

激光光源译文集

脉冲氙灯

内部资料·注意保存

激光情报编辑组

一九七三年十月

前 言

为使我国的激光事业能够在不久的将来赶上和超过世界先进水平,我们遵照伟大领袖毛主席关于调查研究和“洋为中用”的教导,编辑了“激光光源译文集”,作为了解国外现状的参考资料。

随着激光技术的迅速发展,人们对激光光源提出了越来越高的要求,从而推动了激光光源的研究。除以脉冲氙灯作为激光光源外,国外还针对各种不同目的,研究过其他各种激光光源。例如,为提高光源亮度、功率和泵浦效率、延长光源使用寿命的无极放电光源;为改善光源和激光工作物质之间的光谱匹配,提高泵浦效率,减少对激光工作物质破坏的电子束光源;为提高能量,减轻泵浦源重量,更加经济可靠的化学光源;适合于飞行器上使用的太阳能光源以及其它的一些特殊光源等。但是,由于这些光源做为激光光泵仍有许多缺陷,并且在技术上也相当困难,所以至今在激光技术中仍没有得到广泛的应用。

在激光技术中起着重要作用的脉冲氙灯,由于具有高亮度、高效率 and 巨大的功率,以及能在必要的时间内重复工作和结构简单、制作容易、有较长的使用寿命等优点,因此,自六十年代激光技术问世以来,就一直得到广泛的重视和应用。目前看来,作为大能量和大功率激光输出的激光光源,它仍是最有成效的。因此,我们将几年来同志们结合工作需要所译出的较有参考价值的脉冲氙灯方面的文章加以整理,审编印行,供研制和使用氙灯的有关同志参阅。

文集内容如下:

第一部分,综述脉冲氙灯的一般性能、研究现状和应用,并指出目前存在的问题与进一步研究的方向。

第二部分,论述脉冲氙灯的光谱、辐射本领和自吸收、光效等光学特性,并给出一些相应的测量方法。

第三部分,论述脉冲氙灯的电学特性,主要是电阻特性,同时还介绍了氙灯放电等离子体若干参量的研究方法。

第四部分,论述脉冲氙灯的运用特性,着重介绍脉冲氙灯性能与氙灯参数和供电回路参数之间的关系,以及供电回路的合理设计。

第五部分,简要介绍脉冲氙灯中电极和管壁材料破坏的机制,以及它们和脉冲氙灯寿命的关系。此外,还介绍了脉冲同轴氙灯的性能。

文集最后并附有美、苏等国脉冲氙灯的产品表。

由于我们水平有限,时间仓促,本文集仅着重搜集有关脉冲氙灯方面的文章,而对有关脉冲氙灯的基础理论以及重复频率氙灯等方面的材料,则未系统编入。特别是在我们编译过程中,难免有许多差错和不妥之处,希望读者提出批评指正。

关于一些专业词汇问题,目前各国作者用词很不一致(如闪光灯、闪光管、放电灯、脉冲灯等等),文中基本照译,未作统一,特此说明。

本文集由王焕灯、陶永祥、梁宝根、徐捷、何湘君等同志负责组织编辑,最后由周稳观、汤彝君、田守云同志校阅。

激光情报编辑组 1973. 10.

毛主席語錄

思想上政治上的路线正确与否是决定一切的。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

学习有两种态度。一种是教条主义的态度，不管我国情况，适用的和不适用的，一起搬来。这种态度不好。另一种态度，学习的时候用脑筋想一下，学那些和我国情况相适合的东西，即吸取对我们有益的经验，我们需要的是这样一种态度。

目 录

前言

一、脉冲氙灯的技术现状

电子闪光灯的新发展	(1)
激光器的泵浦灯	(9)
惰性气体闪光灯: 现状和未解决的问题	(18)

二、脉冲氙灯的光谱特性和光效

脉冲和连续氙放电的光谱	(24)
惰性气体闪光灯的比较	(30)
石英管中放电产生的稠密氙等离子体的辐射能力	(36)
氙闪光灯管不透明性的直接测量	(39)
激光闪光灯	(42)
氙等离子体中辐射的吸收	(48)
气体种类对管状脉冲灯效率的影响	(52)
大尺寸管状脉冲灯效率的研究	(54)

三、脉冲氙灯的电特性

氙等离子体的电阻率	(56)
大尺寸直管脉冲灯中氙放电等离子体电阻率的测量	(58)
充氙石英管中脉冲放电等离子体柱的电阻	(62)
电极附近的无用体积对氙灯电阻的影响	(67)
惰性气体中高压脉冲放电等离子体的电特性	(68)
氙脉冲放电初始阶段的等离子体温度	(73)
用干涉度量法测量氙脉冲放电参数	(76)

四、脉冲氙灯的运用特性和电路设计

氙气放电灯与固体激光器的匹配	(81)
直管氙灯的特性和运转	(87)
直管氙灯的最大限额	(91)
用实验方程分析氙闪光灯的特性	(96)
预言氙闪光灯性能的模型	(104)
脉冲激光器电源的设计	(107)
脉冲氙灯放电电路的设计	(115)
闪光灯工作电路的设计	(119)

匹配脉冲激光器的闪光灯	(123)
-------------------	-------

五、脉冲氙灯中的电极和管壁

气体放电中电子发射材料的研究和发展	(125)
惰性气体中脉冲放电的阴极破坏	(134)
电极材料对石英管状脉冲灯寿命的影响	(139)
脉冲灯电极腐蚀生成物对灯管强度的影响	(141)
玻璃和陶瓷在高速传热时的性能	(143)
短闪光状态下管壁蒸发时脉冲灯的破坏	(153)
空腔型石英脉冲灯的特性	(155)
空腔灯泵浦激光器	(158)

附录:

美、苏等国脉冲氙灯型号规格一览表	(160)
------------------------	-------

电子闪光灯的新发展

提 要

氙闪光灯已广泛地用在各个领域,其中包括高速印刷、激光器激励、信标、夜间空中摄影侦察,频闪观测和外空照明等。对每一种应用来说,在选择合适的闪光灯设计时,如下的一种或多种特性变得非常重要,它们是寿命、光谱效率、平均功率、单次闪光能量、重复速率、电源尺寸和触发器的一些要求。本文提供了关于决定这些特性的基本概念,以及有关氙等离子电阻率、电极损坏、光谱输出、能量平衡和冷却方法的最新情况。

一、引 言

电子闪光灯最初是作为不发光物体的高速照像设备而设计的。今天,它们广泛地用在科学和其他领域中,由于氙闪光灯能产生可达七个数量级的辐射脉冲能量,因此使这些设备得到了广泛的应用。除了作高速照像胶片曝光的每秒上千次光源,以及对振动或往复机械零件作视觉与照像检查的频闪观测工具外,氙闪光灯也用作激光器的光泵,海岸警戒浮标和测地卫星的显示信号、夜间空中摄影侦察的光源。小型氙闪光灯系统用于集会、定位、跟踪、寻找及警戒,也可能作为飞机、炸弹、鱼雷、火箭及空中飞船的辅助设备。

在所有这些五花八门的应用,即使用闪光灯的照片和非照片应用中,每个部件的特性^[1,2],例如闪光灯的特性必须充分适应这些任务的要求。系统具体的使命要求氙闪光灯的寿命、脉冲持续时间、平均功率、每次闪光能量、重复速率、电源尺寸、以及光束轮廓均应满足系统需要。根据这些具体的参数,设计者进行具体的闪光灯弧长、管径尺寸、结构、工作电压和电容的设计。

本文提供了最近研究的新方法,目的在于帮助科学工作者设计出满足特定应用中特殊要求的氙闪光灯系统。这个资料是根据氙闪光灯和闪光灯技术的大量实验资料而来的,由于篇幅的限制,本文只提供通常认为较重要的闪光灯系统的参数,并详细说明它们的设计方法。

二、闪光寿命的估计

当考虑使用氙闪光灯时,必须首先确定闪光灯的闪光次数,也就是确定闪光灯的寿命。在给出关于闪光能量、闪光速率、平均功率和闪光持续时间的足够资料以后,运用闪光能量最大极限的概念,就可以估计寿命。任何闪光灯的闪光能量的最大极限,就是闪光灯单次放电而未发生爆炸(致命性破坏)的最大能量。在一指定的应用中,每次放电的闪光能量是用灯管极限的百分数来表示的,而寿命数量级可以和该百分数联系起来。

值得指出,闪光灯寿命的终结形式可能是以下两种情况中的任一种:当每次闪光的放电能量高时(比极限负载高50%),闪光灯将遭到致命性的破坏;当每次放电能量低于极限负载的50%时,灯通常不会突然终结寿命,但因连续闪光,光输出将逐渐降低、最终降到特定应用所需要的水平以下而变得无用。后一种破坏形式中,光输出的降低是由于闪光灯管电极和石英壁的腐蚀生成物在管壳上逐渐附着而引起的。这些沉积物为压力波和因放电管壳冷热不均引起的气流所左右^[3,4]。

图1的一系列高速照片显示出闪光灯*炸成碎片的过程,照片中的闪光灯用闪光持续时间为700微秒、峰值电流1000安培的脉冲激励,电流由两节充电到4000伏的960微法电容器放出(该条件超过了灯极限闪光能量的2倍)。每帧胶片时间距离为16

* EG&GFX-45A。

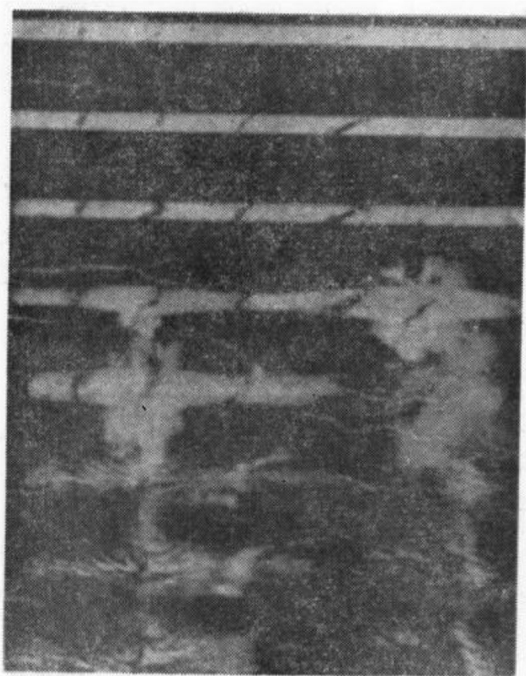


图1 当负载为极限负载的二倍时, FX-45 闪光灯爆炸的一连串高速照片

微秒, 可以看出, 闪光出现大约 300 微秒后开始爆炸, 也可以看到触发丝刚好在爆炸发生前蒸发。

氙闪光灯运转的极限能量^[5]通过一系列维持脉冲持续时间恒定、逐渐增加闪光能量直到使它发生爆炸的实验确定。正如所预料的, 内径和脉冲持续时间不变时, 闪光能量的最大极限由线性负载决定(每英吋弧长的焦耳数); 即脉冲持续时间相同时, 12 英吋长的闪光灯的极限负载刚好是 6 英吋长的两倍。增加内径或脉冲持续时间都会使极限负载增加, 极限负载和脉冲持续时间的关系是平方根的关系, 而和内径尺寸是线性关系。

直管氙灯极限负载的经验表达式(用每英吋弧长的焦耳数)为:

$$U/L = KD\sqrt{T} \quad (1)$$

当内径 D 用毫米表示, 电流脉冲持续时间 T 用毫秒表示时, K 值为 90。该等式画成图解(如图 2), 就可以使内径和脉冲持续时间给定时熔石英闪光灯极限负载的计算简化。例如用它来估计脉冲持续时间为 400 微秒的情况。

一熔石英灯样品* 其外径 15 毫米, 内径 13 毫米, 弧长 6.5 英吋, 在 400 微秒放电时, 由图给出的该灯的极限负载为 800 焦耳/吋, 总极限为 800×6.5 或 5200 焦耳。

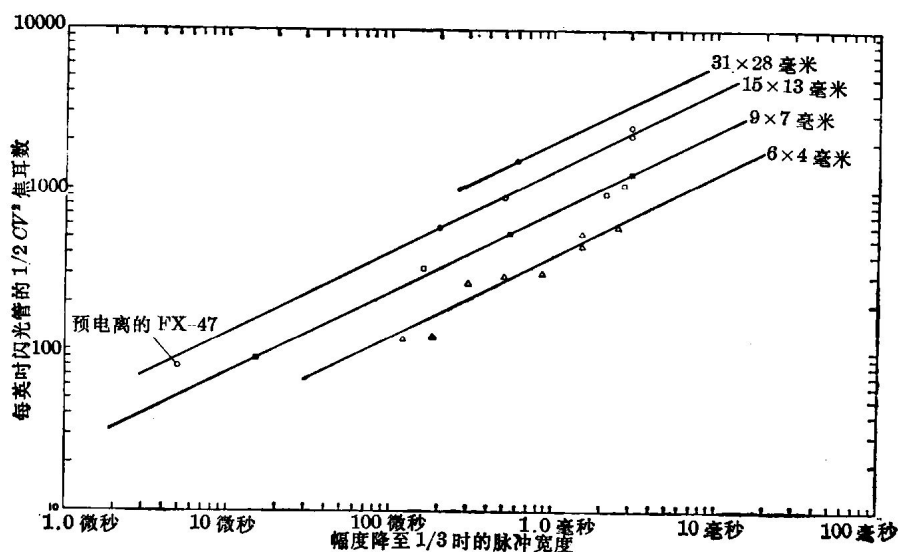


图2 熔石英直管氙灯输入闪光能量极限

当一个灯的极限负载确定之后, 就很容易知道灯在某一种指定应用中的寿命, 因为所使用的极限能量的百分数越低, 寿命就越长。如果遇到特殊情况, 需要最大光功率输出, 则放电能量增高, 结果就缩短了寿命。图 3 示出了灯** 的寿命随负载变化的例子。

两种考虑, 所希望的寿命和能量的大致关系在表 1 中示出。该表是根据大量寿命实验的记录做出的, 它可以准确地估计闪光灯寿命的数量级。

* EG&GFX-47A 型通常用来泵浦高能激光器。

** EG & GFX-38A。

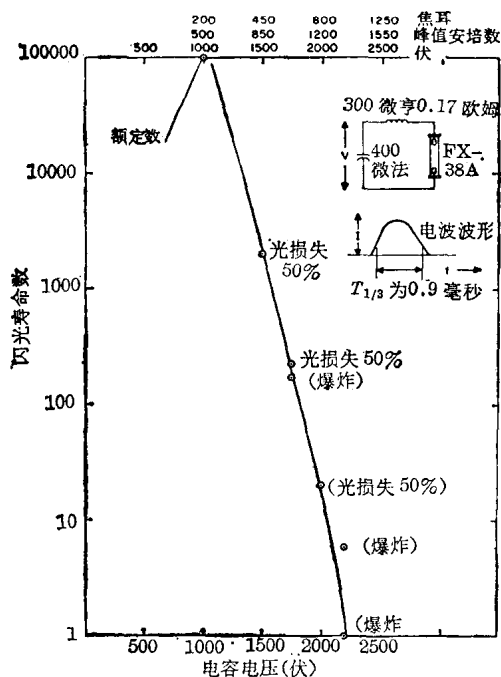


图3 FX-38A 闪光灯的闪光数(寿命)及破坏形式与输入闪光能量的关系

表1 预期的闪光寿命

闪光能量 (极限负载的百分数)	闪光寿命 (闪光次数)
100	0~10
70	10~100
50	100~1000
40	1000~10,000
30	10,000~100,000

值得指出,完成上百次的寿命实验来提供这样一个普通的数据是不值得的。因为对某一类型的灯来说,将脉冲持续时间和闪光能量作为两个独立的参数进行试验,这就要导致几十种不同的实验状态。此外,需要用几种类型的灯测量每一个脉冲持续时间的能量点来建立统计资料,这就加重了经济负担。然而这些数据是从好几种工作中积累起来的,所以提供了有用的指导。举一个 FX-47 A 闪光灯的例子来说,如果它在 2500 焦耳、400 微秒脉冲持续时间内闪光,由于该负载大约为极限负载的 60%,所以人们就可以预计它的寿命的数量级为几百次闪光。假如实际应用中保证这一点,在具体的系统运转条件下,在寿命之内实验就可完成。

此外,在估计闪光灯寿命时,必须考虑灯的结构及所使用的系统。表 1 给出的寿命数据不能直接用于螺旋管灯,因为螺旋管灯相邻的二圈辐射使石英

的每英寸焦耳数负载大大增加。

同样,如果闪光灯用在封闭的反射腔中泵浦激光晶体,寿命因子肯定要降低一些。在这些应用中,一部分辐射能返回到灯里(返回的多少由腔的反射率直径和它的聚焦特性所决定有关)。使伴随着每次放电的腐蚀和损坏显著地增加。灯管实际上好象经常承受着比实际消耗在灯管上多 30% 的能量。使用 FX-47 A 的大量经验指出,在闪光负载为极限能量的 70% 时(灯在自由空气中寿命为 100 次闪光的条件),若将灯放在直径为 4 英寸的反射腔中心,经过几个脉冲后,灯管就要爆炸。

在激光器泵浦系统的封闭反射腔中遇到的情形,对灯来说是极坏的情况,在高能量的应用,如高速照象中,则需要考虑反射器的设计,在这些情况下,闪光灯限制在密封的罩内工作,由反射器带来的附加负载也可能是灯的寿命因数。

为了更进一步了解聚光腔对灯寿命的影响,人们必须更多地知道等离子体吸收它本身辐射的特性。Emmett, Schawlow 和 Weinberg 用实验直接测出了氙闪光灯不透明性^[6],使一束单色光通过被激励的闪光灯,他们发现光通过 1 厘米氙等离子体通道时,透射由瞬时激励的电流密度和探测光束的波长决定,图 4 指出,氙等离子体是怎样因电流密度的增加以及探测光束波长的变长而愈来愈失透的,但他们的测量,没有提到探测光束损耗的功率是否被转变为热,或者是简单地直接被散射,而无波长的变化,我们的观察指出,氙等离子体吸收的一部分光确实在灯内产生了附加热量。

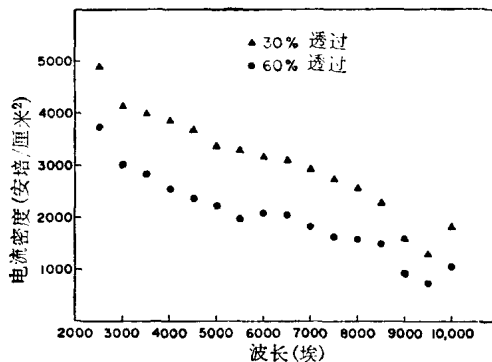


图4 对于一恒定的穿过 1 厘米氙等离子体通道透射光束,等离子体电流密度与透射波长的函数关系

三、新闪光灯的工作电路

氙闪光灯最早的应用之一是在特定的瞬间产生

闪光,来照明物体以曝光照象底片。在最初的使用中,闪光的时间间隔比较长(10秒或更长),这使用图5的电路1已足够了,虽然贮能电容的充电电阻至少浪费了50%的有用直流功率,但因电路简单,还是有用的。用一根金属丝绕在灯管外面或导电涂层涂在灯管外面几圈作为触发器电极,电位是由升压变压器供给的,该电位产生足够的电离以使主放电发生。

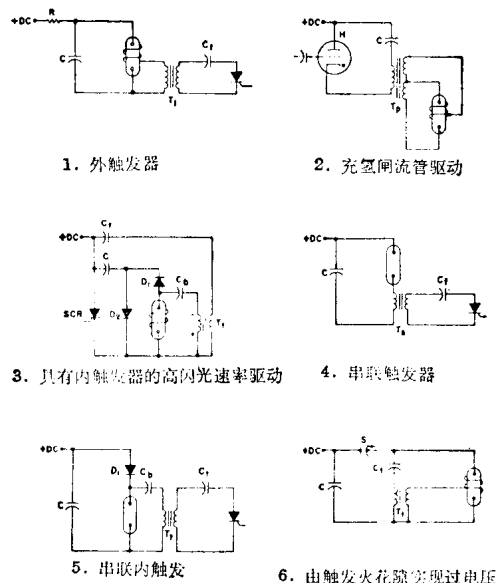


图5 闪光灯触发电路

- | | |
|---------------------|--------------------|
| R_1 —充电电阻器 | C_1 —贮能电容 |
| C_t —触发器电容 | T_t —触发变压器 |
| H —充氩闸流管 | T_p —带触发绕组的降压变压器 |
| C_b —隔直电容器 | D_1 —隔离二极管 |
| D_2 —提供直流充电电流的二极管 | |
| T_s —串联触发变压器, | S —触发火花隙 |

当氩闪光灯作为必须以高速率闪光的频闪监视器时,这种电路带来了某些问题。尽管限制充电电流和防止延续充电的电阻器可以用饱和扼流圈代替,这种饱和扼流圈可以产生同闪光灯恢复特性更匹配的电压再现波形,但是在闪光次数超过1000次/秒时频率范围仍是靠不住的,其根本原因是由氩闪光灯的恢复时间引起的。为了防止灯自闪,闪光峰值电流愈高时,再现电压时间间隔必须愈长。

在某些较大的闪光灯中,必须使放电电流间隔70毫秒的时间,才能使电离完全消失。自然,这样长的周期在要求高重复率的高速照象中是不利的。为了解决高重复率问题,设计者利用了恢复性能快的交替开关,如充氩闸流管及可控硅整流器。图5中的电路2是这种基本电路,电路中的气闸流管以

高达10000次/秒闪光的重复率驱动管。脉冲变压器用来使氢低电感的灯和高电感的闸流管相匹配,并使闸流管着火。图5中的电路3是利用可控硅整流器“恢复”特性来实现闪光灯的高重复率、高功率运转的电路,电路中,触发器贮能电容和主放电电容是由同一个可控硅整流器控制的。

在某些应用中,加在灯管上的外触发丝会引起一些严重问题,如在激光腔中,这种装置的存在使得偶然对聚光腔的电压击穿的可能性大大增加。在这些应用中,不用外触发丝的触发方法是非常理想的。电路4和5则满足了这种要求。在这个串联触发电路中,饱和变压器产生的电压必须足以击穿灯本身的电压,但次级电阻必须大大低于闪光灯的电阻。由于串联触发变压器次级绕组必须用许多圈直径粗的金属线绕制,因而变得既笨重又庞大。利用可隔离上千伏反向电压、正向通过上千安培的廉价固体二极管设计的实际电路如图5所示,该电路有一个非线性隔离元件接在放电通路中,这样就可以使高压脉冲直接加在灯上并将其击穿。

当闪光灯必须在高于自闪电压时使用,或者希望电压和灯的两端在放电之前断开时,通常使用电路6。该电路在两种情况下是必须的:第一种情况是在带有防护眼睛条件下使用闪光灯,闪光灯的光使观察者戴的特殊涂层透镜变色(这将导致涂层透过率很快降低),由于闪光靠人的脸很近,在脸部区域必须消除高压。第二种情况是用闪光灯为拍摄准备爆炸的核反应堆提供照明。如果在线路6中没有火花隙,出现核辐射时灯将自闪,拍照者将失去对闪光时间的控制。

四、闪光持续时间的控制

在许多闪光灯的应用中,闪光持续时间是关键的设计参数,除了满足高速照相对象清晰度的要求外,还可以立刻想到另外三个例子:在激光晶体的光学泵浦中,如果使用的闪光持续时间比光学激活物质(红宝石约为3.0毫秒,钕玻璃约为300微秒)的弛豫时间长,这是一种浪费;由于目前飞机的速度和高度,夜间航空侦察摄影要求的闪光持续时间必须为1.0毫秒或更短,以防止象模糊;最后,闪光的光解实验要求在5微秒的持续时间内产生大量的光。

为了获得特定的闪光持续时间,有四个参数可以提供设计者使用,这四个参数是电压、电容、弧长和孔径。尽管设计者在选择这些参数时有某些伸缩

性,然而,这些参数中至少有两个——弧长和孔径,是为每次闪光能量、灯管寿命和效率的共同要求所确定的。这样,人们往往只有选择电压和电容的余地。

闪光持续时间的计算依赖于对闪光灯电阻的了解,由于闪光灯的电阻不只是取决于灯本身,因此计算是有些困难的。在大多数情况下,氙等离子体的电阻率和电流密度的平方根成反比^[7],而这些参数的依赖关系必须在闪光持续时间确定之前得到,该关系为:

$$\rho = 1.13 / \sqrt{J} \quad (2)$$

这里 ρ 是氙等离子体电阻率(欧姆-厘米), J 是电流密度(安培/厘米²)。

闪光灯电阻为:

$$R = \rho L / A \quad (3)$$

将等式(2)代入等式(3)有:

$$R = 1.13 L / \sqrt{IA} \quad (4)$$

这里 L 是弧长, A 是截面积, I 是瞬时电流。

由于计算电阻率需要知道电流密度,因此必须研究放电电路。闪光灯通常是在下面三种放电电路中的任何一种中运转的:电容放电,电感——电容放电,脉冲形成网络。下面逐个考虑这三种情况。

五、电容放电

这是通常使用的最简单的闪光灯放电电路,电路中,闪光灯本身作为开关而没有其他复杂电路,对于这种情况,闪光持续时间由下法得到:根据等式(4)确定放电峰值电流时的闪光灯电阻。如果在放电的整个期间内的闪光灯这个电阻为恒定,则功率即光函数将有如下关系:

$$P = (V^2 / R) e^{-2t / RC} \quad (5)$$

而和它相联系的有一个闪光时间常数 $T = RC / 2$ 。但是,这样算出的 R 是和放电期间的最大峰值电流相对应的最低电阻,由于在放电期间的部分时间里的 R 通常比算出的 R 大,所以闪光持续时间实际上比用 $RC / 2$ 算出来的时间长。在实际中,我们发现,闪光持续时间可由下式估算:

$$RC / 2 < T < RC \quad (6)$$

其值相差不超过两倍。

六、电感——电容放电

在很多情况下,希望降低纯电容放电的峰值电

流,延长脉冲持续时间以便延长闪光灯的寿命。这可通过在放电电路中装一个空心电感而达到,然后算出在 $R-L-C$ 放电电路中的持续时间,这在许多电子工程手册上已很好地处理了。虽然电路既可能是欠阻尼也可能是过阻尼的,但通常总使用在临界阻尼附近的,这样就不会出现反向电流。在这种情况下,闪光持续时间由下式给出:

$$T = \pi \sqrt{LC} \quad (7)$$

确切地说,只有在 R 为常数时这个表达式才是有效的,但由于误差很小,仍可以用来计算闪光持续时间,实际上,阻尼比用峰值放电电流所对应的 R 进行电路计算的估计值要大一些。其实,在同一电路中,仅通过增加电容上的电压,就可以看到从非振荡放电到振荡放电的过程。电压的增加使峰值电流上升,灯的内阻降低,因而阻尼减小。

七、脉冲形成网络

为了准确控制脉冲持续时间,并产生一个平顶的光脉冲,采用了脉冲形成网络。它是由两个或更多(最多到16节) LC 网络串联组成的。设 L_t 是总网络的电感, C_t 为总网络的电容,则相应的特征阻抗 Z_0 和脉冲持续时间 T 为:

$$Z_0 = \sqrt{L_t / C_t} \quad (8)$$

$$T = 2Z_0 C_t = 2\sqrt{L_t C_t} \quad (9)$$

因系统的能量由熟知的等式 $U = \frac{1}{2} CV^2$ 给出,把它与等式(9)结合,可得到一个有用的关系,

$$V = 2\sqrt{Z_0 U / T} \quad (10)$$

由于等式(10)用系统能量和脉冲持续时间给出了运转电压,所以是有用的设计等式。为了最有效地转换能量,闪光灯电阻 R 应等于特征阻抗,这样才不至于出现脉冲的反射。当闪光灯的放电电流是常数时,那么在放电期间它的电阻也是常数。关于 R 的值确定之后,上面的方程式就可以使用。采用脉冲形成网络时,可用来计算放电期间瞬时电阻的峰值电流为:

$$I_p = \frac{V}{Z_0 + R} = \frac{V}{Z_0 + C / \sqrt{I_p}} \quad (11)$$

I_p 有两个解:

$$I_t = \left(\frac{-C \pm \sqrt{C^2 + 4I_p Z_0}}{2Z_0} \right)^2 \quad (12)$$

* 原文有误(译者注)。

这里

$$C=1.13L/\sqrt{A}$$

必须用正号,因为负号导致峰值电流比短路电流(V/Z_0)大,从物理意义上来说,这是不可能的。

八、光谱输出和能量平衡

尽管氙灯的辐射中实际上存在着紫外和红外,绝大部分系统利用可见光谱的能量,以产生某些预期的效应。在许多应用中,设计利用氙灯的系统时,最重要的要求之一就是关于输出光谱的情况*。人们不仅需要知道在某些情况下的相对光谱分布,而且也要了解它的绝对幅值,象在航空和卫星的应用中,以及对胶片灵敏度须作考虑的情况就是如此。在航空和卫星定位中,配给氙闪光灯系统的功率通常严格地限制在系统的计划范围之内^[8,9]。由于氙闪光灯可以看作是有一部分初始功率转换为胶片、光电探测器、或人的眼睛能探测到的辐射的换能器,那么所利用的部分初始功率和它所出现的光谱部分就是系统设计的主要内容。

直到目前为止,关于氙闪光灯的绝对光谱效率的有用的可靠资料很少^[10],文献中的资料常常以相对幅度给出,还要设计者估计他使用的有效初始功率为多大。此外,往往给出的数据是关于在特定的电压和电容下工作的具体类型的灯,这就存在对相同的灯如何用外推法得到不同状态下使用的条件,这方面的线索是很少的,但已有某些可喜的发展。

最近研制了一种仪器**,使得光谱的辐射测量成为可能,该仪器是由国家标准局定标的。氙放电光谱的测量^[10](脉冲放电和连续燃点二种情况)指出,氙放电的效率和光谱分布主要由放电期间的电流密度决定。

图6表示在两种电流密度下运转的氙闪光灯***的绝对光谱输出,这些光谱是管壁约束的氙闪光灯的典型光谱。和电流密度相联系的光谱的性质可以外推到其他类型的灯。在低电流密度的情况下,谱线由连续光谱及很强的800到900毫微米之间的线光谱所组成。随着电流密度的增加,谱线以这样一种方式连续变化;连续谱升高,线状谱被掩盖,谱的峰值移向短波方向。由于电流密度增加之后,光谱短波部分的辐射功率比光谱长波部分的辐射功率的增加快得多,事实上光谱的红外部分可能饱和到一定程度,以至于增加脉冲功率后实际并没

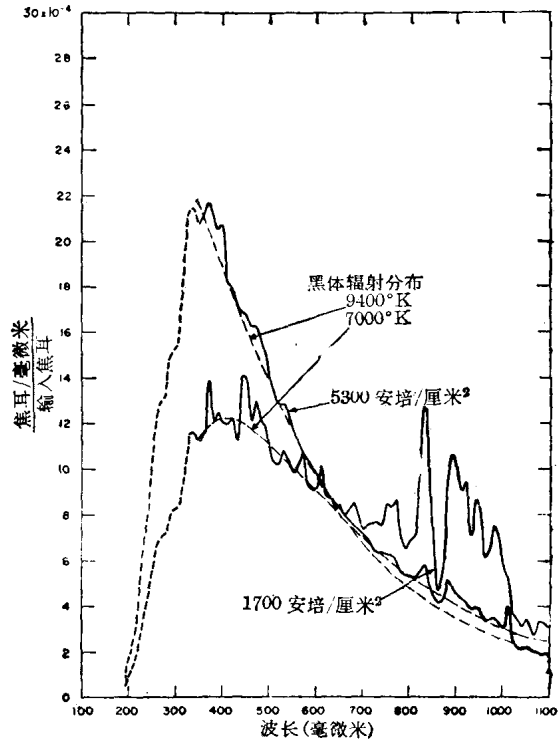


图6 在两种电流密度下FX-47A闪光灯的辐射光谱的带宽为10毫微米,相对应的黑体曲线给出这两种电流密度时的色温

有使红外输出增加。这和 Emmett、Schawlow 及 Weinberg 等人的结果是一致的。他们指出,在电流密度增加时,光谱长波部分的透过率要降低(也就是较黑暗)。

在图6中,绝对光谱效率可以直接从纵坐标读出。在1700安培/厘米²的电流密度时,在可见光谱区,闪光灯将贮能的8~10%转换成每100毫微米带宽的辐射能。在电流密度高时,在光谱的可见和蓝色区域,每100毫微米带宽的转换效率接近20%,与此同时,红外的转换效率降到3%。

高电流密度放电时,由于闪光灯在极限负载的较高百分数下运转,工作寿命变短,而电流密度低时氙闪光灯的寿命较长。使用长波探测器的某些系统能有效地利用长波长光谱的较高的效率。

用求积计在整个选择波段对图6所画出的光谱曲线积分指出了各波段中光谱效率随电流密度变化的情况,其结果在表2中示出。

* 对固体光源时发现并随后研究了固体相干光发射的有关现象,这促使人们开始深入研究氙闪光灯的特性。

** EG & G 585 型分光辐射计。

*** EG & G FX-47 A。

表2 FX-47A 闪光灯在两种电流密度下的光谱效率
(脉冲持续时间, 0.75 毫秒)

能 量 (焦耳)	电 流 密 度 (安培/厘米 ²)	效 率 (%) (微米)				
		0.35~0.5	0.5~0.7	0.7~0.9	0.9~1.1	0.35~1.1 (总的)
1000	1700	18	18	16	11	63
5000	5300	27	20	11	6	64

总辐射效率的测量是由光谱测量得到的, 它与用卡计式对连续运转, 液体冷却的闪光灯测得的总辐射效率十分一致。

九、冷却方法

高重率激光技术导致用液体流过电极支架和管壳的冷却技术的发展, 对于任何一种重复闪光灯来说, 三种冷却方法是有效的: 对流、强制空气冷却和水冷。自由空气对流冷却只能用在耗散为 5 瓦/厘米² 的情况, 通过闪光灯管的强制空气充许耗散高达 40 瓦/厘米²。我们知道透明的良好的导热液体, 水所充许的耗散为 300 瓦/厘米²。采用每次闪光能量为 2000 焦耳的闪光灯时, 这三种冷却方法得到的结果在表 3 中加以比较。

表3 各种冷却方法的闪光速率

冷却方法	最大平均功率 (瓦)	闪光速率 秒 ⁻¹
对 流 冷 却	340	1/6
强制空气冷却	2700	1.3
水 冷	20.000	10

高速照象中利用的高闪光速率和高功率等特点已用

于激光器设备中, 用以焊接, 金属加工和薄膜电阻微调。

图 7 是用在激光器上的三种水冷氙闪光灯的照片, 从电极到冷却液体的有效热传导, 是通过高导无氧铜的电极支架完成的, 它还用作为闪光灯的排气管, 该设计用“O”型密封环把水套和灯连接起来。当灯寿命终了时, 水套可以很容易地移出, 再用到同种型号的另一只闪光灯上。

在反射腔中, 这些灯不能用照片示出的外触发丝在高功率下运转, 如果使用它, 那么金属将吸收足够的热量而变为白炽并蒸发。要解决这个问题可以用贴在灯管上的水冷触发带, 或者用另一种串联触发的形式。

和任何水冷光源一样, 外壳必须防止有机物和无机物的沉积。如果使用普通自来水, 必须定期用酸清洗。但经过消矿物质和过滤后, 就不必对暴露于冷却液体的表面清洗了。

当水冷灯连续工作时, 测量它的辐射效率仅是一个简单的问题, 方法是记录输入功率和水的流动速率以及它的温升。使用该方法进行的测量指出, FX-47 闪光灯将它的输入功率的 65% 转换成光辐射, 其余的 35% 使冷却液体的温度升高。一般闪光灯的辐射效率随灯管的尺寸和它的负载而增加, 这个负载的最高值接近闪光灯的极限负载。

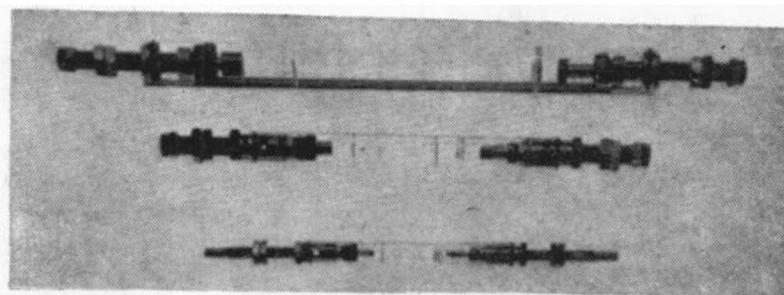


图7 为激光器使用而制作的高功率液体冷却闪光灯, 上面的弧长为 6.5 英吋, FX-67B 型; 10.000 瓦; 中间的弧长 3 英吋, FX-62B; 4000 瓦; 下面的弧长 1.5 英吋; FX-74B; 1000 瓦

十、灯塔中使用的闪光灯

在讨论了寿命、闪光持续时间和设计氙闪光灯
的特定应用时必须考虑的各变量之间的关系以后，

可以举一个氙闪光灯在灯塔中使用的例子。一只装
在灯塔上的弧长 36 英吋的内光灯，所选择的最大闪
光能量为它极限负载的 4.5%，在它的光输出降低
到初始值的 50% 时，有一千五百万次的闪光。如果
以一天 20000 次闪光计算，该灯可使用二年。

参 考 资 料

- [1] Marshak, I. S., "Limiting harameters and gene-
ralized characteristics of xenon lamps", *Appl.*
Opt. **2**, 793, August 1963
 - [2] Buck, A., R. Erickson, and F. Barnes, "Design
and Operation of xenon flashtubes", *J. Appl.*
Phys. **34**, 214, July 1963.
 - [3] Lang, K. R., and F. S. Barnes "Shock waves
in xenon flashtubes and tube deterioration",
J. Appl. Phys., **35**, 107, January 1964.
 - [4] Rosolowski, J. H., and R. J. Charles "Wal
deterioration in flash lamps," *J. Appl. Phys.*
36, 1792, May 1965.
 - [5] Edgerton, H. E., J. H. Goncz, and P. W. Jame-
son, "xenon flashlamp limits of Operation," in
J. G. A. DeGraaf and P. Tegelaar (eds.), *Proce-*
edings of the Sixth International Congress on
Higer-Speed Photography, H. O. Jjeek Willink
and Zoon, N. V. Haarlem, 1963, p. 143
 - [6] Emmett, J. L., A. L. Schawlow, and E. H.
Weinberg, "Direct measurement of xenon flashtube
opacity," *J. Appl. Phys.* **35**, 2601, September
1964.
 - [7] Goncz, J. H., "Resistivity of xenon plasma,"
J. Appl. Phys. **36**, 742, Marek 1965.
 - [8] Gronberg, F. T., "Design Consideration for a
Satellite-Bonne flashing light," *Phot. Sci. Eng.*
7, 323, November-December 1963.
 - [9] Swenson, P. B. "Photographic Observations of
ANNA, the Geodetic Satellite," *Phot. Sci. Eng.*
7, 317, November-December 1963.
 - [10] Goncz, J. H., and P. B. Newell, "Spectra of
pulsed and Dontinuous xenon discharges," *J. Opt.*
Soc. Am. **56**(1), 1966.
- 译自, John H. Goncz; "New developments in
electronic flashtubes", *ISA. Transactions*,
1966, **5**, No. 1, 28~36.
- (何湘君译,尹友三校)

激光器的泵浦灯

提 要

本文主要论述四种类型的激光器泵浦源(脉冲灯、弧光灯、白炽灯和焰火灯)的技术现状和应用情况。指出了这些泵浦灯的优缺点。

目前,激光器可以用很多种方法来泵浦,例如灯的辐射、太阳光的辐射、爆炸丝的辐射、惰性气体中的击波发光、等离子体箍缩发光、电子激发发光等等。在这些方法中,要数泵浦灯最有成效,也是最先应用的。这一方法之所以受到重视,原因有两个:第一是它的制作容易;第二,除了焰火灯以外,所有类型的泵浦灯都能在必要的时间内多次重复或连续工作。这些优点是很有价值的。而这种光泵方法也有它不足的地方,主要在于它的泵浦效率很低,对于大多数脉冲泵浦激光器来说,这种效率为 $\sim 1\%$,而对应用于连续工作的弧光灯和白炽灯来说,这种效率更低。与此相反,在刚才列举的几种不是用灯泵浦的方法中,有些方法却能得到很高的效率,例如半导体激光器的效率就能达 50% 以上。

在第一次实验的激光装置中应用的就是脉冲灯,这类泵浦源在最近几年中有更广泛的应用。配上了这种脉冲灯的各种不同结构的激光器能在自由振荡状态下工作(这种状态产生单个或周期性的闪光),也能在 Q 调制状态下工作。目前,这种脉冲灯能用来泵浦固体、液体及蒸汽状的工作物质。在脉冲激光器运转不久即制成了连续工作的固体激光器,这种激光器用弧光灯和碘白炽灯来泵浦。最近,又成功地用焰火灯泵浦了脉冲激光器。这样,激光器到目前为止就有了四种泵浦灯。

一、脉 冲 灯

在 И. С. Маршак^[1]、H. Edgerton^[2,3]、J. G. Edwards^[4]等人的文章中,对脉冲灯已经作了详细的介绍。早在四十年前就出现了第一支脉冲灯,这时正是揭开各种条件下脉冲放电中出现的各种现象的时候。这些年来,对灯进行了很多改进并增加了不少新品种。

目前,灯的外壳多半是用石英玻璃制成的,叫石英脉冲灯,但也可以用派勒克斯玻璃制成,叫玻璃脉

冲灯。对于这两种灯来说,最理想的单位工作负载,也就是输入每一立方厘米等离子体中的放电能量焦耳数(焦耳/厘米³)应该是既能保证最大的辐射,又能忍受住一定的闪光次数而不使光能有明显的损失。

单位工作负载值的大小取决于灯的结构、尺寸和工作状态。在这一方面,玻璃脉冲灯要让位于石英灯,后者具有更高的发光强度。因此,在最初的固体激光器件中,应用的只是石英脉冲灯。用很薄的带状铝箔真空封接在石英灯的芯柱中作为电流引出线^[1]。但是,由于第一次实验样品的振荡阈值很高,因此对灯的单位工作负载也要求很高,致使它们时常在闪光时遭到破坏。

研究损坏的原因后得知,这种情况多半是由于焊在石英内的箔被部分熔化引起的,因为铝箔在放电电路中形成了一定的欧姆电阻,进入灯内的一部分能量也落到铝箔上。有时,这一小部分能量足以熔化铝箔的某一部分,由此破坏了石英的完整性甚至导致整个灯的爆炸事故。当然,有时在放电时灯不一定爆炸,但它们的铝箔电极却因为熔化而失去了它的导电性。这样,在往后的工作中此种灯就成为不适用的了。

由于箔灯的不足而促使人们去研究新型的脉冲灯,创造了较之先进的帽式结构^[5,6]。在这种新结构中,石英管的两头真空封接在金属帽内,金属帽也充当外接头、电流引线和工作电极的载体。金属帽的电阻是微不足道的,它不会承担很大的能量,但同时却能支持相当大的电流负荷。然而,在金属帽的壁和石英管壁粘合的地方,只有在温度不超过 150°C 时才能保持它固有的性质。因此,帽式结构又在温度稳定性上较之连续工作弧光灯及白炽碘灯来欠缺了一些,这对于那些要求重复闪光的泵浦源来说,就显得不足。在这一点上,它又比铝箔灯稍次了一点。

激光器的泵浦源大多数是各种类型的石英管灯。虽然有时也采用 Π 型结构的闪光灯,但一般都

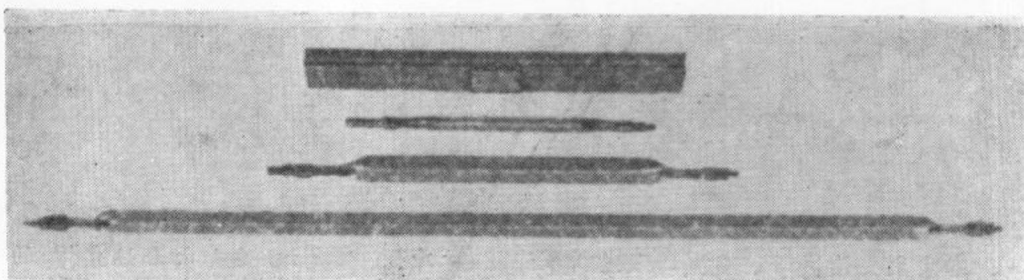


图1 三支帽式结构的直管脉冲灯

是采用直管或螺旋型石英灯。对于激光器来说,螺旋形闪光灯是一种很方便的光源,因为它完全不需要专门的光学聚焦,振荡棒就直接放在螺旋形中,并随便就可以把它固定下来。但这样的一种配置也不是一种最理想的光学系统。最有效的要算是直管式泵浦灯,它可以与振荡棒并行安置在诸如椭圆形的聚光腔内。直管灯一般最常见的尺寸是:两电极间距离40毫米~几米,灯的内径2~30毫米(见图1)。螺旋形石英灯也可以有这样的内径(管本身),匝数一般不超过6,每一匝之间的间隙尽量小些。螺旋内径的大小要看振荡棒的情况,一般不小于20毫米,也不大于60毫米(见图2)。从工艺学的角度出发,管的内径应该比螺旋的内径要小得多(见图2)。

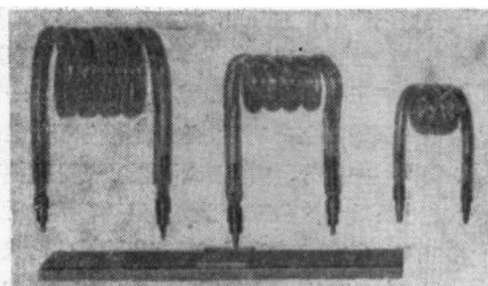


图2 三支帽式结构的螺旋脉冲灯
(左边两支五匝,右边那支四匝)

脉冲灯中一般充以氙气,因为此种气体的电离电势低,使它比其它惰性气体有更高的光能量密度。

为了得到脉冲灯辐射的高亮度,必须在管内增加气压和输入功率,但是后者又受到管壁材料强度的限止。因此,对于上述尺寸的石英脉冲灯已作了很多实验,选定了它们的单位工作负载,保证能闪光几千次而不使辐射强度有多大降落。对于帽式灯在平均闪光持续时间为~1毫秒时,此种灯的单位工作负载一般为100~150焦耳/厘米³。在这种负载下灯的幅射是很完整的,亮度温度在 $1.0 \sim 1.8 \times 10^4$ K。对于小尺寸的灯(例如 ИФП-400),输出

光能在4,000~9,000埃范围内约为25%。输出光能不仅与放电状态有关,而且也与灯的结构和尺寸有关:随着灯管截面的增加在4,000~9,000埃范围内光能输出的比例也会增加^[7]。对于一般的石英管灯这种光能输出约为50%,而对于 ИФП-15,000,却为52%^[10]。

大家知道,当惰性气体的气压很低时,脉冲灯的幅射强度随着气压的增加而增加,一直达到气压的最佳值为止。到了这个最佳数值,如果再加大气压,幅射强度仍保持在最佳值而不再上升。随着单位工作负载的增加,即使在低压下幅射强度也不再依赖于气压甚至正好相反。假设脉冲灯在单次脉冲状态下工作,那末在上述高单位工作负载下,灯的最佳压力为300~600毫米汞柱。幅射强度与气压无依赖关系的现象可以用下面的理由来说明,即在这种条件下的放电过程中,整个管子都充满了等离子体,这种等离子体使黄红——红外光谱区域的本征辐射变得不透明。

应该指出,这种等离子体不透明性的到来还得依赖于等离子体层的厚度。因为这个缘故,因此,直径较大的管中的不透明性的出现所需的气压要比小管子中的低一些。如果气压超过了最佳值,就会观察到好的或者坏的结果。所谓好的结果,即是在灯管的内壁表面上的深褐色薄膜减少,这种薄膜是由电极的粒子溅射和石英管内层的硅及硅的氧化物蒸发所造成的。所谓坏的结果,即是放电时气体冲击波的功率增加,从而提高了爆炸的可能性。

在单位工作负载不变的情况下,如果灯内的氙气没有充到应有的气压,那末光通量就会降低。放电等离子体具有透明性时其光通量值就依赖于气压。及此同时,灯的管壁很快会被深褐色薄膜所覆盖而丧失了自己的透明性。

可以这样假设,如果增加灯管的气压而使脉冲压力增高,提高了管壁爆炸的可能性的话,则如果降低气压,就会使这种可能性减小了。

但是我们的实验却推翻了这种假设。事实上,如果降低气压超过了一定的极限,也会提高爆炸的可能性。看来,这里有两个原因在作怪:第一,低气压时,放电过程中就会增强电流强度,其结果就在放电沟道到达管壁的瞬时提高了热冲击;第二,石英管内减少气体后,放电时的气压脉冲当然也会减小,但也就是因为这个缘故,硅及它的化合物就更强烈地从管壁上蒸发掉。图3示出了引起灯爆炸的单位能量负载的极限值同氙压的关系(氙气压力的变化范围很大,从1毫米汞柱到1,200毫米汞柱)。每次闪光的平均持续时间为40毫秒。曲线是根据箔灯画出来的,这种箔灯的两电极间相距50毫米,灯管的内径为7毫米。帽式灯在图中所示的负载和气压下是不会爆炸的。

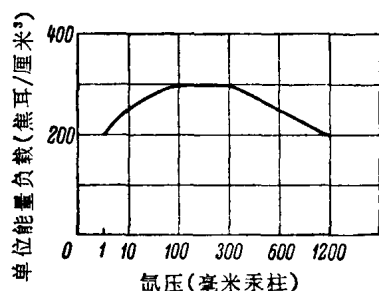


图3 引起脉冲灯爆炸的单位能量负载的极限值同灯内氙压的关系

典型的脉冲灯的爆炸稳定性还和它们的馈电方式有关系。这时,为了寻找灯的极限负载,实际上应用了两个经验公式。第一个公式是在灯的电路中没有电感或比较少的情況下使用的:

$$\frac{CV^4}{L^3} = K,$$

式中 C ——电容,

V ——电压

$L > 100$ 毫米——灯两电极间的距离,

K ——常数,为 $4d^2$ 微法·千伏⁴·厘米⁻³

(d ——灯管的外径, $0.1 < d < 1.2$ 厘米)。

常数 K 对于每一种灯,实际上都是要测定的。上式中, CV^4 的极限允许值称为“负载因素”。

当灯的电路中存在电感时,第二个公式是比较通用的:

$$A^2 = KT,$$

式中 A ——单次闪光的极限值(这次闪光使灯遭受破坏),

T ——闪光的持续时间,

K ——依赖于灯的结构和尺寸的常数。

大家知道, A 的大小可以用下面的公式来计算:

$$A = \frac{CV^2}{2}$$

式中 C ——电容

V ——电压。

如果 C 以微法表示, V 用千伏表示,则 A 以焦耳表示。

如果单位工作负载不变,增加电容并相应地降低电压(到所知的极限值为止,那时灯还可以点燃),则脉冲持续时间将延长,由于缓和并减弱了冲击波,因此爆炸危险大大地减小。当电压增高时,相应地电容减小了,则冲击波的强度就迅速增强,因此,爆炸的可能性就急剧地增大。

当灯的供电状态改变时,按光谱分布的辐射能量的极大值位置发生位移。于灯的单位负载为恒值时,随着电压的减小,电容增大引起光谱长波部分能量的不大的位移。但假如提高电压,减小电容,则紫外光谱区域的辐射部分迅速增加,红外光谱区域的辐射部分降低^[11]。光谱组成也与单位工作负载有关。如所知那样, $\Pi\Phi\Pi-15,000$ 型灯的供电部分的能量增加4.5倍,紫外辐射部分增加20%到25%,而红色和红外辐射部分减少55%到45%^[10]。

在最近五年内,与激光器的研究和应用工作的发展相联系,各种类型的脉冲灯的品种也显著增加。利用它们的方法也是各种各样的。大尺寸的灯,通常工作时不冷却,一般情况是提高其能量负载来工作的,当然这就要牺牲它的使用寿命。最大的实际应用是用在工作于各种重复触发频率的激光器上。这种激光器的被冷却的激活材料的尺寸一般不大(长度到100毫米),为此生产了相应的小尺寸脉冲灯,能在冷却时重复触发工作(图4)。其结构和制备工艺与一次触发的脉冲灯不同。问题在于,当制备小尺寸灯(供重复触发工作用的)时,曾发觉下列情况。假如这些灯充以氙气到最佳压力,则自它以这种或那种重复频率开始工作后,经过短时间,出现两个不好的结果。首先,由于电极溅射粒子的沉淀层以及石英中硅和硅的氧化物粒子的蒸发层所致,使灯的管壁变暗。第二,降低了击穿电压。频率越高,这些因素的作用也就越厉害^[12]。击穿电压的降低,看来可用二种原因来解释。在放电时,发生气体压力的减小,这要以溅射在灯壁上的粒子是封闭的为先决条件。此外,由于电极的金属蒸汽进入放电等离子体,相当于氙的电离电位降低,击穿电压的降低导致灯中被散射的功率的减小。在灯的工作过程

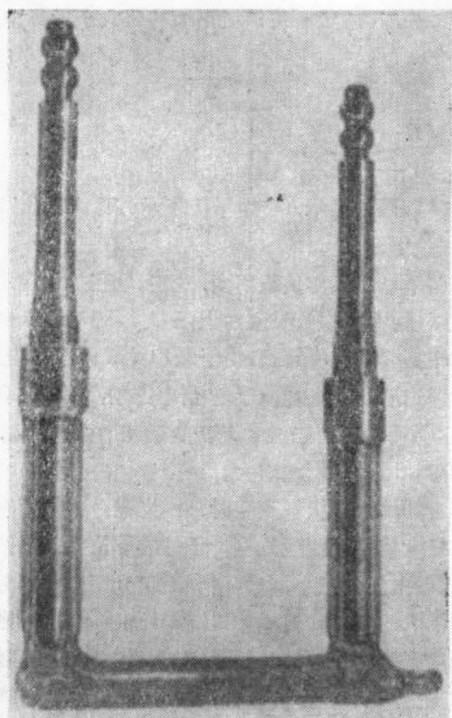


图4 重复闪光的U型小尺寸脉冲灯;灯及它的两个电极用循环水来冷却

中,二种因素的作用迅速地降低它的光效率,致使灯很快变得不适于用激发振荡了。

В. М. Седов 和 Л. П. Шишацкая 共同制备了重复触发的脉冲灯,灯内充以几个大气压的氙,就克服了这些缺点^[13]。采用这么大的压力有下列原因。因为重复触发的灯的工作负荷率,比单次作用的脉冲灯的小几倍,当气压大大地超过典型灯的最佳气压时,重复触发灯的光流与气压就无关了。同时,以光流值而论,新灯的光流超过充以最佳气压的、类似结构和尺寸的氙灯。新灯还有一种优越性。由于灯内气压大,故减小了电极溅射,其结果使在长时间工作时,阻缓了气压减小的速度,所以在比较长的使用期间内,灯的管壁仍保持透明,击穿电压不降低,并且也没有与之相联系的被散射的功率的降低。但是为了点燃那种灯必须有有效的点燃装置。当然,这种高压灯的爆炸事故可能会多些,但是因为它的单位工作负载与单次作用的脉冲灯相比是不大的,所以事实上并未看到过这种情况。然而,灯在工作时剧烈地被加热。这种情况导致,对重复触发的激光器的泵浦来说,宁愿采用钼箔式的温度稳定的灯。因为在小的单位工作负载和低频率时,甚至在没有强迫冷却的情况下,它们也能工作,因为焊接在

灯的石英管脚上的钼箔,在这些情况下,熔化的几率是很小的。

光泵时经常发生的激活材料的加热使它们的荧光特性变坏,招致激励阈值增高。所以振荡体有时不得不用低沸点的液体进行冷却(如液态空气、液态氧、液态氮),但同时使照明器中的氙灯与这类冷却剂隔离开,而仍然保持在室温。这样就使照明器盒子的制备和结构复杂化了。

为了避免类似的复杂化, J. W. Tucker 和 J. N. Bradford 制备了一种新型的脉冲灯,充入混合气体——氙(气压 100 毫米汞柱)和氙(气压 600 毫米汞柱)^[14]。把这种灯与振荡体放置在同一腔中,用液氮同时冷却它们。于液氮的沸点(为 77°K)时,灯内建立起氙的分压为 25 毫米汞柱,氙为 $3 \cdot 10^{-3}$ 毫米汞柱。从效果来看,新型灯几乎并不逊色于不冷却的标准的氙灯。

一开始已经提及,所有现时以灯泵浦的激光器,效率非常低;尽管受激辐射有它独特的优点,但这种低效率自然而然地阻碍了并继续阻碍着它们的普遍推广。因此,必须探求提高效率的方法。但是在探求时,必须考虑到激光器效率不高的主要原因,绝不能认为仅仅是泵浦灯的关系。泵浦灯虽然实际上降低了激光器的效率,但与振荡材料本身固有的其他因素相比较并不算大。最好的例证是脉冲灯,因为对大多数灯激励的激光器来说,在确定的情况下,效率等于 1% 或稍高些,而且它们比起其他三类泵浦灯来,更为人们所乐于采用。

假设,取一激光器,红宝石棒由一支脉冲灯照射,灯从预先充电的电容器组取得能量。为了明显起见,假设电容器组的储能是 1,000 焦耳。电容器组放电时,就产生触发闪光。下面,我们对能量的损失和能量的有用的消耗作一简单的近似的计算。

第一种损失 放电时,大约电容器组的能量的一半即 500 焦耳损耗在电容器组本身、电线上、仪器上以及耗费在灯管加热、电极加热上和被石英灯管壁所吸收的辐射上(即波长短于 180 毫微米和长于 3,500 毫微米的辐射)。最大部分的损耗是在电容器上^[15],特别是当放电发生振荡状态时,换言之,于 L/C 值大、电阻值小时^[16]。此外,某种程度上,损耗值是与灯的电极间距离的长度有关。距离越大损耗越小。剩下的 500 焦耳用于形成灯的辐射输出上,这些辐射是能透过石英管壁的,并分布在提及过的所有广阔的光谱范围内。