

重复频率可调的脉冲氩离子激光器

贾 祖 鑫

(上海市激光技术研究所)

张孔华 张伯新

(中国科学院上海细胞生物学研究所)

Pulsed argon ion laser with adjustable repetitive frequency

Jia Zuxin

(Shanghai Institute of Laser Technology)

Zhang Kunghua Zhang Boxin

(Shanghai Institute of Cell Biology, Academia Sinica)

Abstract

A pulsed discharging argon ion laser with repetitive frequency of 50-200 Hz is described. The inner diameter of the discharge tube is 6 mm, the tube length is 860 mm, the overall length of the resonator is 1200 mm, and the pulse width is 9 μ s. An output of 30-50 W can be obtained at the optimum operation current.

这里介绍的是一台脉冲放电、频率从 50 赫芝到 200 赫芝连续可调的氩离子激光器。它为超声全息提供一个可见的相干光源。它输出的可见光在蓝—绿光谱区域。最强的光谱线是 4880 埃和 5145 埃。该器件用国产 GG-17 料制成。放电毛细管和阴极泡用水冷却。放电管内径是 6 毫米，长度是 860 毫米。谐振腔总长为 1200 毫米。工作物质是氩气，并加入辅助气体 He。输出光中可清楚地看到五条谱线。光脉冲宽度为 6 微秒。在最佳工作电流时功率可达 30 瓦至 50 瓦。加氦气比纯氩运转时的寿命长三倍左右。

一、装置及工作情况

1. 器件的构造

图 1 是我们试制的脉冲氩离子激光器的示意图。它是一个半内腔结构。电极用钽制成中空形状，用 3 毫米钨棒引出。毛细管外径为 9 毫米，水冷套外径 22 毫米，贮气套直径 60 毫米。

谐振腔是一大曲率半径平面腔，全反射镜是曲率半径为 3 米的介质膜镜片，输出镜是反射率为 1% 或 2.5% 的介质膜镜片。布

收稿日期：1979 年 1 月 18 日。



图1 脉冲氩离子激光管

儒斯特窗用 K_2O 玻璃制成，布氏角为 $56^\circ 30'$ 。

脉冲氩离子激光属于大电流弧光放电状态。电子温度高达 $8 \times 10^4 \sim 10^5 K$ 左右^[1]。气体温度也高。在典型工作条件下，电流密度从 1000 安培/厘米² 到 2500 安培/厘米²。输入电功率为几千瓦以上。除了一小部分能量转换成光功率输出之外，极大部分输入功率将被毛细管耗散掉，管壁温度往往超过 $1000^\circ C$ 。玻璃材料是承受不住如此大的热负荷的，放电管容易被炸裂。我们采用加水冷却套和放电管两端制成喇叭状的办法从结构上克服玻璃材料因过热形变产生的应力集中的问题。经过几个月正常工作，取得较满意的效果。

回气管的节数较其他气体激光器多，我们现用的是 13 节。曾试用 8 节、10 节的回气管，放电管仍会从回气管中短路放电。这可能是低气压、大电流密度弧光放电状况中容易产生此种现象，气体泵浦效应更为严重的缘故。

2. 激励电源

脉冲氩离子激光器的激励我们采用仿真线储能，通过预调器产生的脉冲信号触发闸流管来对激光管施行放电^[2,3]。原理图如图 2 所示。

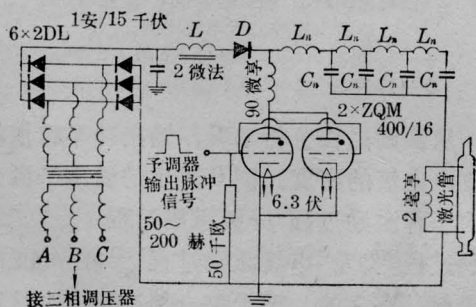


图2 脉冲氩离子激光器电源线路图

仿真线的充电电路是直流二极管谐振充电方式。它的优点是不允许仿真线向电源电路反向放电。仿真线电压将保持在最大充电水平。改变脉冲重复频率不会牵制谐振充电频率。

仿真线形成的脉冲，其顶部振荡较明显。当我们增加仿真线节数时也无济于事。现增加一补偿电感 90 微亨，从示波器中观察到的电流波形可看出，其顶部的振荡消失了，近似于矩形波。这样的波形使激光输出与输入电功率成比例，而不是随时间而变化。此外，在产生脉冲信号的预调器输出端和闸流管栅极之间加了一个低通滤波器，可防止闸流管栅极上出现的高电压影响预调器，保持触发稳定。

3. 工作条件

脉冲氩离子工作气压的范围较窄。我们的管子 Ar 气压在 10~25 毫托之间。最佳

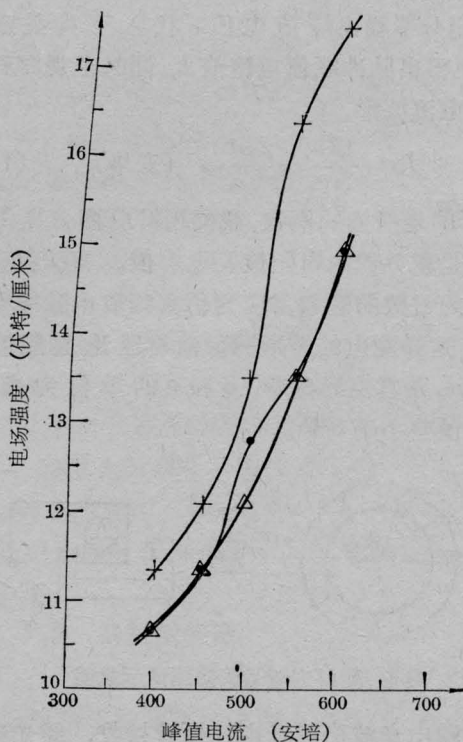


图3 峰值电流与电场强度的关系

△—14毫托 Ar+180毫托 He, $T=1\%$
 ●—17毫托 Ar+180毫托 He, $T=1\%$
 +—17毫托 Ar+220毫托 He, $T=7\%$

气压是17毫托左右。He气压在150~200毫托之间时输出功率和寿命情况均较好。虽然加了He使输出光功率下降,但能延长寿命,较纯Ar工作时长三倍左右。He气压再高,功率下降严重;He气压过低,寿命不长。

工作电流从350安培起辉到600安培以上出现跳动。整个工作期间,电流不是一个恒定值,而是由低到高连续上升的。工作电压也将随工作电流变大而升高。图3是电流和电场强度的关系图。起辉电压略有不同,但均在2200伏以上出现放电跳动(跳动出现后,即从脉冲状态转为连续常通状态,电流骤然升高数倍)。

4. 测量手段

脉冲电流波形及数值的测量,我们用茹科夫斯基线圈套在阳极电缆外,线圈的两端接一个RC积分器,SR-8示波器的探头接在积分器的电容器两端,如图4那样。测出RC积分器输出峰值电压 e 代入下列关系式,便得出脉冲峰值电流值 I ,同时也观察到脉冲电流波形。

$$I = \frac{RC}{N} \frac{2\pi d}{r^2 \mu_0} e \quad (\text{安培}) \quad (1)$$

式中 N 是线圈的圈数,我们用600圈。 R 、 C 分别是积分器的电阻值及电容值。 RC 积分器时间常数的选取,应为仿真线放电脉冲宽度。这样测出的波形和数值与理论值能吻合, μ_0 是真空导磁率, d 和 r 的单位为米。测量误差小于5%。

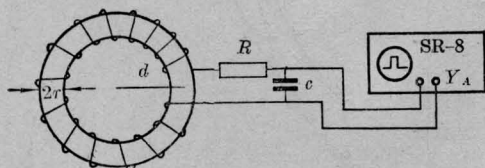


图4 茹科夫斯基线圈测试示意图

输出光波形用光电三极管接收,经光电变换,送入SR-8示波器观察。光强增加时须加衰减片,不然光电管会饱和,引起波形失真。

输出的光能量用带补偿的炭斗接收器经AC-11检流式光电放大器,再由AC-15直流复射式检流计读测。

二、输出特性及分析

1. 输出功率与电流密度的关系

脉冲氩离子激光器存在的吸气效应使得它的输出功率及放电电流之间与连续激光器有不同的特性。由于Ar气在工作过程中不断被吸收,致使放电电流须不断升高,同时输出功率也在不断提高。最佳放电电流不是一个固定值。工作过程中每一时刻都有一最佳电流和相应于它的最大输出功率,此时是由气压来决定这二个数值。图5示出电流和功率之间的关系,它直接反映出上述的这一特性。

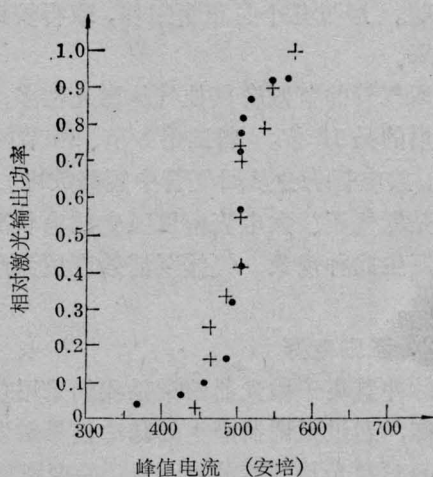


图5 峰值电流与输出功率的关系

随电流的增大,输出功率也上升,且与电流密度的二次幂成比例。

+—17毫托Ar+200毫托He $T=2.5\%$

●—17毫托Ar+200毫托He $T=1\%$

从激励过程分析来看,输出功率将依赖于放电电流的密度。图6所示的氩离子激光器的三种激励过程“一级激励过程”^[4]、“二级激励过程”^[5]及“串级激励过程”^[6]在一次放电中都是存在的。至于哪一种过程占主导地位,对激光跃迁的贡献大,完全视激光器的工作

作条件,包括电压和电流大小、脉冲宽度等而定。在连续氩激光器中“二级过程”及“串级过程”起主导作用。脉冲运转时则“二级过程”对激励的贡献极其微弱。在小电流密度时,有人用实验证实了输出功率与电流密度的四次方成正比。在大电流密度情况时,如图5所示,输出功率约与电流密度的二次方成正比。我们认为这主要是因为低气压、短脉冲工作状态时“一级激励过程”占主导的缘故,以及谱线特性所产生的影响。

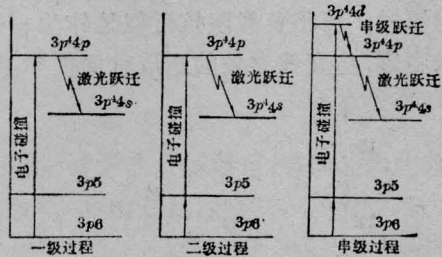


图6 氩离子激光的三种激励过程

对于一级激励过程,上能级的粒子数是中性的Ar原子与高能电子直接碰撞而产生的。它的粒子数应与电子密度的一次幂成正比。而电子密度的大小又由放电电流密度来决定,因此上能级的粒子数就与放电电流密度的一次幂成正比关系,

$$N_2 \propto N_e \propto J$$

这里 N_2 是上能级的粒子数, N_e 是电子密度, J 是电流密度。

上能级粒子数影响着激光介质的增益。增益系数也与电流密度的一次幂成正比。对于非均匀展宽的情况,输出功率与增益平方成正比。因为输出功率

$$P = AtI_s \left[\frac{(2G_0L)^2}{\alpha + t} - 1 \right] \quad (2)$$

P ——输出功率, A ——光束截面积, I_s ——饱和参量, α ——腔内损耗的百分率, t ——腔镜的透过率, L ——谐振腔的有效长度, G_0 ——非均匀展宽的非饱和增益系数。同时 G_0 与增益系数 $G(\nu, I)$ 的关系为:

$$G(\nu, I) = \frac{G_0}{(1 + I/I_s)^{1/2}} \quad (3)$$

这样,输出功率与电流密度的二次方成正比,即

$$P \propto G^2 \propto N_2^2 \propto J^2$$

当电流密度增大时,气体温度升高,导致多普勒宽度 $\Delta\nu_0$ 的增宽^[7], 从下式可明确地看出:

$$\begin{aligned} \Delta\nu_0 &= 2\nu_0 \left(\frac{2kT}{mC^2} \ln 2 \right)^{1/2} \\ &\approx 7.16 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} \nu_0 \times 10^{-7} \end{aligned} \quad (4)$$

同时增益也下降,因为

$$\begin{aligned} G(\nu, I) &= \frac{4N_0\lambda_0^2}{8\pi t_{\text{自发}}} \frac{1}{(1 + I/I_s)^{1/2}} \\ &\times \frac{0.939}{\Delta\nu_0} e^{-4 \ln[2(\nu - \nu_0)^2 / \Delta\nu_0^2]} \end{aligned} \quad (5)$$

这些关系式和一级激励过程占主导地位能解释大电流密度时输出功率的上升逐渐变成与电流密度的二次方成正比例关系。

若电流的增加超过了某一时刻的最佳电流值时,功率会明显地下降。除了共振辐射俘获引起的衰减原因之外,上述的多普勒宽度增宽使增益下降,也是功率下降的原因之一。

2. 输出功率与气压的关系

图7示出我们这根激光管的最佳工作气压值。充气气压决定着放电管中的气体密度。提高气压使参与激光反转的离子数增加,将有利于提高输出功率。气压过高,离子密度过高,反而会导致反转粒子数下降,增益也下降,输出功率就要减少。这里就存在一个最佳的工作气压值。

脉冲氩离子激光器是较短的寿命器件。主要因为工作气压太低,大电流弧光放电引起电极的严重溅射和放电管壁的严重腐蚀会导致气体在整个工作过程中被快速地清除。尤其当脉冲重复频率较高时,寿命更会明显地缩短。当Ar气中充进He气后,二种气体混合为“潘宁混合物”^[8]。“潘宁效应”将

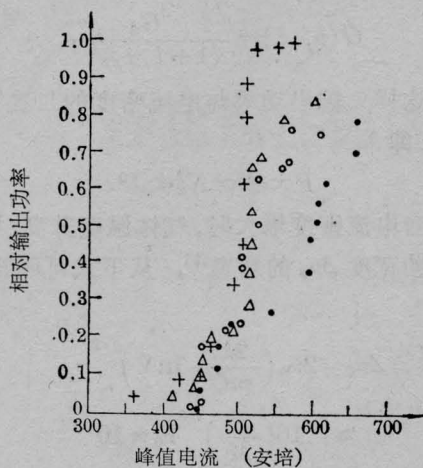


图7 透过率为1%，不同气压对应之相对功率强度，以17毫托Ar为最大值。

- △—14毫托Ar+192毫托He
- +—17毫托Ar+192毫托He
- 21毫托Ar+192毫托He
- 25毫托Ar+192毫托He

使基态氩离子的粒子数增加，由于共振辐射俘获会增加下能级 $3p^44s$ 的粒子数，影响反转分布，降低输出光强。据国外报导，由于加He将使输出功率下降四分之一。在我们的实验中也有相同的效果。为了增加Ar激光器的寿命，我们还是把He作辅助气体来使用。由于充入了高于Ar气压10倍的He，Ar被清除的几率大大下降。He来填补后，纯Ar的吸收减少，相应之下Ar的工作寿命被延长。之外，系统的总气压将升高，对放电的稳定是有益的。

加入He气会使Ar气压较纯Ar放电时的气压要低些。加水冷却也须将工作气压降低些。加He和加水冷却都要降低等离子体温度^[9]。等离子体温度与充气气压存在着一个正比例关系。

3. 气体的电传导率

在测量放电电流和电压值时，可用 $\sigma = I / \pi r^2 E$ 式来计算气体放电时的电传导率。式中 I 是用茹科夫斯基线圈测量的峰值电流值， r 是等离子体半径， E 是放电电场强度。 σ 和 I 的对应值示于图8中。由图可见，电传导率在脉冲放电时并不是一个常数。

电传导率是相应于电子温度和电子密度的一个函数^[11]。

$$\sigma = 1.53 \times 10^4 \frac{T_e^{3/2}}{\ln A} \quad (\text{欧姆}^{-1} \cdot \text{厘米}^{-1}) \quad (6)$$

$$A = \frac{3}{2e^3} \left(\frac{k^3 T_e^3}{\pi n_e} \right)^{1/2}$$

T_e 是电子温度， n_e 是电子密度， k 是玻尔兹曼常数。当放电电流增大时， T_e 和 n_e 皆增大。上式分子中因子 T_e^3 的变化大于分母中 n_e 的变化，使 $\ln A$ 变大， n_e 的影响受 T_e 影响的牵制，结果 σ 的变化并不大。在设计激励电源时，可将负载阻抗近似地作为一个常量来考虑，仿真线参数的选取就简便多了。

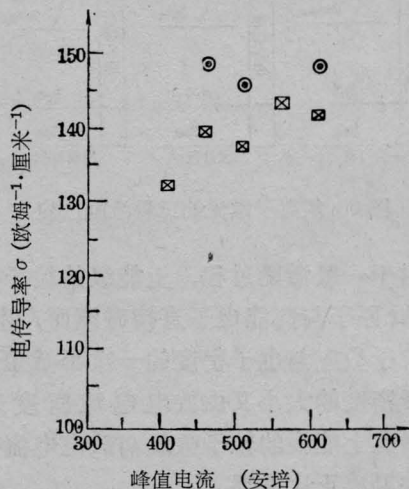


图8 峰值电流与气体放电的电传导率的关系， σ 的变化不大

- $T=1\%$ ×—17毫托Ar+192毫托He
- 21毫托Ar+192毫托He
- $T=2.5\%$ ●—14毫托Ar+200毫托He
- 17毫托Ar+200毫托He

4. 透射率的选取

图9中的三种符号分别表示三种气压下(17毫托、14毫托和20.5毫托)输出镜透过率对输出功率的影响。在17毫托时 $P-T$ 呈线性关系。这里我们仿照均匀展宽情况的推导方法讨论非均匀展宽时输出功率对最佳透过率的关系。据(2)式求 P 对 t 的微商，利用分部积分法，

$$\frac{dP}{dt} = \frac{AI_s(2G_0L)^2(\alpha-t)}{(\alpha+t)^3} - AI_s \quad (7)$$

当 $t=T_{opt}$ 最佳值时, P 亦达到最大值, 此时

$$\frac{dP}{dt}=0,$$

则有

$$\frac{(2G_0L)^2}{(\alpha+T_{opt})^3}(\alpha-T_{opt})=1 \quad (8)$$

即

$$(2G_0L)^2(\alpha-T_{opt})-(\alpha+T_{opt})^3=0 \quad (9)$$

那末,

$$P_{max}=2AI_s \frac{T_{opt}^2}{(\alpha-T_{opt})} \quad (10)$$

从上式可看到最佳透过率应小于除透过部分之外的腔损耗系数 α 。且越接近 α 值, 输出功率就越大。

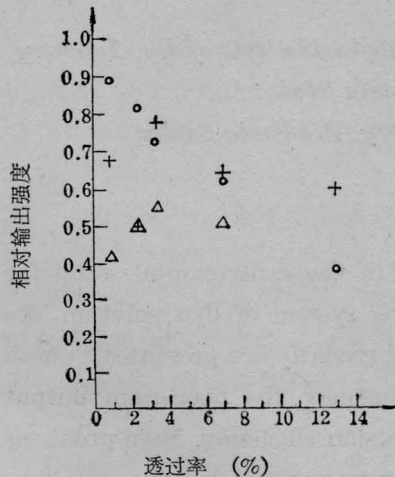


图9 在相同工作电流 500 安培时, 三种工作气压的反射镜透过率与输出功率的关系

○—17 毫托 Ar, +—14 毫托 Ar,
△—20.5 毫托 Ar

在我们的实验中, 不同的工作气压, $P-T$ 的关系会有不同的结果。当气压在最佳值时, 最大输出功率与最佳透过率服从上述表达式。而从输出光的颜色来看, 当 $T=13\%$ 时蓝光始终占主要成份, 而其他透过率的输出光都是以黄绿光为主要成份。光功率在透过率为 7% 时最低。反射率低, 4765 埃和 4880 埃光谱线占上风。这反映影响输出功率的, 反射镜透过率不是一个主要因素。相同的激励条件下, 透过率对谱线及其强度似乎都有影响。上述关系式可提供一个适度的参考范围。

三、讨 论

对于脉冲氩激光器, 首先必须解决的是器件的材料。这里成功地利用价廉易加工的 GG-17 料玻璃, 它与石英材料有不同的长处。石英虽然抗热冲击性能较好, 但它的吸气速率比玻璃高。放电时吸气效应会明显地影响放电的稳定, 工作寿命也短得多。在工作频率几十周以上时石英材料就不宜选用了。

激励电源的参数须与激光器电特性严格地配合, 它直接影响放电稳定、输出功率、转换效率及工作寿命。这些情况中, 要以减少电极的溅射率为主要考虑对象。当增大仿真线电容量时, 可减少金属电极的溅射, 但增加了放电脉冲宽度, 使输入电功率提高, 转换效率下降。选用 Ar 气中溅射率更低的金属材料做电极, 这是可取的途径。钼和铝在 Ar 中的溅射率分别是 14 和 12(克/秒 $\times 10^{-7}$) (500 毫托, 500 伏时测出), 除了铍之外是最低的。钼的金属熔点高, 更适用于大电流放电。

非均匀展宽情况下输出镜的透过率对输出功率的影响不是很大, 而是气压值及放电条件对功率的影响较为明显。有趣的是透过率会影响各光谱线的相对强度。

参 考 文 献

- [1] S. Hattori et al.; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1969, **QE-5**, No. 11, 531-538.
- [2] 钱凤章;《无线电发送设备》(1964).
- [3] 陈 行;《无线电发射设备》(1961).
- [4] W. R. Bennet, Jr. et al; *Appl. Phys. Lett.*, 1964, **4**, No. 10, 180-182.
- [5] E. F. Labuda et al.; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1965, **QE-1**, No. 6, 273-279.
- [6] R. I. Rudko et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1966, **9**, No. 1, 41-44.
- [7] 北京大学物理系;《激光物理基础》.
- [8] V. A. Gilson; *The Review of Scientific Instrument*, 1969, **40**, No. 3, 448-450.
- [9] 陈振廷等;《物理》, 1977, **6**, No 5, 260-263.