

无极脉冲放电激光器激发光源及其 受激光输出特性的观察*

张遵达 叶茂福
(中国科学院)

提 要

高电压无电极强脉冲气体放电, 可以用作激光器的激发光源¹⁾。本文所叙述的内容即是在这方面的若干实验结果。文章的前一部分包括光源的装置及特性的测量等, 第二部分的内容为利用这种光源作红宝石与钽玻璃激光器的激发光源时, 对于激光器的光输出特性的研究结果, 其中包括阈值的测定, 尖峰的观察、单模振荡和规则的阻尼振荡等。最后对于这种光源的特点作了分析, 认为这种光源为固体激光器的发展提供了一个新型的激发光源, 对于发展大能量器件、高功率器件以及高重复频率器件都是有前途的。

一、引 言

在固体激光器技术中, 激发光源的选择是一个重要的问题。目前在固体脉冲激光器中, 广泛使用的氙闪光灯具有几个显著的优点: 如电-光能量转换效率较高, 发光波段与一些主要的固体激光器材料的吸收光谱匹配得较为合适, 所以在各种器件中都得到广泛使用。尽管如此, 这种闪光灯还是有缺点的, 例如当使用电压增高和输入能量加大时, 灯管容易损坏, 电极容易变黑, 性能还不够稳定。此外闪光灯中大量的热辐射也对于工作物质不利。

因此, 探索新型光源来克服上述闪光灯的一些缺点, 对于发展激光器的技术具有重要的意义。看来利用高电压电容器作为储能装置的光源在许多方面是有利的。由高压脉冲放电产生等离子体发光可以有两种方法。一种是通过有电极的放电管来放电, 这种方法已经有人建议用作激光器的激发光源^[1]。到目前为止, 这种方法还没有进一步的发展。另一种是利用无电极放电管中的感应放电, 这与研究高温等离子体的角向收缩(θ -压缩)装置相似。为了激发激光器, 可以把放电管制成共轴圆柱型, 这种共轴型激发光源的优点在文献[2]中曾作了讨论。此外, 无极放电的激光器激发光源还有其他一些优点, 如闪光时间短, 容易制造, 可以输入更大能量等。本工作即试图对于这种无极放电的实验结果作一初步报导, 文章的前一部分是关于光源的特性和实验条件的描述, 后一部分则是利用无极放电激发红宝石和钽玻璃激光器的若干实验结果。在所得的结果中, 有些反映出这种光源本身的特点。看来这对于深入研究固体激光器的发射过程和发展新型激发光源

* 1965年5月18日收到。

1) 激光器(Laser)在以往被译为量子放大器、光激励器或莱塞等, 现统一译为激光器。

都是有意义的。

我们曾经在文献中看到,用氩无极放电激发红宝石激光器的早期工作报告^[3],以后又发展成为高重复频率器件和振荡-放大器件^[4,5]。

二、光 源

1. 实验装置

放电迴路由高电压低电感脉冲电容器、初级电感线圈及其轴形放电管组成(如图1所示)。当电容器通过针球火花开关对线圈放电时,在线圈中就通过高达几万安培的瞬时脉冲电流,在线圈内感生一瞬变的电磁场,把放电管内的气体击穿,从而产生闪光。

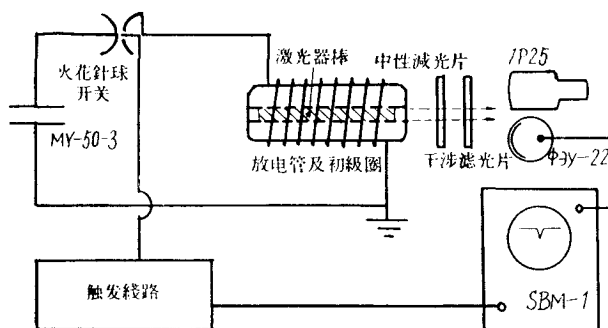


图1 实验装置示意图

脉冲电容器为MY-50-3型,电容量为3微法,电压为50千伏,内部电感为0.2微亨。为了减少外部放电迴路中的能量损耗,以及提高能量的转换效率,应设法尽可能地减少迴路电感,同时应加大初级感应线圈的电感。因此在本工作中,不是采用通常在 θ —压缩装置中的单圈形式,而是把感应线圈做成多圈。这一点是与文献[3,4,5]所描述的单圈实验装置有所不同。我们的经验表明,采用多圈的感应线圈,有可能提高输入能量的转换效率。

线圈的电感量约为2—3微亨。放电周期为十几微秒。在小能量装置中,如果用MY-110-0.022型脉冲电容器(电容0.022微法,电压110千伏),它的放电周期更短,因而放电管的发光时间也更短。利用这类装置可以进行一些特殊目的的激光器的实验。

放电管为共轴形的水晶管,内充十几到几十毫米汞柱的氙气或氩气。气压升高时,点燃电压也随之增高。放电管的外径为内径的3—4倍。放电管外壁包以氧化镁的粉末作为漫反射层,这样可使对激光器的激发效率提高35—40%;同时,放电管应与初级感应线圈紧密贴合,以免线圈中电磁能量的漏失。放电管的尺寸应与工作物质的尺寸相匹配,在通常情况下,放电管比工作物质的棒稍长一些,以使整个的棒都受到均匀的照明。

2. 放电管的输出光的特性

(1) 光谱的测量

利用水晶光谱仪拍摄了两种气体(氙和氩)在不同气压和不同电压下放电管的发射光

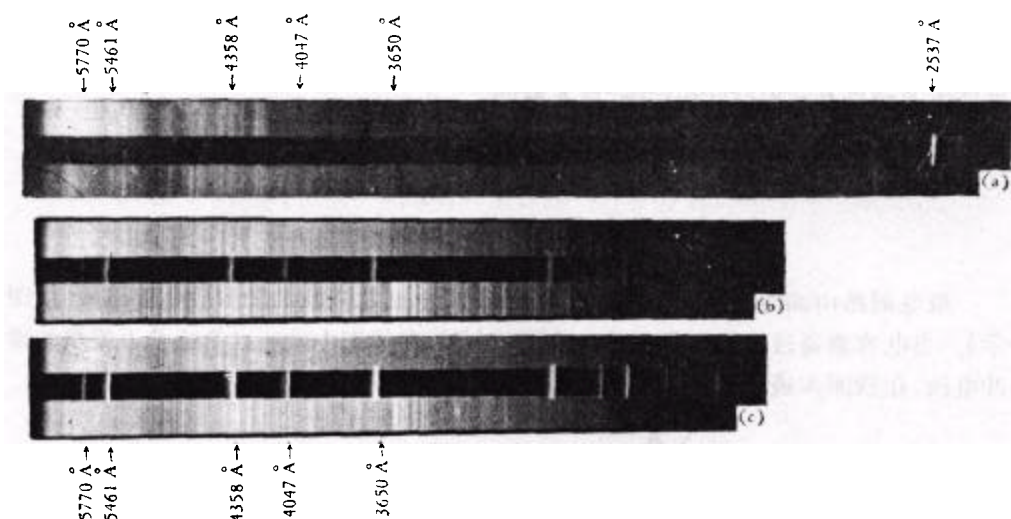


图2 (a)充汞放电管与氙闪光灯的光谱 上: 闪光灯 (200 毫米汞柱, 250 微法, 2 千伏), 下: 无极放电管 (30 毫米汞柱, 3 微法, 20 千伏); (b)氙、汞放电管的光谱 (10 毫米汞柱, 3 微法, 30 千伏) 上: 氙, 下: 汞; (c)氙、汞放电管的光谱 (40 毫米汞柱, 3 微法, 30 千伏) 上: 氙, 下: 汞. (中间一条是汞的光谱线)

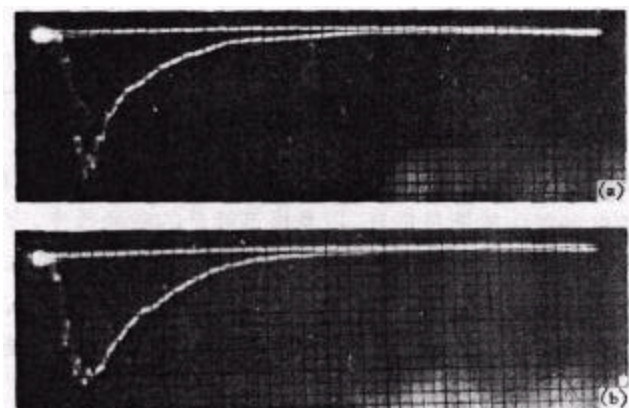


图3 汞放电管光输出示波图 (3 微法, 30 千伏) (a) 10 毫米汞柱, 滤光片中心波长 556 毫微米, 扫描 500 微秒; (b) 40 毫米汞柱, 滤光片中心波长 580 毫微米, 扫描 500 微秒.

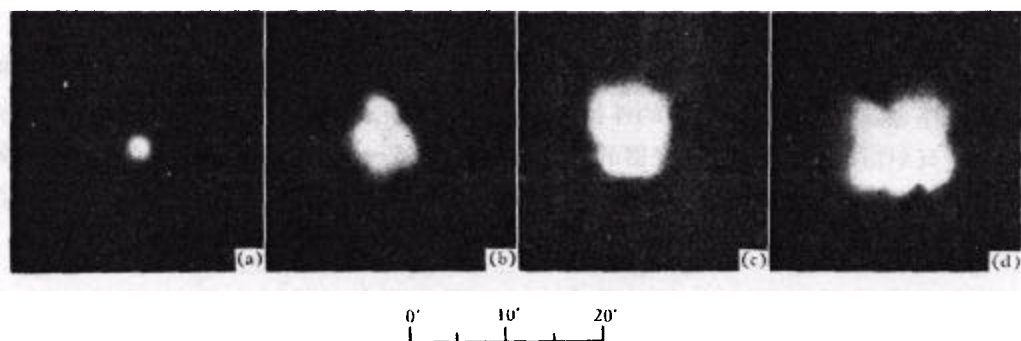


图4 $\phi 6 \times 76$ 钽玻璃激光器的远场花样照相 (a) 1.00 倍阈能量输入, (b) 1.04 倍阈, (c) 1.07 倍阈, (d) 1.14 倍阈.

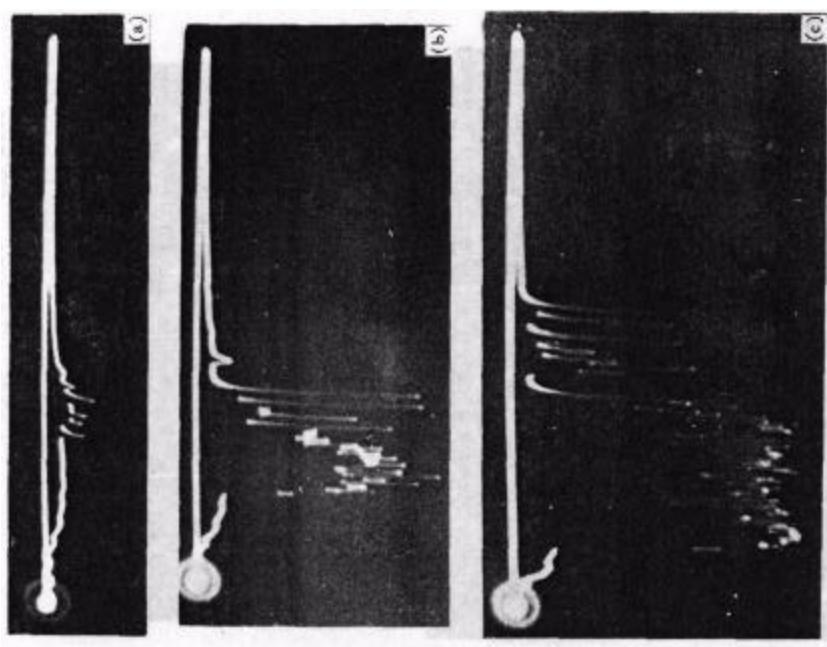


图 5 $\phi 12 \times 155$ 铍玻璃激光器输出示波图

- (a) 1.08 倍阈值能量输入, 扫描 500 微秒;
 (b) 1.22 倍阈值能量输入, 扫描 500 微秒;
 (c) 1.46 倍阈值能量输入, 扫描 500 微秒.

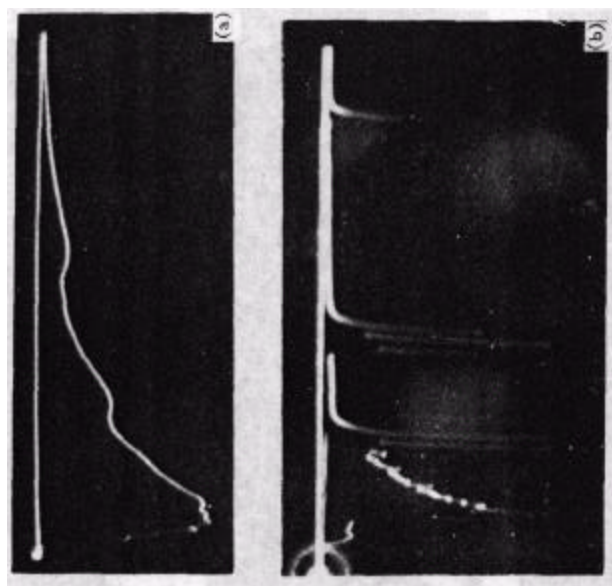


图 6 铍玻璃激光器输出与放电管光输出
 (a) 放电管在 577 毫微米的光输出示波图, 扫描 500 微秒;
 (b) 铍玻璃激光器输出的示波图.

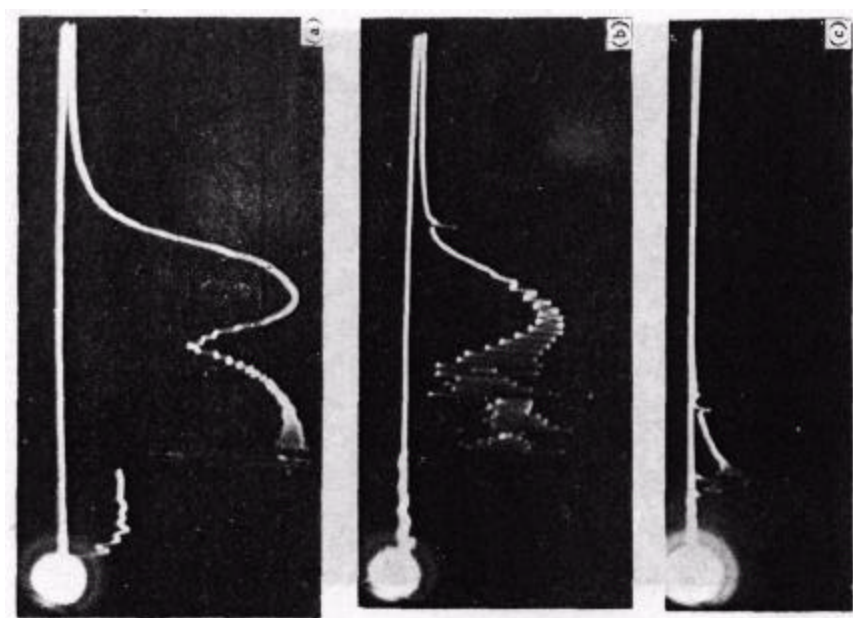


图9 红宝石激光器输出的阻尼振荡

- (a) $\phi 13 \times 178$ 红宝石, 1.3 倍阈值能量输入, 扫描 500 微秒;
 (b) $\phi 13 \times 178$ 红宝石, 1.2 倍阈值能量输入, 扫描 500 微秒;
 (c) $\phi 6 \times 96$ 红宝石, 1.5 倍阈值能量输入, 扫描 500 微秒。

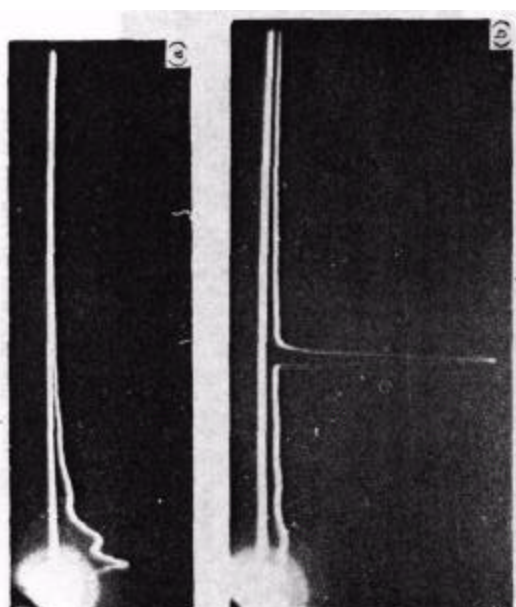


图7 $\phi 6 \times 76$ 钽玻璃激光器输出的示波图

- (a) 用 580 毫微米滤光片记录放电管的光输出, 扫描 300 微秒;
 (b) 激光器输出, 扫描 300 微秒。

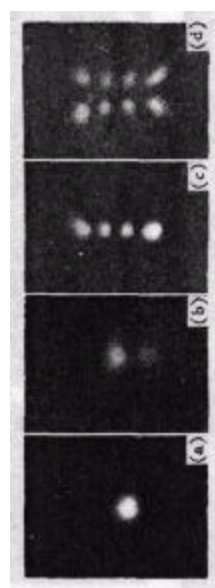


图8 钽玻璃激光器输出单模的远场照相(1125 记录)

- (a) TEM_{00} , (b) TEM_{01} , (c) TEM_{02} , (d) TEM_{12} 。

谱,并且把这些光谱和氙闪光灯的光谱进行了定性的比较,结果可以归结为以下几点(图2):

(i) 当放电管的气压不同、而其他参量保持不变时,光谱强度的变化不很显著。但当升高放电的电压时,高气压放电管的光谱强度比低气压的要强一些。

(ii) 在放电管的气压相同的条件下,比较氙与氙的发射光谱时可以看出:近紫外区域氙的光谱比氙的强些;在绿光区域(这个区域是红宝石与钽玻璃的主要吸收带)氙的光谱要比氙的强。因此,在激发钽玻璃激光器时,利用氙放电管作为激发光源时,激光器的振荡阈值比起在氙放电管的情况下,要低一些。

(iii) 在比较氙脉冲闪光灯(200 毫米汞柱的气压)与氙放电管(30 毫米汞柱的气压)的光谱时,可以看出:氙闪光灯的光谱接近连续谱,而氙放电管的光谱则主要是线状谱,而且在紫外区域,氙放电管的光谱强度比氙闪光灯的要强。

(2) 放电管输出光的光电示波特性

在记录放电管输出光的光电示波图时,采用了 404.7, 556, 580 及 850 毫微米干涉滤光片,这几个波段恰好是红宝石及含钽玻璃激光器的主要吸收带。所得结果如下:

(i) 对于各个波段来讲,输出波形和发光时间基本相同;

(ii) 当放电管的气压不同时,光输出波形的时间特性亦不同。气压低的情况下,波形窄而锐,而气压大时波形宽而低。波形峰值的出现时间是气压小时出现得较早;

(iii) 如果放电管的气压相同,放电电压越高,则光峰出现的时间也越早;

(iv) 在输入能量相同时,高电压、小电容的发光时间比低电压、大电容的发光时间较短。

图 3 为 30 千伏、3 微法放电时,两个氙放电管(10 毫米汞柱和 40 毫米汞柱)在 556 毫微米和 580 毫微米的光输出波形的时间特性的示例。

三、激光器输出光的特性的观察

(1) 振荡阈值

1) 我们对于红宝石激光器作了下列实验,红宝石的尺寸为 $\phi 13 \times 178$ (毫米)¹⁾,两端面镀银。当用带有漫反射装置的直管型氙闪光灯作激发光源时,其阈值为 2600 焦耳。当采用放电管作为激发光源时,振荡阈值随条件不同而有所变化:当放电管的气压为 15 毫米汞柱,电压为 34 千伏,电容为 6.23 微法时,阈值为 3600 焦耳;当氙放电管的气压为 40 毫米汞柱,电容为 6.23 微法,电压为 26 千伏,阈值为 2100 焦耳。如放电管的气压仍为 40 毫米汞柱,而电容为 3.18 微法,电压为 34 千伏,则阈值降至 1840 焦耳。由此可见,在高气压、高电压放电的条件下,激发激光器的效率有所提高。这与测量放电管的光强输出特性所得到的结果是相符合的。

2) 我们对于钽玻璃激光器也进行了实验,钽玻璃棒的尺寸为 $\phi 6 \times 76$ (毫米)²⁾,两端面镀银,当采用闪光灯作为激发光源时,振荡阈值为 110 焦耳。在采用放电管作为激发光源的情况下,电容量为 0.236 微法(以 10 个 MY-110-0.022 的电容器并联),电压 34 千伏,

1) 红宝石材料由张乐涛等同志供给,特此致谢。

2) 钽玻璃样品由北京建筑工程学院和北京玻璃研究所供给,特此致谢。

阈值为 136 焦耳。当输入能量增加时,输出辐射的远场斑点也逐渐增大,象图 4 所表示的那样。这个结果与普通闪光灯得到的也是相同的。

从以上的实验结果来看,利用高电压无极放电管作为激光器的光源时,在目前所进行的实验范围内,其效果可与通常采用的闪光灯相比。

(2) 尖峰的观察

1) 在钽玻璃激光器的实验中,玻璃棒的尺寸为 $\phi 12 \times 155$ 毫米,两端面镀银。当输入能量逐渐增加时,尖峰的出现情况与闪光灯作为激发光源比较时,两者差别不大(图 5)。但是开始振荡的时间却比闪光灯的情况要提早一些,而且随着输入能量的增加,起始振荡的时间也越来越早,在输入能量为 1.5 倍阈值时,放电开始后不到 50 微秒即观察到振荡。

2) 在一定的放电条件下,例如放电管气压较低,放电管尺寸较大时,放电管的光输出中有几个极大值,因而在激光器的输出中观察到尖峰也分成几组,这现象可由图 6 中看出。

3) 在小能量装置中(电容 0.236 微法,电压 34 千伏),在钽玻璃激光器中观察到尖峰的滞后现象,氙放电管(气压为 20 毫米汞柱)的发光时间约为 40 微秒,而激光器的振荡在 130 微秒以后才开始(图 7)。在文献[3]中,曾经观察到红宝石激光器输出尖峰的出现比放电管的光输出滞后了 100 微秒,但在钽玻璃激光器中,没有观察到这种现象。他们认为红宝石激光器振荡的滞后现象是由于激发光源发光的空间不均匀性引起的。因为在他们的实验中,采用的是单圈激发放电管,这个线圈的宽度只有红宝石棒长的八分之一。放电时,激发光源的光大部分集中于线圈附近,因此红宝石棒的两端照明不够充分。这样,就好象对红宝石起了 Q 调制作用,一直要到荧光能量从红宝石的中心部分充分地转移到两端,使两端的吸收系数减小以后,激光器才有输出。这就需要有一定的时间,因此输出的尖峰有滞后现象。而对钽玻璃激光器来说,因为它是四能级系统,所以没有这个现象。

但是在我们的实验中,初级线圈是多圈的,对于玻璃棒的照明也是均匀的,因此文献[3]所说的引起滞后现象的原因是不存在的。但是在钽玻璃激光器的输出中仍然观察到尖峰的滞后现象,并且这现象是能够多次重复的。因此不能认为文献[3]的解释是令人满意的,我们觉得要想正确地阐明这种现象的机理,尚有待深入的研究。

(3) 单模振荡

由于在这种装置中,可以稳定地控制放电管的发光条件,因而也有可能正确地控制激光器振荡的阈值。我们利用了这一特点获得了一系列钽玻璃激光器的单模远场花样,这些花样是利用象转换管 1P25 直接记录下来的。这些花样与理论所预期的以及其他作者^[6]所得到的结果均一致;在刚刚开始振荡时,最容易出现的是 TEM_{00} 或 TEM_{01} 。图 8 是几个单模照相的示例。通常在固体脉冲激光器的输出中要想观察单个模,必须采用时间分辨的照相方法。

(4) 准连续的有规则阻尼振荡的观察

在红宝石激光器的输出尖峰观察中(红宝石两端面磨平并镀银),当输入能量为阈值的 1.2 倍以上时,我们观察到一系列准连续的有规则的阻尼振荡(图 9)。近一年多来,许多作者曾经观察和研究过这个问题^[7-13]。一般认为,要得到这种规则的振荡,对于谐振腔

的结构需作一些特殊的考虑^[13]或附加一些必要装置^[8]。在文献[10—12]的结论中,也都认为红宝石受激光的输出与时间的关系在很大程度上取决于光频谱谐振腔的结构,因而他们在研究这种有规则的振荡时,都采用了具有外部球面反射镜的谐振腔。

在我们的实验下,情况不同于此,只是采用了端面镀银的平面平行谐振腔,在这种腔里并没有模的简并作用,但是在这种腔中观察到有规则的振荡。我们认为这可能与本实验中所采用的特殊光源有关。高电压无极放电光源的发光时间比普通闪光灯短,其瞬时光输出功率可能比普通闪光灯高达一个数量级。看来,这种有规则的振荡似乎与这种光源的较高的激发速率有关系。当输入能量降低时,有规则的振荡变成具有较大振幅的互相分开的尖峰。

在钽玻璃激光器的实验中,用平面平行腔没有观察到有规则的阻尼振荡。

四、小 结

以上的初步工作表明,激光器的高电压无极放电激发光源至少具有下面几个特点:

1) 放电管没有电极,因而可以输入较大能量,这适合于制造大能量激光器。关于设计大能量无极放电装置的实验技术,在等离子体物理研究中已较成熟,例如,用于可控热核反应研究的角向压缩装置,总的储能量已达 350 万焦耳^[14]。

2) 放电管的热辐射少,对激光器工作物质的加热作用不象闪光灯那样显著,因而可以做成高重复频率的激光器,在常温下目前已达 60 次/秒^[5]。

3) 光源的发光时间短,泵的效率与功率都高,这对于荧光寿命短的激光器工作物质特别有利。如果结合 Q-调制技术,可能对制造大功率激光器更为有利。

4) 在放电管中充以合适的气体或以一定的百分比混合不同的气体,有可能使它的发射光谱与不同的激光器材料的吸收带相匹配。

5) 这种光源的使用寿命长,根据文献[5]的报导,放电管在使用六万次以后,发光效率没有任何显著的变化,这比普通闪光灯的寿命大了两个数量级。

综合以上所述,我们可以看到无极脉冲放电装置为激光器的研究提供了一种新型的激发光源。自然,为了充分发挥它的潜力及优点,许多问题尚须作深入的研究。

作者对孙湘同志有益的启示,姚进珍同志在放电管加工,和徐积仁、余永柏、张有瓏等同志在工作中的帮助表示感谢。

最后,作者对导师张志三同志的鼓励、支持和指导表示深切的谢意。

参 考 文 献

- [1] Colgate, S. A., Trivelpiece, A. W., *Adv. Quantum Electronics* (ed. by J. R. Singer, 1961), p. 288.
- [2] 徐积仁、张遵遼、余永柏、张有瓏、沈彬源、冷允彻、张志三, *科学通报*, 1963 年 11 月号, 39.
- [3] Brandcwie, R. A., Hitt, J. S., Feldman, J. M., *J. Appl. Phys.*, **34** (1963), 3415.
- [4] Hitt, J. S., Feldman, J. M., *Proc. IEEE*, **52** (1964), 616.
- [5] Haswell, W. T., Hitt, J. S., Feldman, J. M., *Proc. IEEE*, **52** (1964), 93.
- [6] Takuoka, S., *Appl. Optics*, **3** (1964), 986.
- [7] Walsh, P., Kemeny, G., *J. Appl. Phys.*, **34** (1963), 956.
- [8] Tang, C. L., Statz, H., de Mars, G., *Appl. Phys. Letters*, **2** (1963), 222.
- [9] Takuma, H., Shimizu, F., *Japan. J. Appl. Phys.*, **2** (1963), 197.
- [10] Соколов, А. К., Зубарев, Т. Н., *ФТТ*, **6** (1964), 2590.

- [11] Зубарев, Т. Н., Соколов, А. К., *ДАН СССР*, **159** (1964), 539.
[12] Katzman, M., Strozyk, J. W., *Proc. IEEE*, **52** (1964), 433.
[13] Pole, P. V., Weider, H., *Appl. Optics*, **3** (1964), 1086.
[14] Putman, T. D., Kemp, E. L., *IRE Trans. on Nuclear Science*, NS-9 (1962), No. 2, 74.

PULSED ELECTRODELESS DISCHARGE AS A LIGHT SOURCE FOR LASER EXCITATION AND OBSERVATION OF THE CHARACTERISTICS OF LASER OUTPUT

CHANG ZUNG-KUI YEH MOW-FOH

ABSTRACT

High voltage pulsed electrodeless discharge in rare gases can be used as a light source for laser excitation. In this paper, some initial experimental results in this respect are reported. In the first part of the paper, the light source and its light output measurements are described. The second part is concerned with some investigations of ruby and Nd-doped glass lasers, pumped with electrodeless discharge tubes. These investigations contain determination of thresholds, observation of spikes, oscillation on single mode, and regular damped oscillation.

Finally, the possibilities of further development are discussed.