

重复频率短脉冲氙灯的特性研究

汤星里 林文正 李凤英 陈莉菲 钱玉兰

(中国科学院上海光机所)

提要: 研究了用作染料激光器泵浦源的短脉冲氙灯, 闪光脉宽小于2微秒, 光强上升时间小于0.6微秒。在额定负载能量下有效使用寿命大于 10^7 次。本文主要讨论灯的物理与工艺参数对其负载特性和辐射特性的影响。

Investigation on characteristics of repetitive short pulse xenon lamps

Tang Xingli, Lin Wenzheng, Li Fengying, Chen Lifen, Qian Yulan

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

Abstract: Investigation on short pulse xenon lamps for pumping dye lasers has been made. The pulse duration and rise-time is less than $2\mu\text{s}$ and $0.6\mu\text{s}$ respectively, with a lifetime of more than 10^7 shots in normal discharge loading. The effects of the physical and technical parameters of the lamps on the maximum energy loading and radiative characteristics are described.

短脉冲氙灯在染料激光泵浦、光化学、高速摄影等方面都有广泛的应用。提高短脉冲氙灯的极限负载强度和辐射效率是这项研究工作的关键问题。

一、短脉冲氙灯的极限负载

与一般脉冲氙灯不同, 短脉冲氙灯工作于高电位梯度和大电流密度, 其峰值体功率密度可比一般脉冲氙灯高出三个数量级, 所以快放电过程中产生的冲击波对管壁的破坏起主要作用。

影响短脉冲氙灯极限负载的主要因素为: 封接方式、管壁厚度和电流上升速率。

1. 封接方式

现有的短脉冲氙灯常采用过渡玻璃封接

和钼箔封接两种方式。过渡玻璃封接的电极引出体可以有较大的截面积, 能承受较大的峰值电流, 但它的耐冲击强度低。钼箔封接具有很高的机械强度, 但钼箔的横截面较小, 约为0.4毫米², 而短脉冲氙灯的峰值电流比一般脉冲氙灯大一个数量级左右, 所以必须考虑封接区的电阻对短脉冲氙灯辐射效率的影响。经测量, 虽然钼箔封接区的电阻比钨杆引出体的电阻大四倍, 但其绝对值仍比灯的内阻小两个数量级, 因而封接区的能量损耗可以忽略不计。实测对比的结果表明: 钼箔封接的短脉冲氙灯的辐射效率与采用过渡玻璃封接的美国 ILO 技术公司的 L-2339 型短脉冲氙灯相等, 但前者的极限能量则高得多。表1是不同封接形式短脉冲氙灯爆炸能

收稿日期: 1982年4月1日。

表 1

型号	ILC-D 系列 (4D6)	ILC-2339	DMXD3/100 (上海光机所)
管径(毫米)	4	3	3
弧长(毫米)	150	100	100
封接形式	过渡玻璃	过渡玻璃	铝箔封接
电参数	$C=1.04$ 微法 $V=16.5$ 千伏	—	$C=2$ 微法 $V=22$ 千伏
爆炸能量 (焦耳)	141	40	484

量的对比, 经过对体积的归一化后, DMXD 3/100 的爆炸能量比 4D6 高 4 倍左右。

2. 管壁厚度

由于短脉冲氙灯快放电形成的冲击波是造成管壁破坏的主要原因, 所以适当增厚管壁可以提高极限负载强度。经实测对比, 在管壁、内径、弧长和充气压都相同的条件下, 将短脉冲氙灯的壁厚从 1 毫米增加到 2 毫米, 其爆炸能量增加 3 倍。

3. 电流上升速率

短脉冲氙灯的电流上升速率可高达 10^9 安/秒, 所以在触发着火之后, 放电沟道迅速膨胀, 形成强烈的冲击波。显然冲击波的强度取决于电流上升速率, 因而电流上升速率也是影响短脉冲氙灯极限负载强度的因素。

二、短脉冲氙灯的辐射效率

脉冲氙灯放电过程中的能量平衡如图 1^[1]。随着脉宽的缩短, 放电过程中内能的损耗(加热气体、激发与电离等)以及形成冲击波等越来越占主要地位。当脉宽为毫秒量级时, 辐射效率可高达 70%, 而脉宽为 2 微秒时, 其辐射效率只有 20% 左右(外触发点燃)。预电离可以增加气体的内能, 从而提高主放电的辐射效率^[2]。适当的预电离方式还可以改善灯的发光波形, 缩短光脉冲的前沿, 这一点对于染料的泵浦源尤为重要^[3~5]。

我们在实验中综合比较了各种预电离方式对短脉冲氙灯辐射效率及光波形的影响。

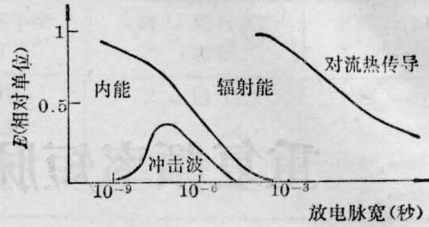


图 1

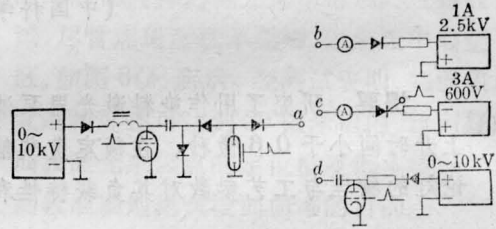


图 2

灯的尺寸为 $\phi 3 \times 100$ 毫米。点燃电路见图 2。(1) a 点开路为外触发点燃; (2) a、b 相接为连续预电离点燃; (3) a、b、c 相接为连续预电离加准连续的大电流预电离; (4) a、d 相接为预脉冲预电离点燃; (5) a、b、d 相接为连续预电离加预脉冲预电离点燃。

以 HW-1 型带石英窗口的真空辐射热电偶为接收器, 测量了灯的全辐射。以 GD-10 强流光电二极管测量灯光波形, 实验结果是:

1. 不同点燃方式对短脉冲氙灯的辐射效率和光波形的影响见表 2 和照片 1。

2. 在最佳预电离条件下, 不同充气压的短脉冲氙灯的全辐射效率及光波形与外触发点燃方式的比较见表 3。

从上述结果可以得出:

(1) 用预电离点燃可减少短脉冲氙灯的内能损耗, 提高辐射效率。

(2) 预电离点燃可大大提高短脉冲氙灯的辐射峰值功率。

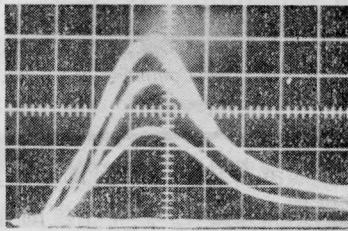
(3) 大电流连续或准连续预电离可明显地提高辐射效率, 而预脉冲预电离则能明显地缩短光脉冲的前沿。

由放电等离子体的自吸收理论可知, 当体能密度超过一定值时, 短脉冲氙灯的辐射

表 2

点燃方式	相对辐 射效率	相 对 峰 值	光 波 形		
			半宽 (微秒)	$\frac{1}{3}$ 峰值 (微秒)	上升前沿 (微秒)
外 触 发	1.0	1.0	1.7	2.4	1.1
小电流连续预 电离(30毫安)	1.6	1.8	1.8	2.5	1.2
准连续预电离 (240毫安)	1.6	2.1	1.6	2.3	0.8
预脉冲预电离 8千伏 (0.02微法)	1.3	1.5	1.7	2.6	0.7
预脉冲+连续 预电离	1.5	2.1	1.6	2.1	0.7

MDXD $\phi 3 \times 100$, 充气压 $P=75$ 托, $V_c=10$ 千伏, $C=0.24$ 微法, $f=13$ 赫, 预脉冲峰值电流 100 安, 脉宽 1.2 微秒



照片 1 短脉冲氙灯的发光波形

横轴: 0.5 微秒/厘米。自下而上分别为:
外触发、预脉冲、预脉冲加预电离、准预电
离点燃的主放电光波形

表 3

充气压 (托)	辐射效率 增加倍数	光 峰 值 增加倍数	前沿缩短 (%)
75	1.6	2.1	36
150	1.6	2.4	30
450	2.4	1.8	27

效率必然会趋于饱和, 而寻找这种辐射效率饱和和极限对设计短脉冲氙灯是很重要的。图 3 是 $\phi 3 \times 100$ 毫米短脉冲氙灯在不同点燃方式下的辐射饱和情况。

对不同极距的短脉冲氙灯测量结果表明: 相应于短脉冲氙灯辐射效率最高的体能密度约为 6~12 焦耳/厘米³ (在我们实验条

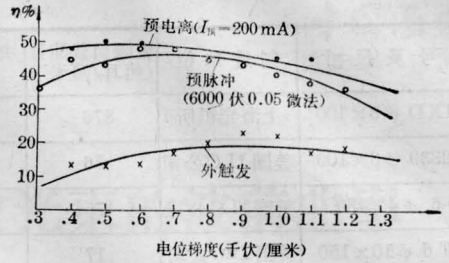


图 3

件下相当于电位梯度 0.6~1.2 千伏/厘米), 极距越短, 最佳体能密度(或相应的电位梯度)越大。

三、短脉冲氙灯的寿命

影响短脉冲氙灯寿命的因素除电极材料与面型、充气压之外, 还有灯管材料的纯度。这是由于短脉冲氙灯工作的电位梯度高、电流密度大, 所以灯辐射的短波部分比一般脉冲氙灯强得多, 如果融石英的纯度不高, 则在点燃几万次后灯管就会产生严重的色心着色现象, 于是辐射效率下降。

我们对 DMXD3/100 短脉冲氙灯进行寿命测定(定义辐射强度下降到初始值的 75% 为有效寿命), 结果见表 4。

表 4

灯 号	V (千伏)	C (微法)	f (p.p.s)	\bar{W} (瓦)	次 数	光 强 下 降
80-101	10	0.2	40	400	1×10^7	20.4%
80-103	10	0.47	40	940	2.2×10^6	11%
80-102	10	0.24	100	1200	3×10^5	13.2%

四、与国外同类短脉冲氙灯的比较

与美国 ILC 技术公司的三种型号灯对比见表 5。与美国 EG&G 公司的 FX-139C 型短脉冲氙灯的实测对比结果见表 6。

表 5

型号及尺寸	制造单位	极限负载能量 (焦耳/厘米 ³)	单次能量 (焦耳)	重 复 率 (p.p.s)	寿 命	光强下降	
DMXD $\phi 3 \times 100$	上海光机所	876	10	40~100	1×10^7	20%	1980
L-2339 $\phi 3 \times 100$	美国 ILC 公司	56	10	40	1×10^7	50%	1979 ^[2]
4 D 6 $\phi 4 \times 150$	美国 ILC 公司	75	82	—	10^4	—	[6]
10 F 6 $\phi 10 \times 150$	美国 ILC 公司	17	60	10	$>10^5$	—	1980 ^[5]

表 6

型号及尺寸	点 燃 方 式	光辐射效率(相对)	灯光峰值(相对)	上升前沿(微秒)
DMXD 3/100 $\phi 3 \times 100$ mm	外 触 发	2.90	3.7	0.85
FX-139 C $\phi 3 \times 100$ mm	外 触 发	1.85	3.1	0.90
DMXD 3/100	预 电 离	5.18	7.0	0.90
FX-139 C	预 电 离	4.52	4.6	1.05

参 考 文 献

- [1] К. Гюнттер; *Опн. и спекр.*, 1973, **34**, № 6, 1070.
 [2] Steven *et al.*; *Opt. Commun.*, 1979, **28**, No. 2, 221.

- [3] M. H. Ornstein *et al.*; *Appl. Opt.*, 1974, **13**, No. 9, 2100.
 [4] T. K. Yee *et al.*; *Appl. Opt.*, 1979, **18**, No. 8, 1131.
 [5] A. Hirth *et al.*; *Opt. Commun.*, 1980, **35**, 225.
 [6] ILC Technical Bulletins, No. 1 and No. 5.

(上接第 178 页)

一倍到几倍。

(2) 虽然目前半径理论的环形激光理论尚难以将离轴模的作用反映进去,因而理论上的定量分析仍存在着困难。但从我们的实验中似乎可以得到一些定量的结果,所加的附加衍射损耗基本上是限制 TEM_{01} 模所需的量,计算时所对比的各模理论衍射损耗值是按计算机数值求解法所给的结果(从其它的实验中也可以发现这种方法所给的衍射损耗值近似性较好)。

(3) 出于工程上的考虑,目前不宜将所加的附加衍射损耗直接采用缩小毛细管孔径的办法代替,这样做会因毛细管的变形、不圆度等而带来复杂的误差因素。

(4) 由于增益管增益的下降,会使限制 TEM_{01} 模所需的附加衍射损耗逐渐减小。

(5) 由于采用了附加衍射损耗的方法,使 RLG 工作在朗缪尔流动效应处于现行理论认为是不利的状态下,但多次实验表明,

综合的零漂曲线却达到了较好的水平,表明现阶段多模耦合是影响 RLG 精度的最主要效应之一。

本文所引用的大部分实验数据,是在苏州第一光学仪器厂与中国计量科学研究院、清华大学联合研制的四频环形激光陀螺原理样机上取得的。在实验研究过程中得到了国防科技大学高伯龙教授和中国科学院高能物理所朱起鹤教授的指导和帮助,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] W. E. Lamb; *Phys. Rev.*, 1964, **A-134**, 1429.
 [2] W. R. Bennett; "The Physics of Gas Laser", 1977, New York.
 [3] D. H. Auston; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1968, **QE-4**, 241.
 [4] 中国计量科学研究院,清华大学,苏州第一光学仪器厂(朱勤执笔);“四频环形激光的周期性零漂(详细摘要)”,第五届全国激光学术报告会(1980年,南京).
 [5] S. T. Dembinski *et al.*; *Phys. Lett.*, 1978, **68**, No. 1, 20.
 [6] 高伯龙,“四频环形激光的第二类闭锁效应”,全国环形激光陀螺学术交流会(1981年,苏州)。