

群灯泵浦激光器氙灯爆裂机制初析

茅 建 华

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

本文首次提出群灯泵浦高功率固体激光器在触发时氙灯发生爆裂机制分析, 并找出防止氙灯爆裂的途径。

关键词: 不均匀电场, 电击穿。

一、引 言

在高功率固体激光器技术的发展中, 为了不断地提高激光器输出的激光能量, 激光器的光泵结构已由单灯光泵发展成多灯光泵结构或群灯光泵结构, 在这一发展过程中遇到较为突出的问题是: 两种结构上的氙灯允许工作电压, 存在着明显的差异, 即群灯光泵结构上的氙灯其允许工作电压, 明显低于单灯光泵结构上的氙灯允许工作电压。在激光器上增加光泵氙灯的数量, 其主要目的是为了要提高激光器的光泵能量从而增大激光输出能量, 可是实际情况却是随着氙灯数量的增加, 氙灯的允许工作电压出现愈来愈明显的下降, 氙灯工作电压下降的结果则使光泵能量按工作电压的平方率的关系减少, 因此光泵氙灯数的增加并不能使光泵能量得到按氙灯数的倍率增长, 对特定的激光器而言, 氙灯工作电压的下降阻碍了输出激光能量的提高, 使激光器达不到预期的技术指标, 为此有必要弄清在群灯光泵的激光器上氙灯在引燃触发时发生爆裂的机制, 从中找出防止氙灯爆裂的途径和措施, 进而提高氙灯的工作电压以增加激光器输出能量, 改善激光器的性能指标和运载能力。

当群灯光泵的氙灯工作电压, 提高到单灯光泵氙灯允许工作电压时, 前者的氙灯极易发生爆裂, 激光器不能正常工作, 这样一个实际的现象表明氙灯爆裂与外施电压有关, 给研究氙灯爆裂机制提供了一个有价值的窗口, 弄清灯电极部位的玻璃(以下简称灯玻璃)材料的抗电性能以及玻璃介质电场对灯玻璃的破坏作用是十分重要的, 尤其要了解氙灯在引燃触发瞬间所发生的爆灯现象的动态过程, 将有助于找到防止氙灯爆裂的途径和措施。

二、氙灯爆裂的电击穿破坏机理

高功率固体激光器使用的光泵氙灯发生爆裂破坏的因素较多, 有氙灯制作工艺、结构、材料等方面造成的, 如灯管玻璃内应力消除, 过渡封接玻璃内静不定结构应力的分布不均匀性, 玻璃中的空气杂质等, 都可能引起氙灯破坏或爆裂, 这些都属于电真空器件工艺的问题。

对于经过测试检验筛选后的氙灯而言,造成氙灯允许工作电压明显下降,或者发生氙灯爆裂的现象,大多数情况与激光器的光泵结构设计有关,与氙灯的制作工艺无关,是氙灯使用上存在的问题,例如:氙灯玻璃介质电场的作用发生电击穿破坏,氙灯头部承受的按装应力等都可能使氙灯发生爆裂破坏,属于氙灯使用上存在的爆灯因素。研究玻璃介质电场对灯玻璃的电击穿破坏是十分有意义的,因为其目的是为了在群灯光泵激光器上提高氙灯的允许工作电压,从而提高激光器输出激光能量。

1. 影响灯玻璃绝缘耐压的因素

因为电击穿破坏的介质是玻璃材料,所以弄清玻璃材料在电场作用下的绝缘耐压性能就显得十分重要,现就影响玻璃材料绝缘性能的主要因素加以讨论:

(1) 玻璃介质电场的均匀性

据文献[2]报道,玻璃介质电场为均匀场时,其抗电强度 E_{np} 极大,可以达到 500 kV/mm ,若玻璃介质电场为极不均匀场时,由于边缘效应的影响,玻璃介质电场很低时便发生电击穿,如图 1 所示,这是在 50 Hz 频率的电压作用下,玻璃的击穿电压(峰值)与厚度的关系,从图 1 可以看到,当玻璃介质电场为均匀场时其击穿电压和厚度的关系由曲线 1 表示,玻璃材料的击穿电压随其厚度增加而线性上升,满足

$$U_{np} = E_{np}h, \quad (1)$$

式中 U_{np} 为击穿电压, E_{np} 为击穿电场强度, h 为玻璃

厚度。若玻璃介质电场为极不均匀场时,玻璃的击穿电压与其厚度呈非线性变化,玻璃厚度增加时其击穿电压上升缓慢,当厚度加大至一定值时再继续增加厚度,并不能使玻璃的击穿电压有明显的增高而趋向于饱和状,这是因为玻璃介质电场的极不均匀性产生的电场切向分量的作用,使玻璃表面发生沿面放电的边缘效应增强,击穿电压与玻璃厚度的关系由图 1 中曲线 2 所示。显然,随着玻璃介质电场的均匀性的增大,玻璃的击穿电场强度 E_{np} 也随之而降低,玻璃材料在极不均匀电场作用下,其抗电强度小于 20 kV/mm ,是均匀电场作用下抗电强度 500 kV/mm 的 $1/25$ 倍,即 E_{np} 降低了 25 倍之多。

据文献[1]报道的静电场分布求解结果,群灯光泵结构上氙灯数目的增多,灯玻璃介质电场愈趋不均匀,使灯玻璃的抗电强度 E_{np} 下降。因此单灯光泵与群灯光泵结构上的氙灯允许工作电压的显著差异,表明两种光泵结构上氙灯的灯玻璃介质电场的均匀性存在的差别,是一种内在的必然的联系。

(2) 玻璃材料的温度影响

光泵氙灯在引燃触发的瞬间,由于等离子体的初始形成,离子对玻璃的加热,以及阴极溅射物的散射至玻璃壁,都可以使玻璃温度升高,由于玻璃温度的升高使玻璃的抗电强度 E_{np} 下降。玻璃在直流电场作用下其击穿电压 U_{np} 为

$$U_{np} = 5.8 \times 10^{-3} \sqrt{\frac{\lambda \rho_0}{\alpha}} \varphi(\sigma), \quad (2)$$

式中 U_{np} 为击穿电压 [kV], λ 为电介质的热导系数, α 为温度升高时损耗的上升速度, ρ_0 为

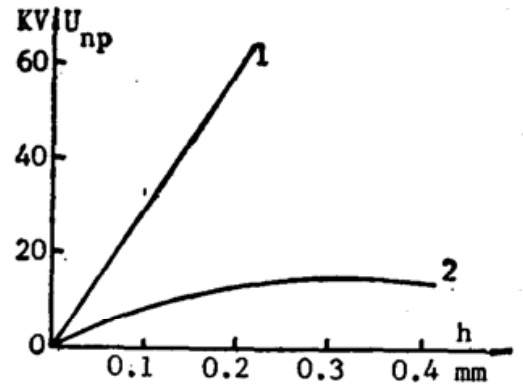


Fig. 1 50Hz breakdown (peak) voltage-glass thickness

1—homogeneous electric field; 2—most non-homogeneous electric field

当温度为起始温度时的电导系数和体积电阻系数, ϵ 为无名参数, 表征电介质通过电极向周围介质散热的条件, 从(2)式中可得, 当温度升高时介质损耗增大, $U_{n,p}$ 降低。玻璃作为脆性无定形介质温度升高时其机械强度会降低, 它的 $E_{n,p}$ 也会下降, 因此玻璃在高温下的电击穿通常带有热击穿的特性。

2. 氙灯爆裂的机理

当激光器使用的氙灯为直流供电时, 能库电容器完成了充电过程, 在对氙灯进行引燃触发的初始时刻, 某个或多个氙灯发生爆裂是常有的事, 其原因大致有以下几个方面:

(1) 灯电极部位电场的建立

在能库中储能电容完成充电过程, 氙灯的灯电极上已经荷电, 群灯电极之间的电场已经建立, 氙灯玻璃介质电场此时为极不均匀电场, 其抗电强度 $E_{n,p}$ 已降低。若此时氙灯的外加工作电压高到足以使玻璃介质电场强度 E_n 大于 $E_{n,p}$ 时, 氙灯即使未经引燃也会发生爆灯, 这是实际存在的现象。

(2) 灯电极表面 $\text{div } D \neq 0$ 层的位移

据文献[1]报道, 在灯电极的表面层的电场散度 $\text{div } D \neq 0$, 在其附近电场强度 E 最大,

电位梯度 $-\nabla U$ 最陡, 在引燃氙灯的初始时刻, 灯电极电场分布中的 E 最大区域内的气体首先离化成初始等离子体, 如果把这种局部的初始等离子体看成良导体, 无疑可以类此于灯电极的局部延伸, 如图2中由 A 点位移至 B 点区域, 在初始等离子体形成时, 氙灯内气体尚未完全导通, 因为氙灯的轴向尺寸远大于径向尺寸, 而灯管内气体完全导通放电是需要时间和速度的。此时灯电压稍有降落变化不大, 灯玻璃介质电场中的 E_n 由于电场中的 $\text{div } D \neq 0$ 的层面位移至管内壁附近而增大, 电位梯度 $-\nabla U$

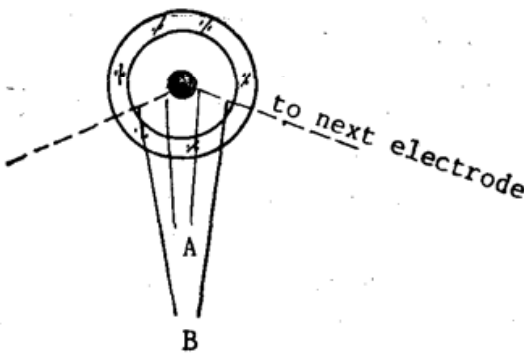


Fig. 2 $\text{div } D \neq 0$ range production displacement

A—before the trigger; B—trigger since

变陡, 这就增大了电场对灯玻璃电击穿破坏的作用量, 当介质内电场强度 E_n 的值大于玻璃的抗电强度 $E_{n,p}$ 时, 氙灯便会发生电击穿破坏而爆裂。

初始等离子体的局部形成过程中, 由于等离子体的冷壁效应的影响, 等离子体的延伸只是在灯管内壁附近而不能重合, 因此玻璃介质电场 E_n 尚未达到极大值, 当降低氙灯工作电压时, 使玻璃介质电场 E_n 下降, 直至满足 $E_n < E_{n,p}$ 时, 氙灯不发生电击穿爆裂, 灯电压下降得愈低, 则氙灯工作愈安全。

(3) 灯玻璃局部温度升高的影响

氙灯在引燃的瞬间, 初始等离子体便开始对灯玻璃进行局部离子加热, 使灯玻璃局部温度升高, 玻璃介质损耗增大, 尤其对于过渡玻璃的影响较大, 使玻璃内的静不定结构应力分布增加不均匀性, 温度的剧烈变化使玻璃产生不同层间温差应力, 这种温差引起的不均匀的热膨胀或收缩可以使玻璃产生裂缝而破坏, 从而降低抗电强度, 使氙灯玻璃产生电的热击穿影响。

上述两项因素都发生在氙灯引燃触发的初始时刻, 因此氙灯爆裂破坏发生在引燃氙灯的时候是必然的。

三、结 论

(1) 群灯泵浦激光器使用的氙灯发生爆裂破坏, 主要是由灯玻璃介质电场不均匀引起的。

(2) 氙灯爆裂破坏发生在引燃触发的瞬间, 是由于灯电极表面 $\text{div } D \neq 0$ 层发生位移, 灯玻璃局部温度升高所造成的。

(3) 改善灯玻璃介质电场的均匀性, 便可相应提高氙灯的允许工作电压, 增加激光输出能量, 同理可以降低氙灯的爆灯率。

有关群灯光泵结构激光器使用的氙灯爆裂机制分析的结果, 已经得到大量实际的运行实验结果所证实, 在 10^{10} W 高功率固体激光器上消除了爆灯因素, 使激光器爆灯率显著降低, 有关实验结果将另文发表。

参 考 文 献

- [1] 茅建华; 待发表。
- [2] Ю. В. Корицкий, Б. М. Тареев; «电工材料手册第一卷, 第一册», (机械工业出版社, 北京)。
- [3] K. J. Binns, P. J. Lawrenson; *Analysis and Computation of electric and magnetic field problems*. Pergamon press 1973.

Xe-lamps disruption scheme analysis in group lamps pumped high power solid laser

MAO JIANHUA

(Shanghai Institute of Optic and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 14 June 1990; revised 26 December 1990)

Abstract

The description of Xe-lamps disruption mechanism in group lamps pumped high power solid-state laser is given for the first time in this paper. The explode-proof approach for Xe-lamps is proposed.

Key words: non-homogeneous electric field, electric disruption.