

# 紫外氮分子激光器研究

金耀根 李郁芬 叶衍铭 吕诚哉 王炳奎 项珍娣

(复旦大学)

## 提 要

本文根据氮分子激光器原理和 Blumlein 结构横向放电脉冲激光器的电路原理,分析各种参数如激光腔电感、电极形状、火花隙电感、传输线以及在激光器中放电开始点对激光输出的影响。研制成一种结构紧凑小型的氮激光器,此种器件最适宜作染料激光器的泵浦光源。

## 一、引 言

紫外氮激光器由于其波长合适,输出脉冲持续期短以及高重复率,已广泛地用于泵浦各种有机染料,获得从近红外到近紫外的染料激光输出,并在激光光谱学、激光分离同位素等研究方面取得很大进展。随着脉冲染料激光的发展,对氮激光器的输出功率和稳定性提出越来越高的要求。另外作为实验研究的工具,希望氮激光器是一种小型轻便的仪器。

以前我们曾报道<sup>[1]</sup>采用简单的 Blumlein 发生器来获得氮分子粒子数反转所需要的大电流快脉冲放电。Blumlein 电路最早由 Shipman<sup>[2]</sup>用来泵浦分子氮和氦。这种发生器具有两个突出的优点,一是由于它的几何结构合理,能产生上升非常快的激励电流脉冲,一是它由两个传输线装置并联充电,串联放电,故电压倍加,使放电电压很高。但通常用的平板装置,器件尺寸很大,使用极不方便。

本文介绍我们研制的兆瓦级小型氮激光器,这种激光器在以前工作基础上根据对氮

激光器理论和电路原理分析,对火花隙、激光腔及传输线结构作了很大改进。改进的激光器腔长仅 420 毫米,当气压为 80 托时在 12 千伏工作电压下获得 1.1 兆瓦峰功率,输出稳定性小于  $\pm 4\%$ ,由于采用紧凑的圆筒结构,整个激光器的体积仅  $150 \times 300 \times 550$  毫米。

## 二、氮激光器的电路特性

由氮激光的基本原理可知,要实现氮激光粒子数反转,关键是要获得一个具有一定能量的快速上升的脉冲电流。Blumlein 发生器是实现这一条件最简单的方法。它的脉冲上升时间取决于火花隙和传输线的分布参数。

由于氮激光器所使用的 Blumlein 传输线特性阻抗很低,电压上升时间约为 30 毫秒<sup>[3]</sup>,因此可以把脉冲形成网络看成为集中参数电路来分析。图 1 为氮激光器的等效电路,其中  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $L_1$ 、 $L_2$  分别为脉冲形成线和储能线电容和分布电感, $L_s$  为火花隙的电感, $L_L$ 、 $R_L$  为腔电感和阻抗,其中  $L_L$  与激光

收稿日期: 1978 年 5 月 15 日。

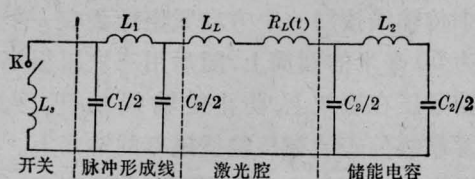


图1 氮激光器的等效电路

腔内电子密度有关。

从等效电路我们可以看到在  $-V_0$  工作电压下, 当火花隙着火以后, 传输线以  $L_s/Z_0$  速率开始放电 ( $Z_0$  为传输线阻抗), 在脉冲形成线中产生一个行波, 使激光管一边的电压以火花隙放电同样速率向  $+V_0$  上升, 直到激光管中气体被击穿, 于是储能线中产生第二个行波, 这两个行波在激光管两端迭加使脉冲放电得以自持。

当传输线固定时, 激光腔电压的变化率主要由火花隙电感决定, 火花隙电感  $L_s$  越大, 腔电压上升速率越慢。在一定的腔电压下电流的变化率受到激光腔电感  $L_L$  的限制, 电感很高也会大大降低电流上升速率, 影响激光输出功率。由于传输线阻抗很低,  $L_s$  和  $L_L$  的影响是很显著的。储能电容也会影响电流的变化速率, 但电容愈小峰值也小, 因此要适当选择电容量, 才能得到最佳输出。

以上分析同实验结果是一致的, 这些分析也为提高氮激光器输出功率和改善激光稳定性提供了依据。

### 三、氮激光器的结构

横向激励氮分子激光器由传输线、激光腔和火花隙组成。

#### 1. 火花隙开关

在文献[1]中我们已经详细介绍过空气火花隙和一般的高压火花隙。由于这两种装置必须通过引线(铜带)同传输线相连, 开关电感不可能很小。这里介绍一种低感同轴型火花隙(图2), 它能直接安装在传输线上, 它的外壳是由黄铜制成的, 在高重复频率下工

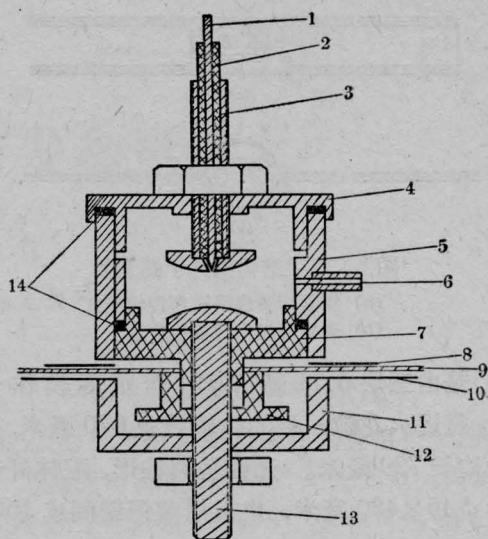


图2 低感同轴火花隙

1—触发极; 2—绝缘套; 3—阴极; 4—上盖; 5—外套筒; 6—进气口; 7—绝缘底座(聚四氟乙烯); 8—铜箔; 9—介质; 10—铜箔; 11—下盖; 12—压圈; 13—阳极; 14—密封圈

作易于散热。

火花隙阳极与阴极具有球形的表面, 触发电极制成钉状放在阴极内部挖空的空腔内部。

安装前先在传输线上开三个同心孔, 上下金属箔开大的孔, 直径与机壳内径相同, 中间介质开小孔, 正好套进底座电极。火花隙阴极通过上盖4和机壳5与传输线金属箔8连接。阳极通过下盖11与传输线下金属箔相连, 绝缘介质9夹在中间。底座7和压圈12的作用是防止高压爬电。

这种火花隙装调方便, 电感量小。火花隙击穿电压可通过改变阴极与阳极距离和充气压力来调节。

#### 2. 传输线与激光腔

传输线采用双层结构, 由于它的阻抗比单层传输线减小一倍, 同激光腔等离子体匹配更好, 而且接地对称使输出光斑均匀。

图3(a)是由1毫米厚的玻璃纤维环氧树脂板作介质, 光腔由  $60 \times 100 \times 420$  毫米长方形有机玻璃制成, 电极呈刀口形或圆弧形, 极距17毫米, 电极与传输线由铜箔连接。

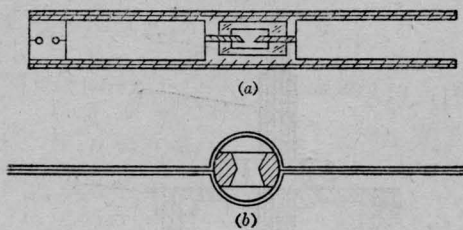


图3 双层结构氮分子激光器

- (a) 双面印刷线路板作传输线;  
(b) 聚脂薄膜作传输线介质

(b)是由三层0.11毫米厚的聚脂薄膜作介质,靠近火花隙一端的传输线长670毫米,另一边长720毫米。光腔呈圆柱形,腔体外径为 $\phi 45 \times 420$ 毫米,电极用黄铜铣制成 $150^\circ$ 角,极距10毫米,传输线铜箔紧贴主电极和激光管壁。激光腔内都打毛,以免腔体反射损耗。电极边角加工成圆弧形,防止尖端放电。电极与有机玻璃用704硅橡胶密封。

激光管一端安放全反射镜,并使它与光轴很好垂直,另一端贴有石英输出窗,同光轴有一角度。

### 3. 紧凑的氮激光器

为了使用方便,我们把整个激光器卷成外径仅80毫米的圆筒(图4),激光腔在中间,

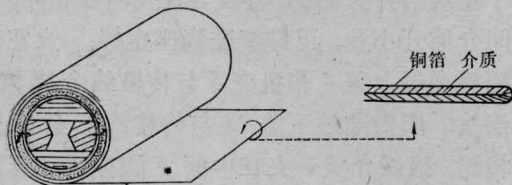


图4 紧凑型氮激光器示意图

(\*为火花隙安放位置)

二个传输线按同一个方向紧密地绕在一个直径为50毫米的圆筒上,随后用三块压板把激光器紧压在底架上,防止传输线松开。火花隙紧靠圆筒安装在传输线尾部的边角上。整个激光器体积仅为 $150 \times 300 \times 550$ 毫米(见图5)。

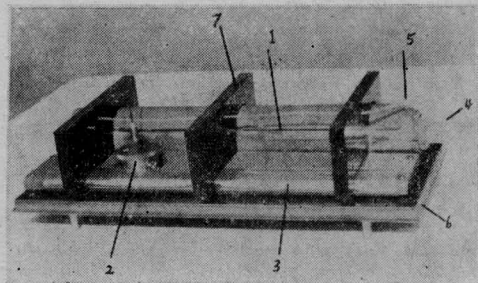


图5 小型氮激光器的外形照片

- 1—激光腔; 2—火花隙; 3—传输线; 4—输出窗;  
5—氮气出入口; 6—底座; 7—压板

## 四、氮激光器的输出特性

在重复率为5次/秒,工作电压为12千伏时,几种不同类型氮激光器的输出特性见表1。其中紧凑型激光器(II)用定标的炭斗测得激光单脉冲能量为5.6毫焦耳,总效率为0.11%,峰功率为1.1兆瓦。这样的激光通过石英透镜聚焦在铜片上,能打出耀眼的火花,同时在铜片上留下斑点。这种能量的激光输出,不用柱面镜聚焦可以直接使染料若丹明6G等获得超辐射激光输出。

表1 几种不同氮激光器的输出特性

编号	结构	光腔尺寸 (毫米)	电极形状	极距 (毫米)	火花隙形式	$C_1+C_2$ (毫微法)	单脉冲能量 (毫焦耳)	峰功率 (兆瓦)	效率 (%)
1	单层平板型	$60 \times 100 \times 420$	刀口	17	一般	18	0.5	0.1	0.04
2	双层平板型	$60 \times 100 \times 420$	刀口	17	一般	23	1.3	0.2	0.09
3	双层圆筒型	$60 \times 100 \times 420$	圆弧	17	一般 低感	43	2.3 3	0.26 0.4	0.07 0.09
4	紧凑型 I		纯角	10	低感	64	3.5	0.7	0.08
5	紧凑型 II		纯角	10	低感	5.6	5.6	1.1	0.11

- 注: 1. 一般火花隙为文献[1]中的图4所示;  
2. 双层圆筒型为我们早期试制,外口径为180毫米;  
3. 激光器工作电压为12千伏。



用 BG-44 强流光电二极管接收, RS-13 300 兆周示波器观察激光脉冲波形, 当激光气压为 80 托时测得光脉冲半宽为 5 毫微秒 (图 6)。实验发现随着气压的降低脉宽相应增加, 当气压降到 40 托时, 脉宽为 5.5 毫微秒。这是由于脉宽在很大程度上由受激分子弛豫时间所确定, 而气压较低时受激分子弛豫时间变长, 因此光脉冲宽度变宽。

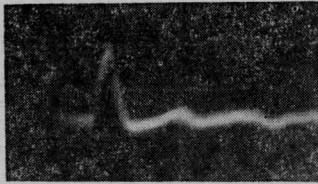


图 6 气压为 80 托时的光脉冲 (标尺为 10 毫微秒/格, 图为  $10^8$  个脉冲信号的记录)

由硅光二极管接收<sup>[8]</sup>, 数字显示系统记录脉冲能量, 多次测量紧凑型激光器 (II) 单脉冲能量, 根据数据计算得到激光器稳定性, 算术平均误差小于  $\pm 4\%$ 。

1. 比较几种不同形状的电极我们发现, 刀口形电极不需要太高电压就能获得均匀放电, 输出也较稳定, 但是它的放电截面小, 由于输出功率与放电截面成正比, 因此难以得到较大输出功率, 而且尖锐的刀口寿命有限。圆弧形电极和纯角形电极放电截面较宽, 输出功率稍有提高, 按图 3(b) 装置电极可以使传输线接地同放电电极靠得很近, 有利于降低腔电感和光束扩展。

2. 表 1 中激光器 (3) 使用两种不同火花隙, 一种是本文介绍的低感火花隙, 另一种为文献 [1] 所介绍的一般火花隙, 比较输出能量可以看到采用低感火花隙输出增加十分明显, 实验中还发现最佳气压也相应提高。这是由于火花隙电感减小使激火管电压上升速率提高, 因此必须以高的气压才能实现最佳  $\frac{E}{P}$  值。这同第二部分的理论分析是一致的。

3. 关于行波激励和输出稳定性。

在超辐射的情况下, 氮激光器两端输出

往往是不一样的, 对于这个问题不少文章<sup>[5,7]</sup>都从电的行波激励与光传播速度匹配来讨论。但是在平板型传输线中, 传输线的阻抗比通常电子学中使用的传输电缆的阻抗要低几个数量级, 可以计算, 0.33 毫米厚的薄膜介质的传输线阻抗  $Z_0$  约为 0.3 欧姆。在这种情况下尽管使用低电感的火花隙 (估计  $L_s \sim 10$  毫微亨)<sup>[6]</sup>, 由  $L_s$  和  $Z_0$  组成的谐振回路时间常数为 30 毫微秒, 这远远大于激光管两端渡越时间 ( $\sim 2$  毫微秒), 因此用这种行波概念来讨论是不合适的。

我们发现产生这种现象往往同激光管中放电开始点有关。放电点是从某一点开始, 随后向两边扩展, 首先放电点产生的自发辐射由于它比其它点发生得早而处于优先地位, 于是离开这点远的一端激光输出就强, 另一端激光输出就弱。我们利用锥形电极极距控制放电开始点, 观察到的激光输出列于表 2。对于锥形极距激光器 1、3, 电极极距大的一端输出比极距小的一端强, 对于中间距近的激光器 2, 两端输出基本相同。都同火花隙位置无关。

表 2 用锥形电极极距控制的激光输出比较

	A 端极距 (毫米)	中心极距 (毫米)	B 端极距 (毫米)	输出能量 (毫焦耳)		工作电压 (千伏)
1	9.50	10.06	10.12	3.5	1.6	10
2	9.98	9.92	9.98	1.6	1.6	8.3
3	10.50	10.60	10.92	1.6	3.2	12

\* 火花隙安装在近 A 端的边角上。

实验还表明, 使用锥形电极极距控制放电开始点可以大大提高输出功率的稳定性。相反, 平行电极往往由于放电开始点的移动, 使输出起伏很大。

在使用薄膜介质作传输线时, 必须注意机械振动使层间距离微动, 导致传输线特性发生变化, 这也会使放电速率有起伏而引起输出不稳定。在高重复率下工作, 还须考虑充电电压的波动, 在每秒几十次以上的重复率时需要采取同步触发或其它特殊的供电方

法。

#### 4. 关于氮激光器的小型化

在考虑氮激光器小型化时需要注意两个问题,一是传输线交叉部分电磁场的相互作用,一是传输线的均匀性。

我们曾试验用图7的两种方法使之小型化,对于第一种方法我们从放电电流方向可以看到迭层中间的传输线电流是相互牵制的,结果使放电速度减慢,产生弧光放电。而图7(b)所示方法由于 $180^\circ$ 转角处传输线均匀性被破坏,传输线内反射损失使腔电压降低,因此都没有取得满意结果。

采用本文介绍的方法(图7),把传输线按同一方向绕在同一个圆筒上,电磁场间的相互作用抵消得好,就能使传输线特性保持均匀。表1中平板型激光器2绕制成激光器

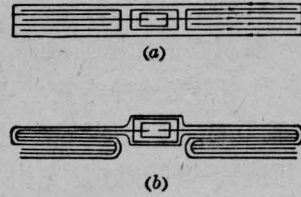


图7 折迭式氮激光器示意图

3后,电容量相应增加,单脉冲能量从1.3毫焦耳增加到2.3毫焦耳,结果是满意的。

#### 参 考 文 献

- [1] 戚霖,《激光》,1976,3, No. 4, 29~33.
- [2] J. D. Shipman, Jr.: *Appl. Phys. Lett.*, 1967, 10, No 1, 3.
- [3] A. J. Schwab; *IEEE, Quantum Electronics*, 1976, QE-12, No. 3, 183.
- [4] 北京光电所,《激光与光学》,1977, No 3.
- [5] 戚霖,《复旦学报》,1976, No 3.

## JZZY-1 型激光综合治疗仪、JDY 型激光定向仪研制成功

武汉市科学技术委员会于1978年12月13日至16日在武汉市主持召开了由武汉光学仪器厂试制成功的《JZZY-1型激光综合治疗仪》和《JDY型激光定向仪》技术鉴定会。参加这次会议的有各省、市有关研究所、大专院校和省、市有关领导机关、工厂和医院共48个单位,54名代表。

会议代表听取了武汉光学仪器厂关于“JZZY-1型激光综合治疗仪”和“JDY型激光定向仪”的试制工作总结,由有关试用单位作了临床应用以及使用成果报告。会议代表分别组成了资料审查和样机性能测试小组,对两种仪器的技术文件、图纸和四台样机进行了严肃认真、实事求是的审查和现场测试。一致认为,两种仪器技术文件齐全、正确清晰、仪器结构合理。测试结果,各项技术指标达到设计要求,性能稳定可靠。

“JZZY-1型激光综合治疗仪”具有体积小、重量

轻(四公斤)、结构简单、布局紧凑、外形美观、操作方便、使用安全等优点。经临床应用表明,对近70种疾病,有较好的疗效,深受医务人员和广大病员的欢迎。“激光综合治疗仪”的研制成功,为医疗战线普及推广激光治疗这门新技术提供了一种新的治疗手段。会议同意,由武汉光学仪器厂投入批量生产,为医院提供更多更好的激光医疗仪器。

“JDY型激光定向仪”具有结构简单、使用方便、标定方法简易、指向距离远、定向精度高(垂直上、下精度 $1/10000$ )等优点,特别适合于矿井作业、建造高大烟囱、挖掘隧道、开巷等需要标定垂直基准线的工程。激光定向仪的特点是直观、快速、方便、高精度,解决了测量和施工争时间、争空间的矛盾,大大提高了工效,受到有关工程部门的工人、技术人员的好评。会议同意,由武汉光学仪器厂小批量生产,以供建筑、冶金等部门的需要。