

# 电子束泵浦 KrF 受激准分子激光器\*

顾之玉 赵仲宏 王绍英  
吴承懋 夏能樵 周厚琳

## 提 要

本文报道了我国研制的第一台用高能电子束横向泵浦  $\text{NF}_3$ 、 $\text{Kr}$  和  $\text{Ar}$  混合物的  $\text{KrF}$  激光器。获得了  $2484 \text{ \AA}$  ( $\sim 3\text{mJ}$ ) 的激光输出。总工作气压从 460 托变到 2660 托均有激光输出。给出了  $\text{KrF}$  激光谱线、荧光谱线和激光光斑。还介绍了分气压不变时, 激光光谱和激光输出功率随总气压变化的关系, 中心波长随气压变化的关系, 以及在固定气压下变化分气压比时, 激光功率和激光光谱变化的情况。测得了中心波长随分气压比位移的实际值。研究了气体混合时间对出光的影响, 以及多次泵浦对激光输出的影响。并在输出阈值、输出功率、激光和荧光谱线方面与国外同类型器件进行了比较。

利用相对论强流电子束泵浦惰性气体单卤化合物, 已在紫外和真空紫外波段获得激光输出<sup>[1-9]</sup>。我们已报道过用高能电子束泵浦  $\text{XeF}$  激光器的研究工作<sup>[10]</sup>, 本文将报道用同样的激励手段成功地获得了  $\text{KrF}$  受激准分子的激光输出。

实验装置与文献[10]中报道的相同, 但电子枪等的参量有所改变, 因为  $\text{XeF}$  激光输出波长在  $3511 \text{ \AA}$ , 而  $\text{KrF}$  激光波长在  $2484 \text{ \AA}$ 。随着波长的减短, 对泵浦源的功率电平的要求也将提高。本实验所采用的电子束初能为  $0.3\text{MeV}$ , 电子束密度为  $300\text{A}/\text{cm}^2$ , 电子束窗口为  $1.4 \times 9\text{cm}^2$ , 电子束横向激励工作气体, 电子束注入到激光器体积中的贮能约为  $1.5\text{J}$ 。

激光器的光学谐振腔由一对平、凹石英镜片组成。两镜片的反射率分别为 86% 和 89%, 都是在石英基片上镀铝, 再覆盖一层一定厚度的  $\text{MgF}$  保护层做成的。凹面镜的曲率半径为  $1\text{m}$ , 镜片的有效直径为  $16\text{mm}$ 。两面反射镜相隔  $15\text{cm}$ , 用光学方法把它们调整在激光器光轴上。激光器输出参量的测试装置如图 1 所示。在平面输出镜一端放量热计

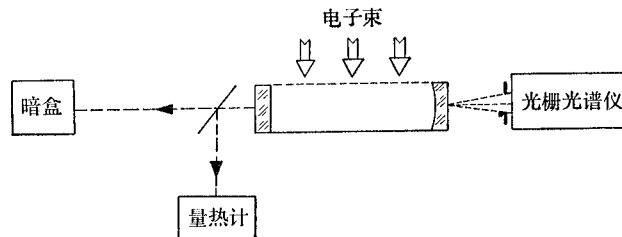


图 1 激光器输出参量的测试装置

\* 1978年10月6日收到。

测量激光输出能量。测得 KrF 输出能量在 3mJ 左右（因缺乏快响应紫外波段脉冲能量计，暂用清华大学测量氮分子的激光能量计做标准）。同时在输出光路上的不同位置放置胶片或感光相纸摄取激光光斑。WP-05 型半米光栅光谱仪放在凹面镜一侧，狭缝离凹面镜 21cm。因激光通过凹面镜会有一些的发散，给光谱仪狭缝“对光”的调整工作带来了方便。

KrF 的激光光谱是在气体分压比  $\text{NF}_3:\text{Kr}:\text{Ar} = 1:130:1300$ 、总气压为 3.5 大气压时一次放电摄得的，如图 2 所示。第二行为铁谱，由铁谱定出 KrF 强线的波长为  $2484 \text{ \AA}$ ，弱线波长为  $2491 \text{ \AA}$ 。将输出镜改成未镀铝膜的石英平镜，在同样的工作气体和泵浦条件下，又摄得 KrF 的荧光光谱，如第三行所示。它的下方也是铁谱，供波长定标用。

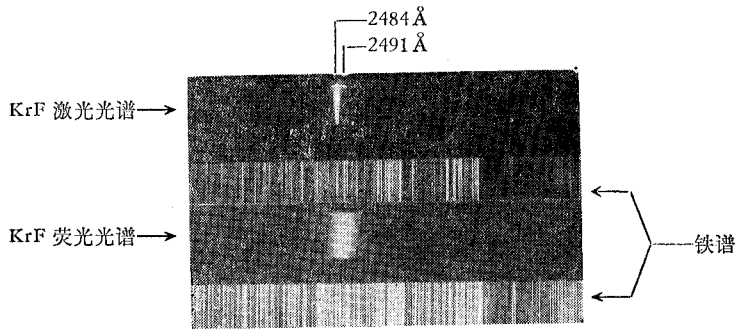


图 2 第一行为激光光谱，用第二行铁谱定标，测得强线波长为  $2484 \text{ \AA}$ ，弱线波长为  $2491 \text{ \AA}$ 。第三行为荧光光谱，用第四行铁谱定标。拍摄条件：气体分压比为  $\text{NF}_3:\text{Kr}:\text{Ar}=1:130:1300$ ，工作总气压为 3.5 大气压；一次放电拍摄

所摄谱线的黑度曲线如图 3 所示。激光光谱的两个极大值表示从束缚上能态  $^2\Sigma_{1/2}$  的两个不同的振动能级跃迁到  $^2\Sigma_{1/2}$  的排斥基态。在  $2484 \text{ \AA}$  上的激光强峰比弱峰大 7.7 倍，测得强峰的半宽度为  $5.16 \text{ \AA}$ 。荧光光谱的两个宽广的最大值也表现出束缚-自由跃迁。荧光半宽度为  $31.8 \text{ \AA}$ （见图 3），在短波一侧  $2454 \text{ \AA}$  附近还有一条弱的谱带。

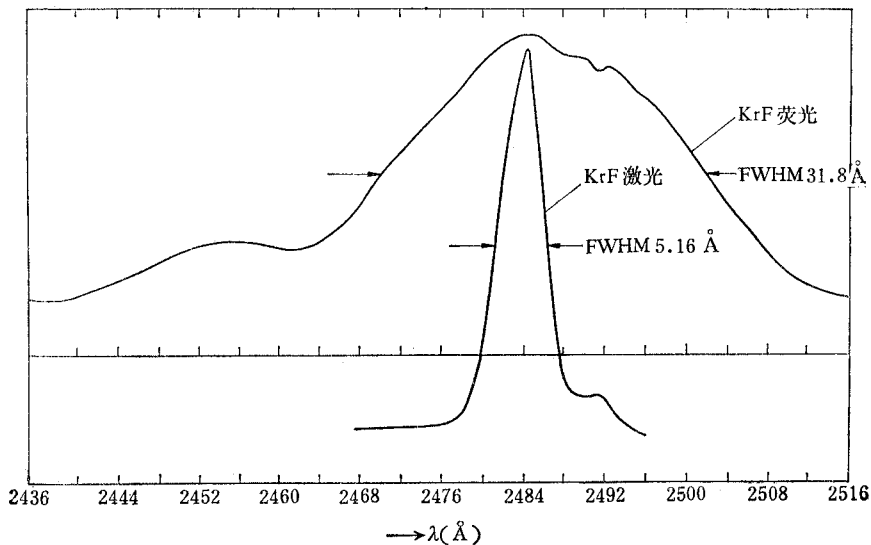


图 3 KrF 激光光谱和荧光光谱的黑度曲线以及其半宽度的比较

保持气体的分压比不变(即  $\text{NF}_3:\text{Kr}:\text{Ar} = 1:130:1300$ ), 改变总工作气压, 摄得一组谱线, 测得的黑度曲线如图 4(a) 所示, 谱线中心波长随气压的变化如图 4(b) 所示. 当总工作气压从 3.5 大气压降低到 1 个大气压时, 谱线的中心波长往短波方向移动  $1.6 \text{ \AA}$ . 在各种工作气压情况下, 谱线宽度的变化不明显.

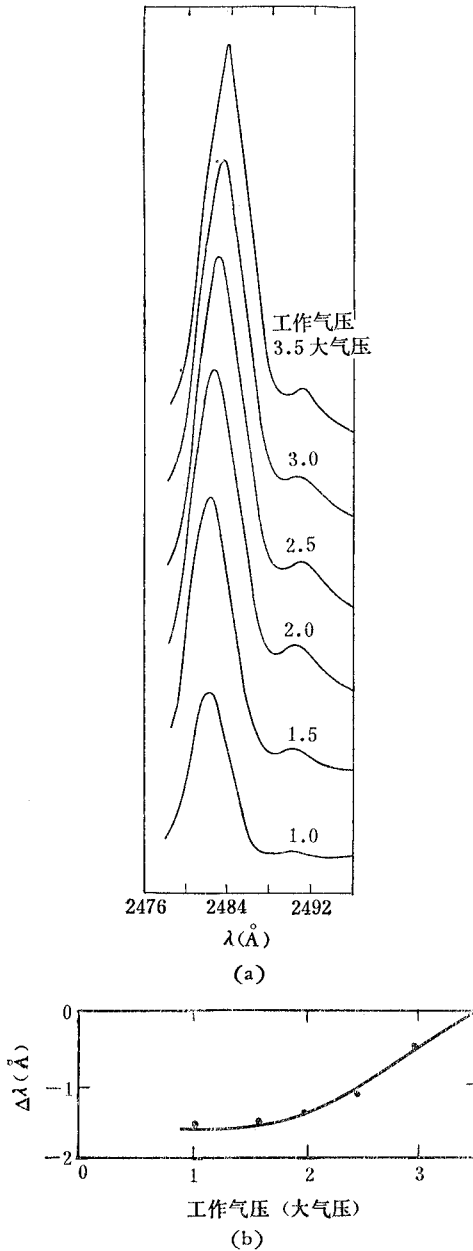


图 4 (a) 不同总工作气压下 KrF 激光光谱的黑度曲线 ( $\text{NF}_3:\text{Kr}:\text{Ar} = 1:130:1300$  保持不变) (b) 随总工作气压的下降, 中心波长向短波方向移动

激光器输出能量随工作气压的增高而变大, 如图 5 所示. 图中曲线是在分压比  $\text{NF}_3:\text{Kr}:\text{Ar} = 1:130:1300$  保持不变的情况下进行的, 这说明当工作气压低于 3.5 大气压时, 激光介质主要向形成  $\text{KrF}^*$  的过程发展, 损耗过程低于  $\text{KrF}^*$  的形成过程. 当然也会联想到, 由于气压的增高, 电子束在气体中的贮能也会增加, 这是使激光输出增加的一个因素.

从摄得的光斑来看, 当总工作气压为 460 托时就有激光输出, 与文献[2]的报道相比较, 他们在最低气压为 15 磅/英寸<sup>2</sup> 绝对压力 ( $\approx 1.05$  大气压) 时才有激光输出. 事实证明, 我们的激光器的阈值是较低的. 同时, 本装置的电子束窗口的有效激发区长度只有文献[2]所报道的一半. 但由于合理地设计了电子枪的结构, 有效地利用了电子束, 提高了有效泵浦密度, 使器件的总体性能处于较佳状态, 因而能在较低气压下得到激光输出.

文献[8]中所用的电子束密度为  $250 \text{ A/cm}^2$ , 电子束窗口约为 3cm 长, 他们在用  $\text{NF}_3$  代替  $\text{F}_2$  时,  $\text{KrF}$  的激光输出能量仅  $40 \mu\text{J}$ , 我们的装置在激光输出能量方面比他们大 70 倍左右.

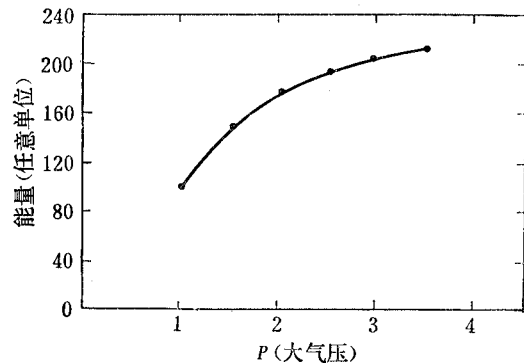
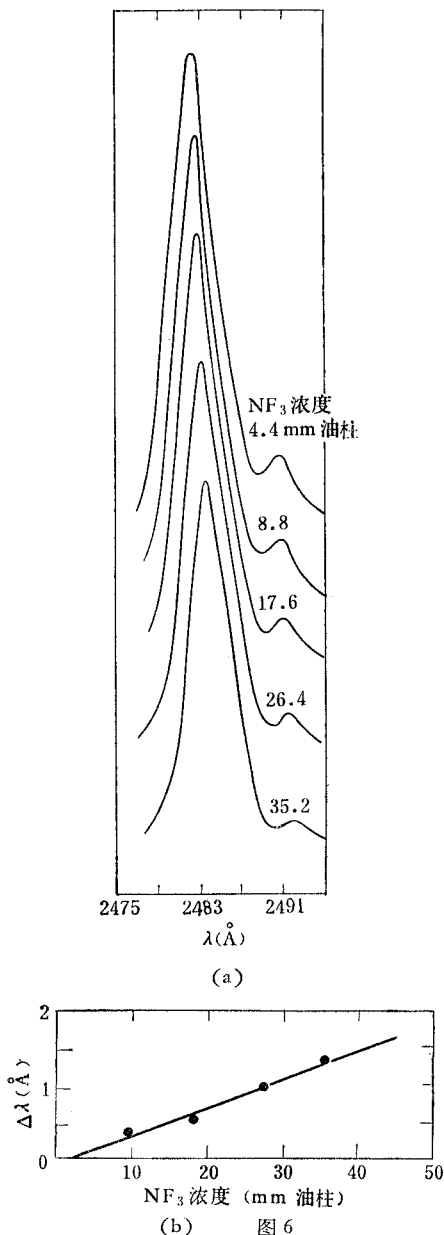


图 5 KrF 激光输出能量与工作气压的关系 (分压比  $\text{NF}_3:\text{Kr}:\text{Ar} = 1:130:1300$  保持不变)

把工作气压恒定在 1 个大气压上,改变  $\text{NF}_3$  浓度( $\text{Kr}:\text{Ar} = 0.09:1$  保持不变),拍摄了一组光谱,其黑度曲线如图 6(a) 所示. 谱线的中心波长随  $\text{NF}_3$  浓度的增加往长波方向移动,当  $\text{NF}_3$  的浓度由 4.4mm 油柱变到 35.2mm 油柱(即分压比从  $\text{NF}_3:\text{Kr}:\text{Ar} = 0.5:117:1300$  变到  $\text{NF}_3:\text{Kr}:\text{Ar} = 4:117:1300$ )时,谱线中心波长往长波方向移动  $1.6 \text{ \AA}$ , 如图 6(b) 所示.



(a) 工作气压为 1 大气压时( $\text{Kr}:\text{Ar} = 0.09:1$  保持不变),改变  $\text{NF}_3$  浓度时所摄得的  $\text{KrF}$  激光光谱黑度曲线  
(b) 随  $\text{NF}_3$  浓度的增加,中心波长向长波方向移动

$\text{KrF}$  激光输出能量与  $\text{NF}_3$  浓度的关系如图 7 所示. 为了保证  $\text{KrF}^*$  的形成速率和激光运转的必要增益,  $\text{NF}_3$  必须有某个最低浓度. 由图中曲线可以看出,当  $\text{NF}_3$  的分气压为 4.4mm 油柱时还有满足激光输出所必需的增益;而当  $\text{NF}_3$  浓度下降到 1.1mm 油柱时,就观察不到激光输出了. 在  $\text{NF}_3$  浓度增大到 70.7mm 油柱时,仍有激光输出,但  $\text{NF}_3$  浓度太大后,会形成  $\text{ArF}^*$ ,由于  $\text{ArF}^*$  的竞争,  $\text{KrF}$  的受激辐射就降低了. 而  $\text{ArF}^*$  的激光波长为  $1930 \text{ \AA}$ , 进入了真空紫外波段. 这方面的测量工作正在进行.

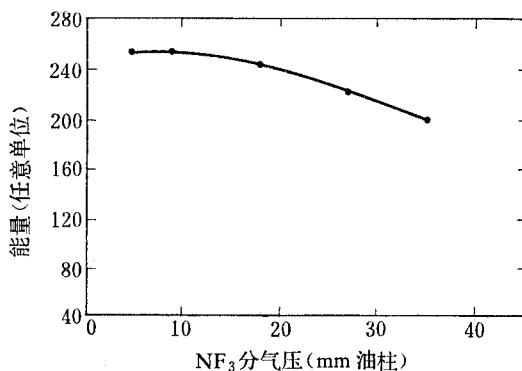


图 7 工作气压为 1 大气压时,改变  $\text{NF}_3$  浓度,对  $\text{KrF}$  激光输出能量的影响(分压比  $\text{Kr}:\text{Ar} = 0.09:1$  保持不变)

当激光腔的镜片严格调整在光轴上时,可获得单模输出. 采用感光软片、光谱干板或相纸均可摄取激光光斑,在图 8 中示出的光斑是在气压比  $\text{NF}_3:\text{Kr}:\text{Ar} = 1:130:1300$ ,总工作气压为 1.25 大气压时拍摄的,其  $x$  方向的黑度曲线与  $y$  方向上的黑度曲线均已测得,并示于对应的投影方位上.  $y$  方向正是电子束入射方向,它在靠近电子束入射膜的一侧和对着的另一侧,由于激光器结构的需要,使光斑的轮廓很分明地呈直线状. 从不同的位置上摄取的光斑,可算出激光束的发散角为 8 毫弧度.

在高能电子束激励 Ar、Kr 和  $\text{NF}_3$  混合物时, 产生激发态  $\text{Ar}^*$  ( $^3\text{P}$  亚稳态) 和电离态  $\text{Ar}^+$ , 经过一个独立的动力学过程, 多数  $\text{Ar}^+$  转换到  $\text{Ar}^*$ , 从  $\text{Ar}^*$  又以高效率把能量转换到 Kr. Kr 除了从 Ar 那里间接获得能量外, 也可直接从高能电子束那里吸取能量, 由于以上这些能量转换过程就要求三种气体均匀地混合在一起. 这就需要一段混合时间. 我们比较了混合一天的和新配气体立即进行试验的两种情况, 在 1.9 大气压下的试验证明, 两种情况都有激光输出, 但其输出能量前者为后者的 1.6 倍, 因此要想使激光能量输出较大, 将气体混合一段时间是必要的.

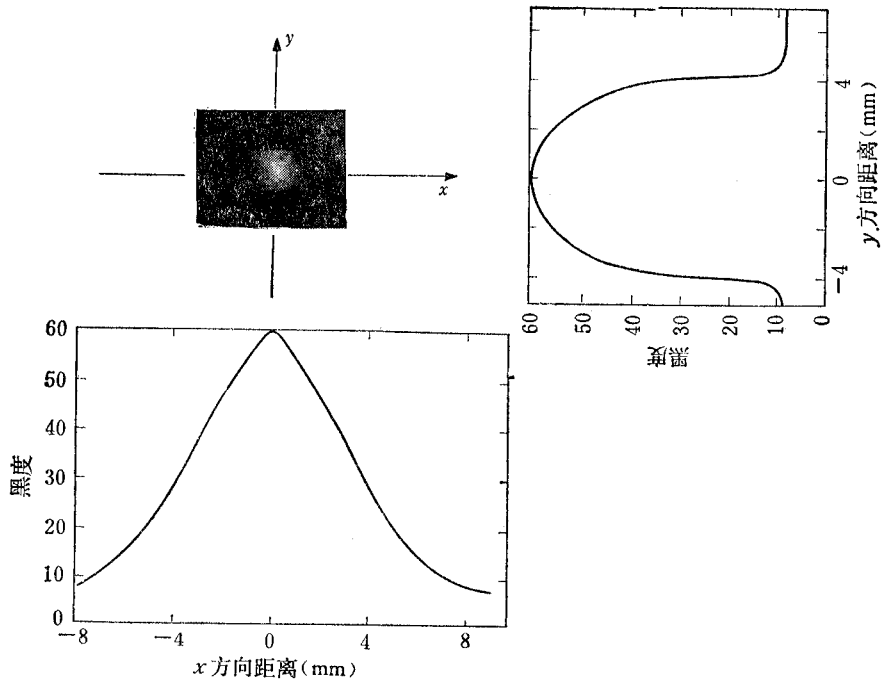


图8 KrF 激光光斑(照片)以及  $x$  方向和  $y$  方向黑度分布曲线, 光斑齿输出窗 117 毫米, 分压比  $\text{NF}_3:\text{Kr}:\text{Ar}=1:130:1300$ , 总气压为 1.25 大气压

工作气体经过多次电子束激励, 仍有激光输出, 我们观察第 13 次放电仍有强的激光输出.

Ar、Kr 和  $\text{NF}_3$  三种气体都需要有较高的纯度, 否则会降低激光输出, 甚至使受激辐射猝灭, 我们比较了两种不同纯度的  $\text{NF}_3$  (在 Kr 和 Ar 纯度不变的情况下), 一种  $\text{NF}_3$  中含有少量的  $\text{NO}_2$  及其他气体, 另一种  $\text{NF}_3$  则纯度很高, 在同样的泵浦条件下, 前者观察不到 KrF 的受激辐射, 甚至连自发辐射光谱也极其微弱, 而后者则有很强的 KrF 激光输出.

从初步研究可以看出, KrF 激光器的效率是适中的. 在一般激光器中, 从上能态发生的非辐射损耗是一个严重的问题, 为使这种损耗效应减至最小, 可使受激辐射对猝灭之比做得较大来实现. 但在像 XeF 激光器中, 利用的是束缚-弱束缚跃迁, 饱和强度限制了受激辐射速率; 而 KrF 激光器的能级系统具备束缚-自由跃迁, 饱和强度高, 一个大的受激辐射速率能够成功地对抗非辐射损耗的竞争, 所以可以指望 KrF 激光器与在可见光和紫外区已实现的激光器相比将有更高的效率.

在本工作的研制过程中,中国科技大学左景林同学参加了部分工作,在此致谢!

### 参 考 文 献

- [ 1 ] S. K. Scarles and G. A. Hart, *Appl. Phys. Lett.*, **27**(1975), 243.
- [ 2 ] J. J. Ewing and C. A. Brau, *Appl. Phys. Lett.*, **27**(1975), 350.
- [ 3 ] C. A. Brau and J. J. Ewing, *Appl. Phys. Lett.*, **27**(1975), 435.
- [ 4 ] Er. Ault, R. S. Bradford, Jr. and M. L. Bhaumilk, *Appl. Phys. Lett.*, **27**(1975), 413.
- [ 5 ] G. C. Tisone, A. K. Hays and J. M. Hoffman, *Optics Communication*, **15**(1975), 188.
- [ 6 ] M. L. Bhaumilk, R. S. Bradford, Jr. and F. R. Ault, *Appl. Phys. Lett.*, **28**(1976), 23.
- [ 7 ] J. R. Murray and H. T. Powell, *Appl. Phys. Lett.*, **29**(1976), 252.
- [ 8 ] Н. Г. Басов, А. Н. Брунин, В. А. Данилычев, А. Г. Дегтярев, В. А. Долгих. *Квантовая Электроника*. **4** (1977), 1595.
- [ 9 ] J. M. Hoffman, A. K. Hago and G. C. Tisone, *Appl. Phys. Lett.*, **28**(1976), 538.
- [ 10 ] 顾之玉、赵仲宏、翟宝光、吴承懋, 电子学报, **1** (1978) 2, 93.