

氮分子紫外脉冲激光器(上)

宗占国 陈五高

(吉林师范大学物理系)

氮分子紫外脉冲激光器(以下简称氮激光器),于1963年问世,它的基本特征是:峰值功率大,一般在数兆瓦量级,最高已达60兆瓦;脉冲宽度窄,一般在10毫微秒左右,最窄已达0.6毫微秒;重复工作频率高,一般可达每秒几十次到一百次,最高已达1300次/秒;输出激光处在紫外波段,波长为3371埃;结构简单,制造容易,造价较低。

氮激光器应用很广,它所发出的3371埃紫外光广泛应用于泵浦染料激光器及激光光谱、污染探测、集成光学、农业育种、癌症诊断、石油勘探等方面。

一、工作原理

高分光光谱学研究证明,氮激光发生在三重态第二正带系统 $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ 之间的跃迁。激光光谱分布在两个区间,一个区间在3371.41埃至3365.9埃,有40条左右谱线,属于 $0 \rightarrow 0$ 带跃迁;另一个区间在3577.97埃至3576.48埃,有10条左右谱线,属于 $0 \rightarrow 1$ 带跃迁。第一区间输出光占绝对优势,其中最强的谱线是3371埃。

我们可以把氮激光器看作三能级激光器,它的三个能级是 $X^1\Sigma_g^+$ (基态能级)、 $B^3\Pi_g$ (激光下能级)、 $C^3\Pi_u$ (激光上能级),如图1所示。激光的上能级 $C^3\Pi_u$ 的辐射寿命非常短,只有40毫微秒左右,而激光的下能级 $B^3\Pi_g$ 的辐射寿命却比较长,达10微秒左右,加上碰撞,宏观观测可达几个毫秒,所以不能产生恒定的粒子数反转,因而也就不能产生连续的激光,只能获得脉冲激光。氮激光器增益很高,通常不必使用谐振腔。因此人们有时也把氮激光器叫做“超辐射”的“自终结”激光器。要获得激光,必须采用高电压、大电流、快速激励的方法,使得在 $C^3\Pi_u$ 的辐射寿命以内(40毫微秒以内)产生急骤的粒子数反转。

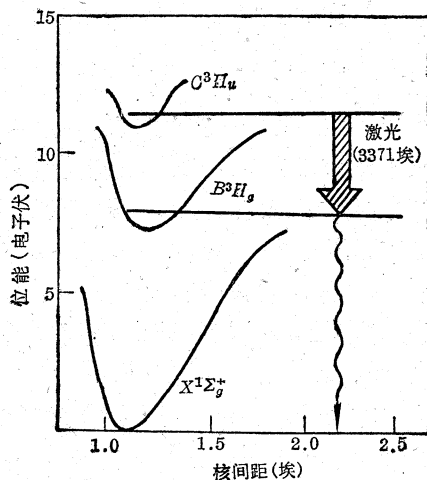


图1 氮分子激光能级简图

关于氮激光器的工作原理,有不少理论分析文章。早在1965年就有人^[1]提出了“饱和近似法”,这个理论简单、明了,与实验结果基本一致。后来,阿里等人^[2]修改了这个理论,其严格解与实验结果吻合较好。1972年有人^[3]又进一步提出横

向激励脉冲氮激光器在 3371 埃发射的总功率的计算结果。

下面，我们来简单分析一下氮激光器粒子数反转的时间和电场强度与充气压强的最佳比值(即 E/P 的最佳比值)。这对于制作氮激光器是有意义的。

1. 粒子数反转时间

把氮激光器看作三级系统(图 1)，用速率方程来求解粒子数反转时间。设 N_1 、 N_2 、 N_3 分别为能级 $X^1\Sigma_g^+$ 、 $B^3\Pi_g$ 、 $C^3\Pi_u$ 的粒子数密度，用 X_{ij} 表示从能级 i 跃迁到能级 j ($i < j$) 的激发速率，用 Y_{ji} 表示从 j 跃迁到 i 的消激发速率，用 τ_{ji} 表示从能级 j 跃迁到能级 i 的辐射寿命，用 R_{ij}^i 表示感应发射速率(它包括谱线宽度，爱因斯坦系数 B 和能量密度)。这样，我们可以得到下述的速率方程组；

$$\begin{aligned}\frac{dN_3}{dt} &= X_{13}N_1 + X_{23}N_2 - (Y_{31} + Y_{32} + \tau_{31}^{-1} + \tau_{32}^{-1})N_3 - R_{32}^i[N_3 - (g_3/g_2)N_2] \\ \frac{dN_2}{dt} &= X_{12}N_1 + (\tau_{32}^{-1} + Y_{32})N_3 - (\tau_{21}^{-1} + Y_{21} + X_{21})N_2 + R_{32}^i[N_3 - (g_3/g_2)N_2] \\ \frac{dN_1}{dt} &= -(X_{12} + X_{13})N_1 + (\tau_{21}^{-1} + Y_{21})N_2 + (\tau_{31}^{-1} + Y_{31})N_3\end{aligned}$$

其中， g_3 和 g_2 分别为激光的上能级 $C^3\Pi_u$ 和下能级 $B^3\Pi_g$ 的统计权重。

在上式公式中，相比之下，我们可以忽略激光能级到基态的感应发射、吸收速率以及消激发速率。另外，我们再应用下述三个条件：一是 $\tau_{31} \gg \tau_{32}$ (这是因为 $C^3\Pi_u$ 是亚稳态)；二是 $X_{13} > X_{12}$ (这是根据夫兰克-康登原理得到的)；三是 $\tau_{21} > \tau_{32}$ (这是因为 $\tau_{32} \approx 40$ 毫微秒，是 $C^3\Pi_u$ 能级的辐射寿命， $\tau_{21} \approx 10$ 微秒，是 $B^3\Pi_g$ 能级的辐射寿命)。因此，我们可把上述方程组简化为

$$\begin{aligned}N_3 &= N_1 X_{13} t - \frac{1}{2} N_1 X_{13} (Y_{32} + \tau_{32}^{-1}) t^2 \\ N_2 &= \frac{1}{2} N_1 X_{13} (Y_{32} + \tau_{32}^{-1}) t^2\end{aligned}$$

从这两个方程，我们可解得，要想得到粒子数反转的条件 ($N_3 > N_2$)，必须有 $t < \frac{1}{(Y_{32} + \tau_{32}^{-1})}$ 。这就告诉我们，粒子数反转只能发生在一段有限的时间上，即要小于 $\frac{1}{(Y_{32} + \tau_{32}^{-1})}$ ，可以明显地看出，它比 $C^3\Pi_u$ 能级的辐射寿命 ($\tau_{32} \approx 40$ 毫微秒) 要短。只有 Y_{32} 与 τ_{32}^{-1} 相比可以忽略的情况下，粒子数反转的时间才有等于 $C^3\Pi_u$ 能级辐射寿命的时间，但是，这种情况只有在氮分子密度远远小于 $6 \times 10^{14}/[\text{厘米}]^3$ 时才能成立。在一般情况下， Y_{32} 是不能忽略的，特别是当氮分子密度比 $6 \times 14/[\text{厘米}]^3$ 大时， Y_{32} 就要比 τ_{32}^{-1} 大，这时粒子数反转的持续时间要更短，这就告诉我们，要获得激光，必须极快速地(在比 40 毫微秒更短的时间内)激发氮分子。这就给激励能源提出了严格的要求。

2. E/P 的最佳值

有人计算过用电子碰撞激励氮分子，把它从基态 $X^1\Sigma_g^+$ ($v=0$) 激发到激光的上能级 $C^3\Pi_u$ 的最大碰撞截面是在电子具有 16 电子伏的能量的时候。当电子能量具有 16 电子伏时，把氮分子从基态激发到所有激发态的碰撞截面总和 $\sigma \approx 5\pi a_0^2$ ， a_0 是氢原子的玻耳第一轨道半径。设 N 为每单位压强、每单位体积中的分子个数，那么可以获得被激发电子的平均自由程：

$$\lambda = (\sigma N)^{-1}$$

从这个关系式，可算出 $\lambda = 0.064$ 厘米/千，这样就可以得到在压强为 1 千时，使每个电子

获得 16 电子伏能量的最大电场强度: $E=16/\lambda$, 从而得出 E/P 的最佳值约等于 250 伏/厘米· τ 。这个结果与实验结果很接近, 只是略微高一些。实验结果约为 200 伏/厘米· τ 。

二、基本结构

氮激光的特殊矛盾, 要求我们必须作出这样的器件: 能够采用高电压、大电流, 极迅速的激励办法, 使得在 10 毫微秒以内产生急骤的粒子数反转。从激励方式来看, 目前有三种类型的器件结构可满足上述要求, 一种是纵向放电激励, 第二种是横向放电激励, 第三种是体放电激励。从激励能源来看, 也可分为三种类型, 一种是放电激励, 第二种是相对论电子束激励, 第三种是激光激励。为了叙述方便, 我们分四种类型结构介绍, 即纵向放电激励型、横向放电激励型、电子束激励型和体放电激励型。

1. 纵向放电激励结构

激励电场与激光传播方向一致的激光器叫做纵向放电激励型激光器。

海尔德 1963 年所做的第一台氮激光器, 就是这种结构。他采用的是普通共焦谐振腔结构, 加 10~15 万伏的电压, 得到了峰值功率为 10 瓦、脉冲宽度为 20 毫微秒的激光输出。由于峰值功率太小, 因而没有实用价值, 而且所需电源电压太高, 不易制作。然而, 由于输出激光是 3371 埃的紫外波长, 因此引起了人们的极大重视。进一步分析表明, 上述结构的缺点在于电阻、电感较大, 使所需的电源电压太高, 输出功率太小。从 1963 年后, 人们就在减小结构的阻抗上进行了讨论, 结果于 1966 年制成了同轴传输线结构的氮激光器^[4], 如图 2 所示。在这种结构中, 放电管、储能元件、放电火花开关都是取同轴传输线的形式。这种结构一下子使激发电压下降到几万伏, 并获得了峰值功率为 2 万千瓦、脉冲宽度为 10 毫微秒的激光输出。后来又改善这种装置, 获得了高达 8 万千瓦的峰值功率, 而激励电压才 3 万伏。直到 1971 年, 还有人^[5]应用这种结构, 得到了峰值功率 2 万千瓦、脉冲宽度 2~5 毫微秒、重复工作频率 20 次/秒的输出, 用这样的氮激光器去泵浦可调谐染料激光器是适用的。目前, 上述这种同轴型纵向放电氮激光器比较成熟, 但脉冲功率较小。

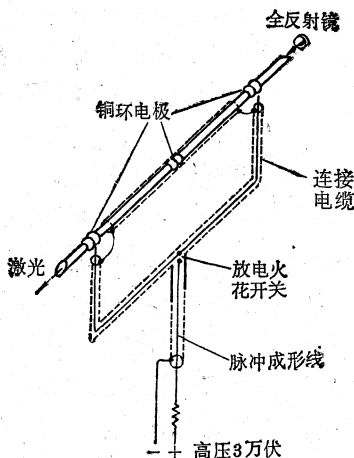


图2 同轴型氮激光器

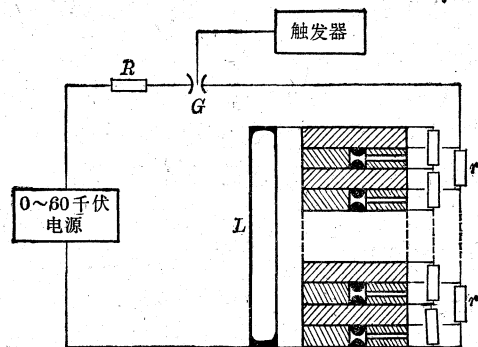


图3 Marx电源激励的氮激光器

L —激光器; R, r —电阻; G —火花放电开关

(下转第 10 页)

思想指引,有党组织的支持和关怀,我们一定能通过思想革命化来实现养路机械化!

认识提高了,劲头就更大了。全体参战人员遵照毛主席关于“在战略上我们要藐视一切敌人,在战术上我们要重视一切敌人”的教导,在试制过程中一丝不苟,严格认真,争分夺秒,团结战斗,以顽强的战斗意志克服了一个又一个的困难。时间紧,任务重,他们不叫苦不怕累,为革命工作不计报酬;技术力量薄弱,他们虚心学习,互帮互学,不分职位高低;人员少,工作多,他们自己动手,测量划线,不讲份内份外;材料缺乏,配件不足,他们斗志不懈,来一个配件装一个配件,来一批加工件装一批加工件,不比条件好坏。他们就是这样在具体工作中一口口地吃掉“敌人”,一个个地解决困难,一步步地走向胜利的。

一方有困难,八方来支援,激光准直液压起拨道机的试制过程充分体现了社会主义大协作精神。在试制的各个攻克技术难关的紧张时期,天津运来了汽油机,广州支援了铸铜件,北京起重机械厂和衡阳冶金机械厂帮助解决了四十五号钢管,还有从重庆空运送来了液压配件,……。因此,激光准直液压起拨道机这个新产品,应当说是“龙江”精神的体现,共产主义大协作的产物。

在全国十多个兄弟单位的大力协作支援下,在全体参加会战的同志们的共同努力下,经过一百五十多个日日夜夜的紧张战斗,我国第一台激光液压起拨道机终于胜利诞生了。试车结果表明,这种起拨道机性能良好,准确灵便,完全符合设计要求。试制成功了!这一胜利,再一次证明了,我们中国工人阶级在毛主席革命路线指引下,敢于走自己工业发展的道路,敢于攀登新的科学技术高峰。广大工人说得好:“只要我们按照毛主席的指示去做,再崎岖坎坷的路我们也能够走,再峻峭陡险的高峰,我们也能够攀。”这一胜利,使参加会战的同志们得到极大的鼓舞,他们表示:今后要更进一步地认真看书学习,以阶级斗争为纲,坚持党的基本路线,坚持“独立自主,自力更生”的方针,狠狠批判“洋奴哲学”、“爬行主义”,破除迷信,解放思想,为全面实现铁路养路机械化,为确保铁路运输线的畅通无阻,不断作出新的更大的贡献。

(上接第 45 页)

在这里,还需要提出的是 1973 年出现的另一种纵向放电激励型激光器^[6],如图 3 所示。电源的特点是并联充电、串联放电。输入电压低,1 万至 2 万伏左右,输出电压高,约 10 万伏。这种电源常称为 Marx 电源。利用这种电源激励,获得了峰值功率 50 千瓦、脉冲宽度 5 毫微秒的输出。

另外,在 1970 年,费里玻等人^[7]发展了格里克森等人的纵向激励结构,建造了一个简单、廉价的纵向激励氮激光器,获得了峰值功率 1 千瓦、脉冲宽度 6 毫微秒、重复频率 120 次/秒的激光输出。在纵向放电激励结构中,也可以实现大气压氮激光器^[8]。

参 考 资 料

- [1] E. T. Gerry; *Appl. Phys. Lett.*, 1965, **7**, 6.
- [2] A. W. Ali *et al.*; *Appl. Opt.*, 1967, **6**, 2115.
- [3] Girardeav-Montavt I. P., Girardeav-Montaxte C. R.; *Acad. Sci.*, 1972, **274B**, **11**.
- [4] M. Geller *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1966, **39**, 3639.
- [5] 井上彰则等人,理化学研究所报告,1971, **47**, 40.
- [6] O. Steinvall, A. Anvari; *J. Phys., Sci. Instr.*, 1973, **11**, No. 6, 1125.
- [7] R. W. Dreybus, R. T. Hodgson; *Appl. Phys. Lett.*, 1972, No. 20, 195.
- [8] A. Svedberg *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1968, No. 12, 102.