相对应的 $\frac{dE}{dZ}$ 在峰值附近略偏右方处。由于 $\frac{dE}{dZ}$ 在峰值附近下降较慢, 因此由式 (3), 随着气压 P 增高, 电子束注入功率 W 尚能增加。但当气压继续增高时, $\frac{dE}{dZ}$ 随 Z 的下降速率增大, 故虽然 P 仍在增加, 但 W 已随气压的升高而下降。因此在图 3 中, 预电离电子密度在 $P=1.6$ 大气压附近出现一个峰值。

上述结果表明, 在一个不太大的放电体积和不是很高的气体压力条件下, 已经可以看到电子束的弱穿透能力的影响, 对于 130 千电子伏的电子束, 当它在如图 3 所示比分的 HCl-Xe-Ne 混合气体中穿透质量厚度为 21 厘米-大气压的气体后已经损失了它的绝大部分能量。

X 光有很强的穿透能力。根据计算, 电子加速电压为 150 千电子伏的电子枪所产生的 X 光在穿过厚度为 0.02 毫米的 Ti 箔和 4 厘米厚、压力为 4 个大气压的 Ne-Xe-HCl 混合气体后, 强度仅衰减了 0.5%, 因此放电室气体压力升高对于到达测量点的 X 光强度影响甚微, X 光在激光气体混合物中所贮存的能量随气体压力线性增加, 所测得的电子密度随气体压力单调地增大。从这里可以看到, X 光对于高压、大体积气体激光器的均匀预电离, 具有很大的潜力。

图 4 表明, 当放电室气体压力固定为两个大气压时, 在 X 光预电离及电子束预电离两种情况下, 预电离电子密度都随电子枪加速电压的升高而增大。对于电子束预电离情况, 这是由于当电子枪电压升高时, 束流密度也随之增大。当二极管用作 X 光源时, 虽然在电子枪加速电压范围内, 气体对 X 光的吸收系数随加速电压的升高而下降^[6], 但由二极管的 $\frac{3}{2}$ 次方定律可知, 输入到电子枪中的

电功率正比于 $V^{5/2}$, 而 X 光的产生效率正比于 V^{17} , 因此所产生的 X 光强度正比于 $V^{7/2}$ 。所以 X 光注入气体介质中的能量仍然随着电子枪加速电压的升高而增大。

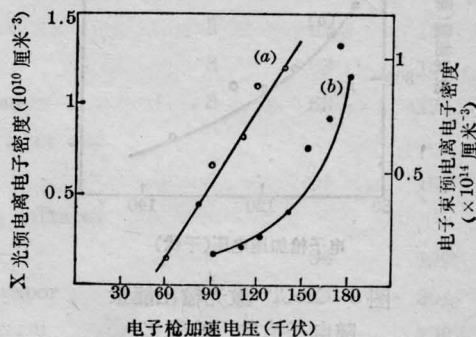


图 4 预电离电子密度随电子枪电压的变化
(a)—X 光预电离; (b)—电子束预电离
Xe:HCl:Ne=2.1:0.2:97.7; 充气压力: 2 大气压

在图 5 中给出了 X 光预电离放电及电子束预电离放电激励的 XeCl* 准分子激光器输出能量随电子枪电压的变化。如图所示, X 光预电离时, 激光输出能量基本不随电子枪电压变化。在电子束预电离时, 激光输出能量随电子枪电压的升高而减小。在实验所用电子枪电压范围内, X 光预电离比电子束预电离有较高的激光能量输出。对照图 4 中预电离电子密度随电子枪电压的变化, 我们可以看到, 在所研究的 X 光预电离情况中, 当预电离电子密度在 $10^9 \sim 10^{10}$ 厘米 $^{-3}$ 范围内, 激光输出能量基本上与预电离电子密度无关。根据 [8] 关于 X 光预电离 KrF 准分子激光器的结果, 在预电离电子密度为 $10^6 \sim 10^8$ 范围内, 激光输出能量随预电离电子密度的升高而增大。由此, 我们可以推断准分子激光器输出能量随预电离电子密度的变化有一个最佳值。当开始高于为得到均匀雪崩放电所需的最小预电离电子密度时, 激光输出能量随电子密度的升高而增大。当电子密度大到一定值时 ($\sim 10^9$ 厘米 $^{-3}$) 这种变化已经达到饱和。而高达 10^{13} 厘米 $^{-3}$ 的过高的预电离电子密度将导致激光输出能量的下降。

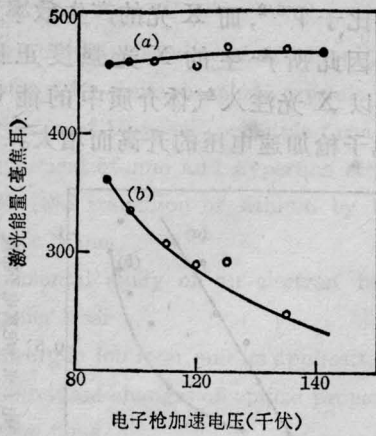


图5 XeCl* 激光输出能量
随电子枪电压的变化

(a)—X 光预电离; (b)—电子束预电离
Xe:HCl:Ne=2.1:0.2:97.7; 充气压力:2 大气压

为了了解在电子束及 X 光预电离情况下的放电特性及其对激光输出能量的影响,我们拍摄了在同样的放电室充气压力(2 个大气压)及电子枪加速电压(~150 千伏)条

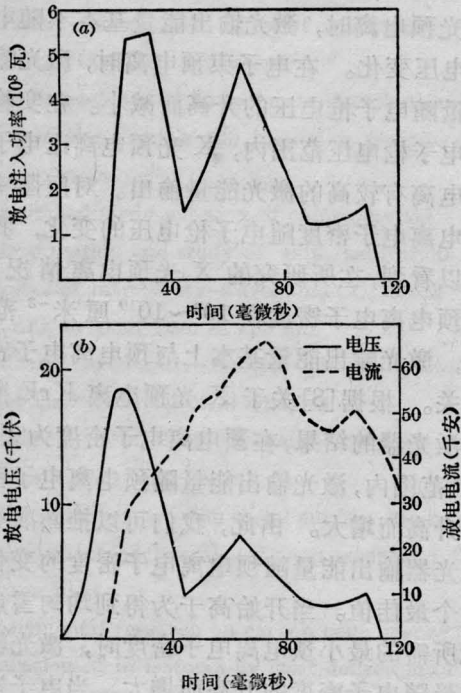


图6 X 光预电离放电注入功率(a)及
放电电压、电流(b)随时间的变化

Xe:HCl:Ne=2:0.2:97.8; 充气压力:
2 大气压; 电子枪电压:160 千伏

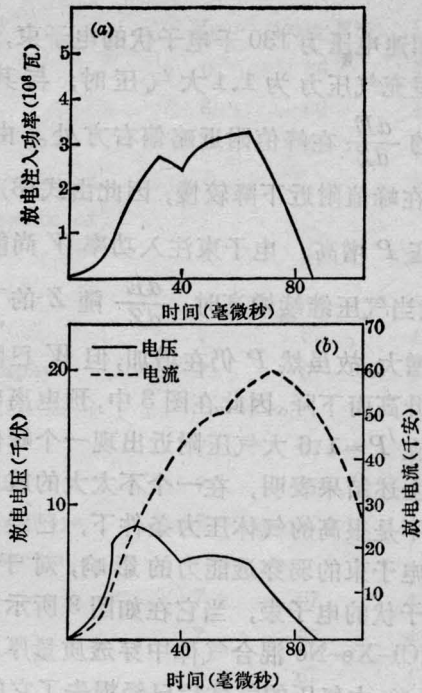


图7 电子束预电离放电注入功率(a)及
放电电压、电流(b)随时间的变化

Xe:HCl:Ne=2:0.2:97.8; 充气压力:
2 大气压; 电子枪电压:150 千伏

件下的主放电压、电流波形。图 6、7 是根据示波照片绘制的电压、电流波形图,及注入到放电室中的电功率的波形图。在上述两种情况下,在弧光出现以前的放电持续时间都是 90 毫微秒左右。

比较图 6、图 7 可以看到,放电电压、电流波形的主要差别在于:对于 X 光预电离,由于起始电子密度较低,当主放电电压加上后,滞后大约 16 毫微秒才开始出现宏观放电电流,在这段时间内,放电电压迅速上升到一个较高的值(约 18 千伏),出现了一个电压高峰。至于电子束预电离,由于放电室中原来已经存在有较高密度的电子,当主放电电压加上后,立即出现宏观放电电流并且放电室阻抗迅速减低,不存在时间的滞后,因而主放电压只能达到一个较低的数值(约 8 千伏)。与 X 光预电离情况下的电压尖峰相对应,放电输入功率波形图上也出现一个尖峰。

(下转第 752 页)

$$N = \frac{a^2}{\lambda L},$$

$$g_1 = 1 - \frac{h_2}{f} - \frac{l_2}{f} - \frac{L}{R_1},$$

$$g_2 = 1 - \frac{h_1}{f} - \frac{l_1}{f} - \frac{L}{R_2},$$

$$L = l_1 \left(1 - \frac{h_2}{f}\right) + l_2 \left(1 - \frac{h_1}{f}\right) + h_1 + h_2 - \frac{h_1 h_2}{f} - \frac{l_1 l_2}{f} \quad (22)$$

腔镜上基模光斑半径为:

$$W_1^4 = \left(\frac{\lambda L}{\pi}\right)^2 \frac{g_2}{g_1(1-g_1g_2)},$$

$$W_2^4 = \left(\frac{\lambda L}{\pi}\right)^2 \frac{g_1}{g_2(1-g_1g_2)}$$

在腔镜上, 光束波前与镜曲率半径相同。这与前面二种方法得到的结果完全一致。

参 考 文 献

- [1] H. Kogelnik; *Bell System Tech. Journal*, 1965, **44**, 2017.
- [2] Jurg Steffen *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1972, **QE-8**, No. 2, 239
- [3] 物质结构研究所二室一组; 《激光》, 1975, **2**, No. 3, 33.

(上接第 756 页)

比较图 6 和图 7, 预电离电子密度较低者, 输入的放电能量反而较大, 其原因主要是由于气体击穿以前出现了一个电压高峰, 因此在放电的起始阶段注入了较多的能量。两者的输入电能之比 $E_{x-ray}/E_{ob} = 1.6$, 而激光输出能量之比 $Q_{x-ray}/Q_{ob} = 1.8$ 。

三、结 束 语

电子束预电离能产生比 X 光预电离大二、三个数量级的预电离电子密度, 但对自持雪崩放电激励准分子激光器而言, 过高的初始电子密度对提高激光输出能量并无益处。X 光预电离已能产生足够的预电离电子密度, 并由于 X 光具有很强的穿透能力, 能在大体积、高气压放电器件中产生均匀的预电离。再考虑到当用作 X 光管时, 电子枪窗口可

以用较厚的箔与放电室隔离, 因而可以承受较高的气压与热负载。因此对于应用于高压及重复频率准分子激光器, X 光预电离优于电子束预电离。

参 考 文 献

- [1] 林绍基等; 《电子学报》, 1981, No. 5, 70.
- [2] Z. Rozkwitalski; *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**, 2267.
- [3] 郑承恩; 《激光》, 1981, **8**, No. 2, 5.
- [4] S. J. Kast, Charles Cason; *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**, 1631.
- [5] B. W. Schumacher; in "Electron and Ion Beam Science and Technology", edited by R. A. Bakish, 1965, p21.
- [6] C. M. Davison, R. D. Evans; *Review of Modern Physics*, 1952, **2**, 79.
- [7] S. C. Lin, J. I. Levatter; *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **34**, 505.
- [8] S. Sumida *et al.*; *Review of Laser Engineering*, 1979, **7**, 297.