

# 电子束泵浦 XeF( $C \rightarrow A$ ) 激光的实验研究

郭 振 华

(华中工学院)

F. K. 梯 特 尔, W. L. 小 威 尔 逊, M. C. 斯 梅 岭

(美国莱斯大学)

J. 里 格 尔

(德国乌兹伯格大学物理所)

**提要:** 给出了电子束泵浦 XeF( $C \rightarrow A$ ) 准分子激光的实验资料并作了一些初步分析, 这些结果是在选用最佳混合气体(对应电子束横向激发采用 8 大气压 Ar, 16 托 Xe, 8 托 NF<sub>3</sub>; 对应纵向激发采用 2 大气压 Ar, 8 托 Xe, 3 托 NF<sub>3</sub>)条件下得到的。着重研究了光学谐振腔对宽带内波长调谐性和输出功率的影响。用纵向电子束激发, 在 74 毫微米宽带范围内(从 455 毫微米到 529 毫微米)得到了连续可调谐的窄带激光输出。当用棱镜作为色散元件时, 其线宽约为 5 毫微米; 如果用衍射光栅代替棱镜则线宽可窄至 1 毫微米左右。

## Experimental study of an electron beam-pumped XeF( $C \rightarrow A$ ) excimer laser

Guo Zhenhua

(Huazong Institute of Technology)

F. K. Tittel, W. L. Wilson, Jr., M. C. Smailling

(Rice University, USA)

J. Liegel

(Institute of Physics, Wurzburg University, West Germany)

**Abstract:** Experimental results of an electron beam-pumped XeF( $C \rightarrow A$ ) excimer laser are presented and reviewed. Such a laser was operated with an optimized gas mixture of 8 At. Ar, 16 Torr Xe, 8 Torr NF<sub>3</sub> for transverse excitation and 2 At. Ar, 8 Torr Xe, 3 Torr NF<sub>3</sub> for longitudinal pumping. In particular, the influence of the optical resonator configuration upon the broadband wavelength tuning and enhanced output power characteristics was studied. With longitudinal electron beam excitation a tuning range of 74 nm (from 455 nm to 529 nm) accompanied by spectral narrowing has been demonstrated. The linewidth of the laser emission is ~5nm when a prism is used as the dispersive element and is reduced even further to ~1nm when the prism is replaced by a diffraction grating.

收稿日期: 1981年10月12日。

准分子 XeF(C→A)激光, 在蓝-绿色区域内潜藏着宽广的可调谐性范围, 所以近年来受到很大的重视, 进行了相当多的研究。起初, 是用光解的方法<sup>[1, 2]</sup>得到了激光振荡。后来, 用电子束直接泵浦<sup>[3, 4]</sup>和放电泵浦<sup>[5, 6]</sup>也获得了成功。接着就得到了连续可调谐范围超过 70 毫微米<sup>[7]</sup>、输出能量达 6 焦耳的结果<sup>[8]</sup>。另外, 还广泛地研究了插入染料盒的放大作用<sup>[9]</sup>、激活介质的增益<sup>[10~12]</sup>以及激光跃迁上能态 C(3/2)的某些性质<sup>[7, 12~16]</sup>。

本文从实验研究入手, 描述了电子束泵浦的 XeF(C→A)荧光和激光的多种特性。特别是在电子束纵向泵浦的“入”型装置上<sup>[17]</sup>, 利用利特尔棱镜和衍射光栅作为色散元件, 得到了 74 毫微米宽带范围内的连续可调谐激光。而且谱线宽度最窄时可到 1 毫微米。

实验装置的方框图示于图 1, 其中 Pulsarad 110 型脉冲电子束发生器, 主要由三部分构成, 即马克斯高压发生器、布鲁林脉冲形式网络和场致发射二极管(图 2)。它提供的脉冲电子束参数大致是: 能量 1 兆电子伏, 电流密度 10 千安/厘米<sup>2</sup>, 脉宽(FWHM 极大

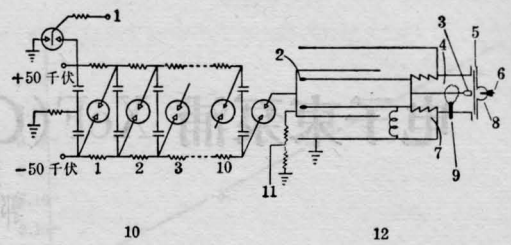
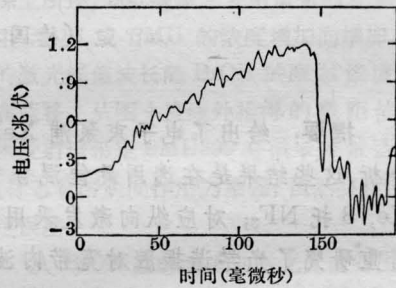
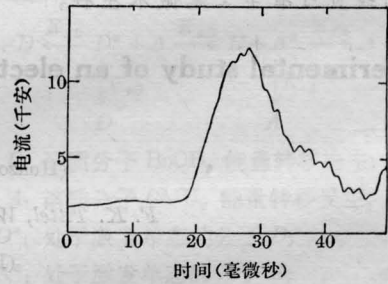


图 2 脉冲电子束发生器电气原理图

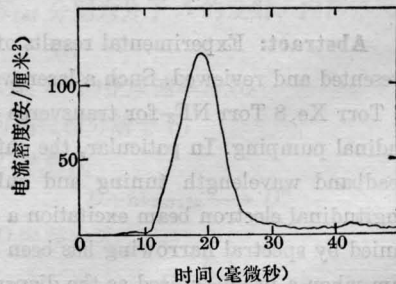
1—触发脉冲输入; 2—可在外部调节的火花隙; 3—石墨阴极; 4—高真空; 5—薄膜阳极; 6—法拉弟探头; 7—绝缘油; 8—反应室; 9—儒可夫斯基线圈; 10—马克斯脉冲发生器组; 11—马克斯发生器监视器; 12—布鲁林脉冲形成网络



(a) 马克斯发生器电压



(b) 儒可夫斯基线圈电流



(c) 法拉弟探头电流

图 3 电子束发生器的典型参数

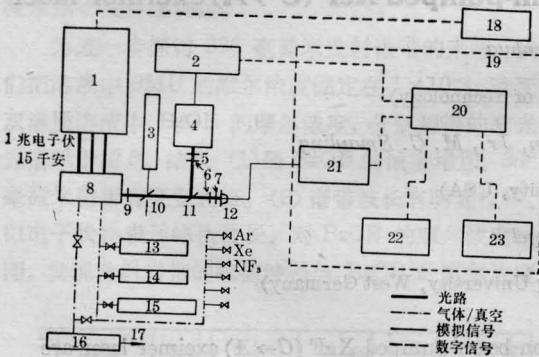


图 1 实验设备方框图

1—电子束发生器; 2—OMA 电子学部分; 3—He-Ne 激光器; 4—OMA 单色仪与探测器; 5—石英透镜; 6—中性滤光片; 7—相干滤光片; 8—反应室; 9—光阑; 10—可移动光分裂器; 11—光分裂器; 12—光电管; 13—低压压力计; 14—真空量规; 15—机械压力计; 16—机械泵; 17—通大气出口; 18—遥控触发; 19—法拉弟屏蔽箱; 20—PDP11/23; 21—R7912 瞬时数字仪; 22—HP7225A 画图仪; 23—HP6248A 终端图示意

值一半处的全宽度)10毫微秒。图3给出了典型的波形特性。激光反应室在我们的实验中分为两种:一是由电子束从横向注入,激活区长度仅10厘米(图4,图5)。这种激光腔体,可以经受 $10^{-5}$ 托~15大气压的压力变化范围和从 $-100^{\circ}\text{C}$ 到 $+500^{\circ}\text{C}$ 的温度变化范围。另外一种激光腔体是电子束从纵向注入一个长1米的“入”型不锈钢管。管壁厚仅0.8毫米,直径50毫米。管外附有三个直流线圈,螺旋管线圈产生的磁场的作用分别是把电子束导入激光反应管内,束缚电子束在光轴附近以及最后在管的末端把电子束偏转出光轴以外去(图6)。由于电子束的能量仅1兆电子伏特,所以要确保高能电子的平均自由程在80厘米左右,混合气体的压力在此情况下就不能大于2个大气压力了。两种激光腔体的材料全都是不锈钢的,这就可以有效防止某些腐蚀性气体(如 $\text{F}_2$ 、 $\text{HCl}$ ...等)对腔体内壁的破坏作用。

实验使用的各种气体质量相当重要。为了把杂质对激光的淬灭作用降至最低限度,Ar、Xe等都是研究级纯度(99.995%)。卤化物施主气体 $\text{NF}_3$ 是光谱纯(99+%)。通常在向反应室内充气之前,必须认真抽去原先的残存气体或更换谐振腔镜片时进入反应室的空气和水气。一般要使用高级机械泵(或油扩散泵),使真空度达到优于 $10^{-6}$ 托,并用比较廉价的氩气冲洗一下(同时可以粗调,初步准直光子谐振腔)。充气次序是,先缓慢地

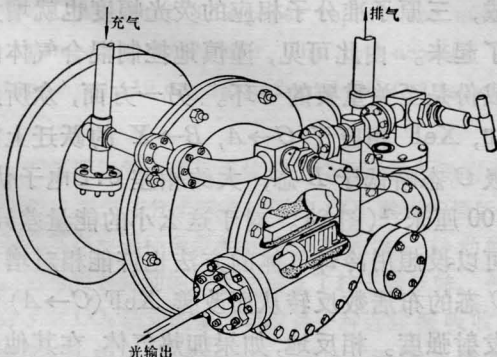


图4 激光反应室外形图

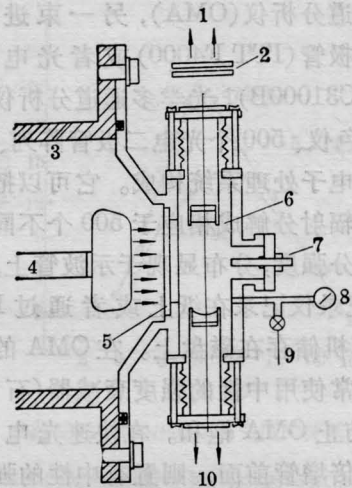


图5 激光反应室示意图(电子束横向注入式)

1—到光学多通道分析仪和可见光光电二极管; 2—滤光片架; 3—电子束发生器; 4—阴极, 5—钛膜阳极; 6—室内光学谐振腔; 7—法拉第圆筒探头; 8—气压计; 9—气体和真空系统导管组合; 10—到紫外光光电二极管

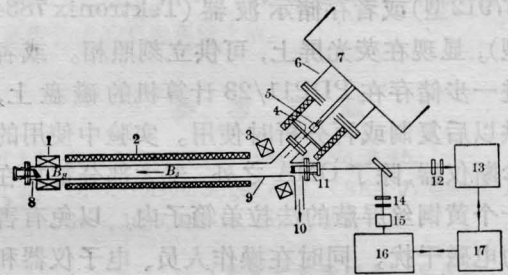


图6 电子束纵向注入式激光反应室示意图

1—赫姆霍兹线圈; 2—螺旋管; 3—偏转线圈; 4—钛膜阳极; 5—阴极; 6—真空室; 7—电子束加速器; 8—利特尔棱镜或光栅; 9—激光室; 10—到真空泵和充排气系统; 11—波纹管镜架; 12、14—滤光片架; 13—OMAI; 15—光电二极管; 16—瞬时数字式分析仪; 17—PDP11/23微处理计算机

充入卤化物施主气体。这时的测量精度可控制在0.1托左右。最后,快速充入高压过渡气体(如Ar,6个大气压),使在室内形成紊乱的湍流,达到各种气体成份在较短时间内的充分混合,以保证实验结果良好的重复性。

从谐振腔的耦合镜片输出的光辐射,首先通过直径2.5厘米的可调光阑,在一个可移动的光束分束器上分为两束,一束进入光

学多通道分析仪(OMA),另一束进入快速光电二极管(ITT F4000)或者光电倍增管(RCA C31000B)。光学多通道分析仪是由狭缝、单色仪、500个光电二极管阵列、光电摄像管及电子处理系统构成。它可以把单次短脉冲光辐射分解成相应于500个不同波长的时间积分强度,分布显现于示波管上。然后用X-Y记录仪记录在纸上或者通过PDP11/23计算机储存在磁盘上。在OMA的光束输入端,常使用中性的强度衰减器(石英玻璃片)以防止OMA饱和。在快速光电二极管或光电倍增管前面,则置有中性的强度衰减器和干涉带通滤光片等,一方面可以制止输入信号过载,又可以排除无关波长信号的输入。快速真空光电二极管要求1500伏左右的直流偏压,其输出信号用低噪声电缆通过紫铜管输往瞬时数字分析仪(Tektronix R7912型)或者存储示波器(Tektronix 7834型),显现在荧光屏上,可供立刻照相。或者进一步储存在PDP11/23计算机的磁盘上,供以后复制或再分析时使用。实验中使用的诊断仪器,除了OMA之外,绝大部分都放在一个黄铜丝屏蔽的法拉弟箱子内,以免有害的电磁干扰。同时在操作人员、电子仪器和电子束发生器之间筑有一堵厚厚的铅砖墙,用来消除X射线可能造成的伤害。电子束发射系统的电路附有连锁装置和安全警告红灯,以保证高电压系统的安全工作。

要研究XeF(C→A)的激光,第一步需考察它的荧光发射状况。这样可以找到最佳的混合气体成分(压力比),掌握荧光的谱带范围,荧光的发射强度分布以及寿命等。图7是我们得到的典型的XeF荧光频谱曲线,混合气体的组成是8托NF<sub>3</sub>,16托Xe,8个大气压Ar(横向注入式激光腔体)。从这个图上,我们可以得到XeF(C→A)的某些光谱学参量:中心波长 $\lambda=475$ 毫微米,带宽(FWHM) $\Delta\lambda=65$ 毫微米。另外根据瞬态波形测得的衰减时间 $\tau=101$ 毫微秒,可以算出

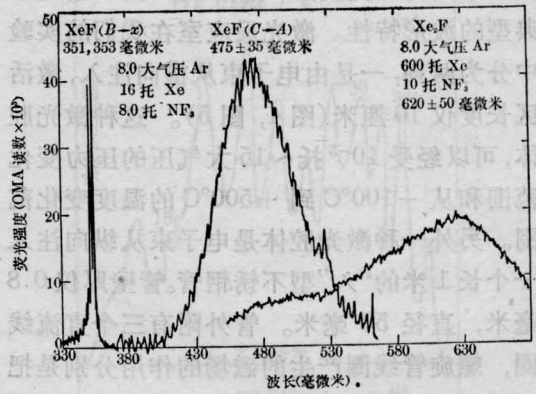


图7 典型的XeF荧光频谱曲线

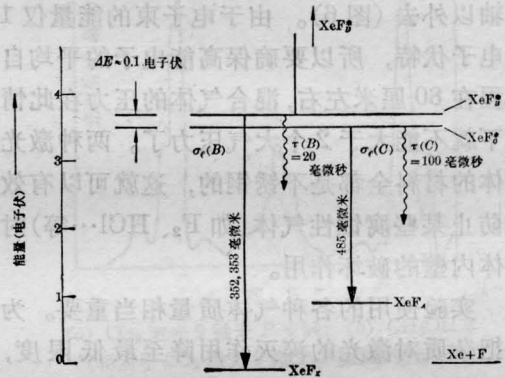


图8 XeF的能级示意图

其增益截面 $\sigma=1.1 \times 10^{-17}$ 厘米<sup>2</sup>以及增益大约是 $g=11\%$ /厘米。为了比较起见,也同图画出了长波段的Xe<sub>2</sub>F的荧光谱带曲线。它的相应混合气体成份是10托NF<sub>3</sub>,600托Xe,8个大气压Ar。很显然,混合气体中Xe成份增加时有利于三原子准分子Xe<sub>2</sub>F的形成,三原子准分子相应的荧光幅度也就增大了起来。由此可见,谨慎地控制混合气体的成份是至关重要的一环。另一方面,众所周知,XeF相应于C→A, B→X的跃迁上能级C态略低于B态,大约相差0.1电子伏,700厘米<sup>-1</sup>(图8)。对于这么小的能量差异,可以设想用冷却气体的方法也许能相对增加C态的布居数反转从而改善XeF(C→A)的发射强度。相反地,如果加热气体,在其他条件不变的情况下,则有利于B态布居数反转

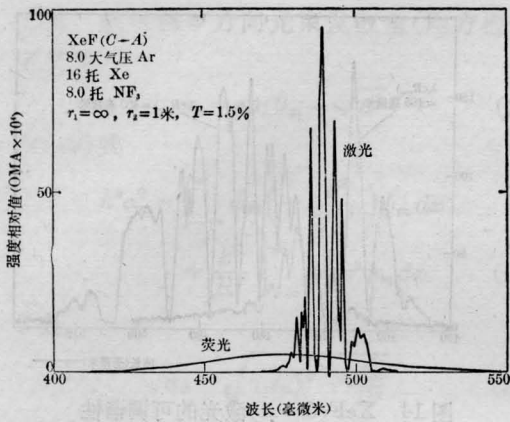


图9 XeF(C→A)激光和荧光频谱曲线  
(横向注入腔)

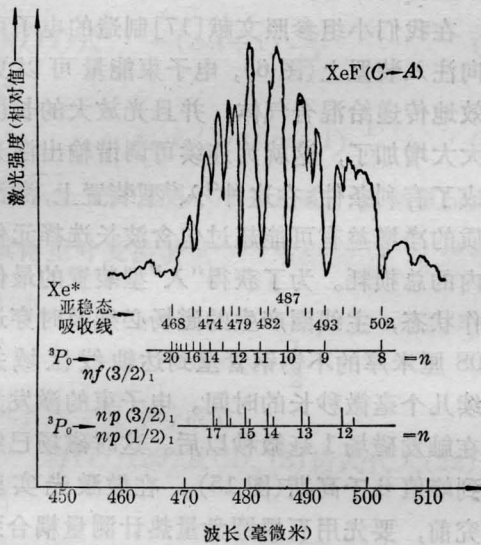


图10 XeF(C→A)激光频谱曲线上的吸收谷与  
Xe\* 亚稳态向高里德堡态跃迁的对应关系

相对增加, 因此提高了 XeF(B→X)的发射强度<sup>[16]</sup>。

典型的 XeF(C→A)的时间积分激光频谱曲线之一示于图9, 我们在背景上还划出了荧光谱曲线作为参考。除激光辐射的强度大大增加之外, 激光频谱的带宽则大大地变窄, 而且中心波长向长波长方向位移。中心波长移动通常有两方面原因, 一是增益或受激辐射和波长有关, 大致是 $\lambda^4$ 的关系; 另一方面辐射中心波长受谐振腔镜片镀膜反射率的影响。激光辐射频谱曲线的其他显著特点

是, 存在着明显的吸收造成的深谷。这可归结为稀有气体施主 Xe, 因为吸收谷的形状并不随过渡气体变化, 也不随卤化物施主变化, 而XeF(C→A)和Xe<sub>2</sub>O<sub>1</sub>的频谱有着明显的一致性。进一步研究证实, 这是由于Xe\*亚稳态向高里德堡能级跃迁造成的。它的吸收线与XeF(C→A)频谱曲线凹谷的对应关系如图10所示。

由光电二极管测得的XeF(C→A)激光瞬态波形示于图11中, 其中虚线是相应的荧光波形。两者比较可见: 激光波形变窄, 急剧上升, 基本对称, 这说明激光强度甚大于振荡阈值, 特别是当利用高Q谐振腔时, 激光强度比一般Q值的谐振腔可高出两三个量级, 其峰值功率达到2千瓦左右, 甚至有几条吸收线<sup>[1~3]</sup>也消失了(图12, 图13)。这种有趣的现象, 尚不确切知其原因, 估计是在高Q强光的条件下, 腔内激活介质各种可能跃迁(特别是C→A与B→X跃迁)的竞争结果, 使得大部分激发态粒子都通过C→A通道进行了雪崩式跃迁。

在横向注入式激光腔装置上, 我们还不能直接得到连续可调的激光输出。不过利用不同中心波长的谐振腔镜片, 我们得到了不同中心频率波长的激光振荡频谱曲线(图14), 例如中心波长为 $\lambda=465$ 毫微米, 485毫微米等。这一点就间接地说明了XeF(C→A)的确潜藏着可实现连续可调谐性。只

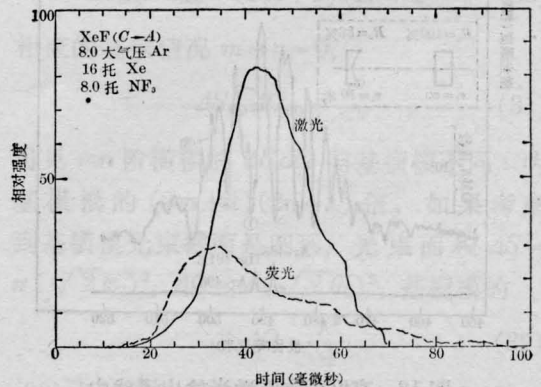
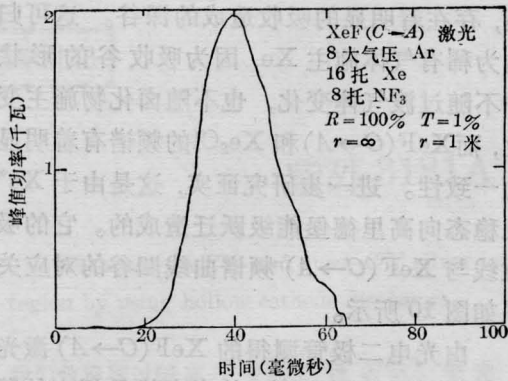
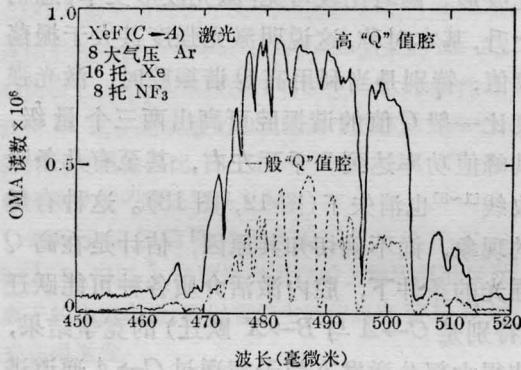


图11 XeF(C→A)激光和荧光瞬时波形



(a) 波形



(b) 频谱曲线

图 12 XeF(C→A)高“Q”值腔激光输出

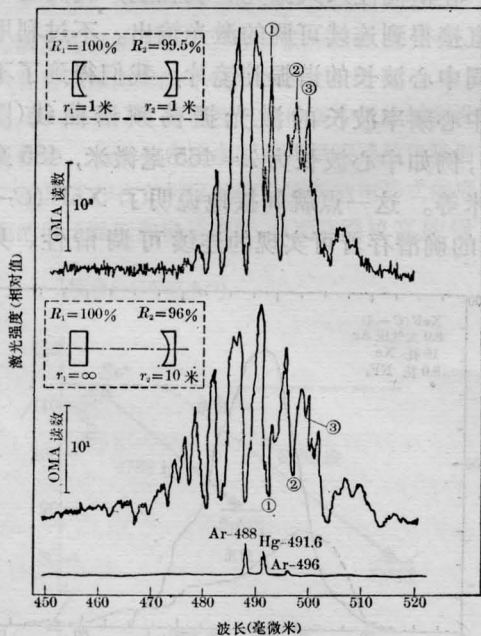


图 13 高“Q”值腔激光输出谱线中部分吸收线的消失

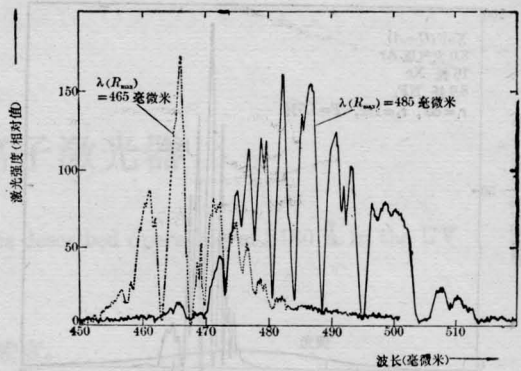


图 14 XeF(C→A)激光的可调谐性

要设法进一步减小损耗或改进增益长度就会有希望得到实现。

在我们小组参照文献[17]制造的电子束纵向注入装置上(图6),电子束能量可以更有效地传递给混合气体,并且光放大的长度也大大增加了,这就为连续可调谐输出激光造成了有利条件。在这种“入”型装置上,激活介质的净增益有可能超过包含波长选择元件在内的总损耗。为了获得“入”型装置的最佳工作状态,主线圈产生的磁场必须及时穿过0.08厘米厚的不锈钢管壁到达轴线区域并持续几个毫微秒长的时间。电子束的激发大约在触发磁场1毫微秒以后。这时磁场已经达到峰值6千高斯(图15)。在做激光实验研究前,要先用石墨圆盘量热计测量耦合到管内的电子束能量,它大约为10焦耳左右,还要用重氮化铊薄膜当靶,检测管子不同地方电子束能量的横向分布。它在2个大气压氙气的条件下,其横向分布基本呈圆对称,强度从轴线向管壁的衰减曲线宽度(FWHM)是27厘米。

选用中心波长为490毫微米的介质膜反射镜(曲率半径 $r=10$ 米,反射率 $R=99\%$ )和曲率半径 $r=10$ 米,透射率 $T=5\%$ 的耦合输出镜作谐振腔,我们得到了输出功率近30千瓦/厘米<sup>2</sup>的激光输出,其频带宽度约为30毫微米,比同样条件下的荧光频带宽度50毫微米窄化了许多(图16)。为了得到连续

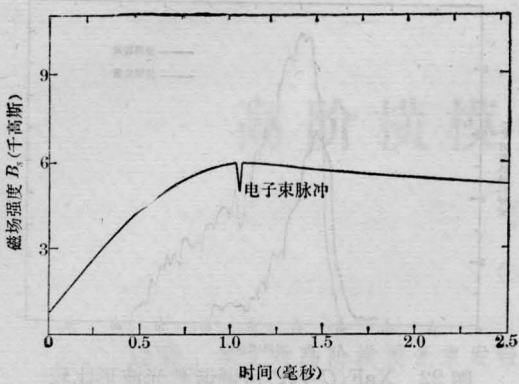


图 15 电子束纵向注入式激光反应室内的磁场特性

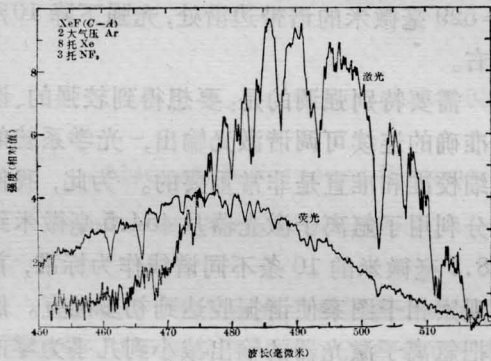


图 16 XeF(C→A)激光(纵向注入腔)

可调谐的激光输出，我们最初曾尝试把色散元件置于不锈钢管之外，通过布儒斯特窗口进行耦合，但是没有成功。当把色散元件移入管内时，总损耗大大减少，终于实现了连续可调谐的激光振荡输出。当然这样作也存在一个问题，就是混合气体及其付产品对色散元件的腐蚀作用应当加以解决。

使用利特尔棱镜(用高色散玻璃 Schott SF59 制成，其反射率为  $R \geq 99\%$ )代替多层介质膜反射镜片，我们得到了线宽仅 5 毫微米的连续可调谐激光输出。波长范围从 455 毫微米到 529 毫微米，总宽度达 74 毫微米(图 17)。当我们把每毫米 600 条的衍射光栅(它在 490 毫微米波长处反射率  $R \approx 77\%$ )放入管内代替利特尔棱镜时，则在同样宽的谱带范围内，得到了更窄的谱线宽度。最窄时达到了仅仅 1 毫微米的水平(图 18)。为

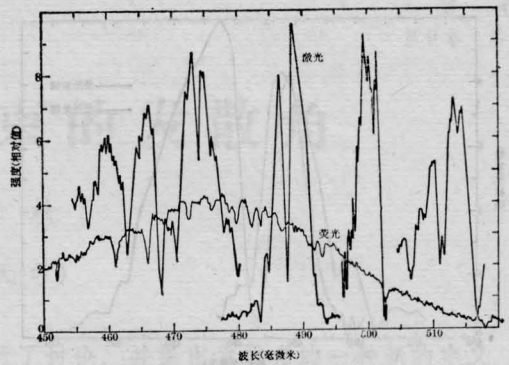


图 17 XeF(C→A)的连续可调谐特性(使用棱镜)

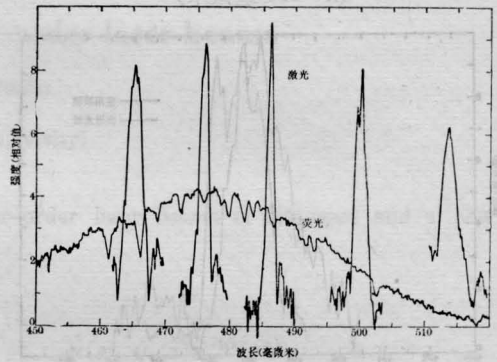


图 18 XeF(C→A)的连续可调谐特性(使用光栅)

了更仔细的比较，在图 19、图 20 中我们选  $\lambda = 488$  毫微米和  $\lambda = 501$  毫微米两条激光输出谱线分别对应于利特尔棱镜和衍射光栅时的线型画在一起。由图上可看出相应于衍射光栅的线型远优越于利特尔棱镜。但是，从图 10 可知，由于  $Xe^*$  的亚稳态  $3p_0 \rightarrow 10f(3/2)_1$  跃迁，在  $\lambda = 487.1$  毫微米处有强烈吸收，所以  $\lambda = 488$  毫微米的激光发射输出线型发生了很大畸变，出现了一个深谷。相应于  $\lambda = 488$  毫微米和  $\lambda = 501$  毫微米的激光瞬时波形，通过光电二极管和瞬时数字分析仪的示波管记录下来。计算机终端设备画出的波形图示于图 21、图 22。在这两幅图上，我们看到当谱线变窄时，二极管接收到的总激光强度减小了，所以波形的峰值和宽度都下降了。但是值得注意的是激光超过阈值的时间却略有提前，大约 2 毫微秒左右。考虑到用光栅时线宽变窄到了只有原来用棱镜时的

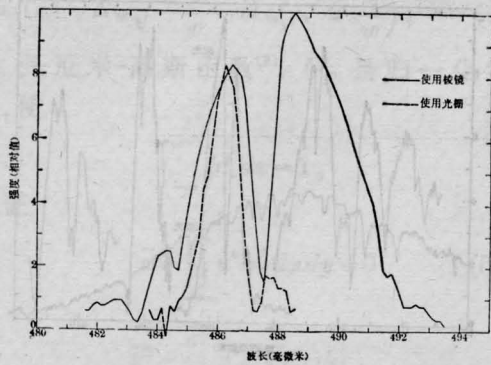


图 19 XeF(C→A)可调谐激光的线型比较  
(λ=488 毫微米)

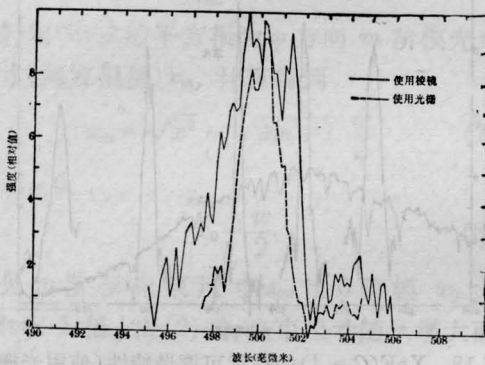


图 20 XeF(C→A)可调谐激光的线型比较  
(λ=501 毫微米)

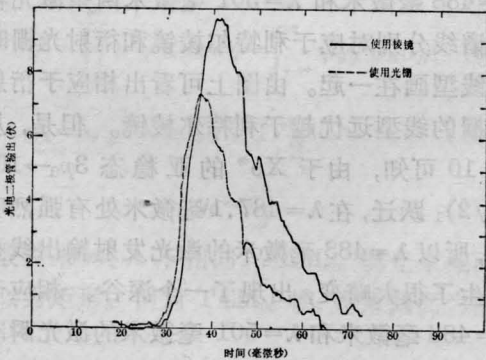


图 21 XeF(C→A)可调谐激光波形比较  
(λ=488 毫微米)

1/2~1/6, 而光脉冲强度只降低了1/4~1/3, 所以单位波长线宽内的平均强度则可能大大增加了, 因此它就可能很快超过相应带宽内的激光振荡阈值而实现振荡。表现在瞬时波形图上的定量数值是2毫微秒左右。实验测得对应于波长λ=488毫微米, 输出功

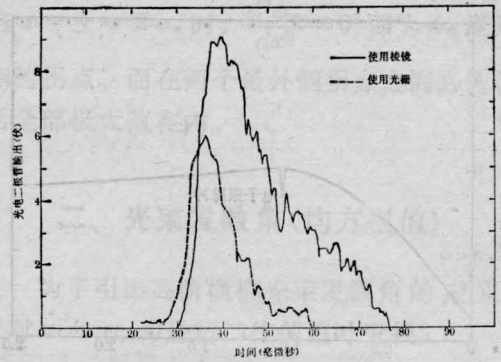


图 22 XeF(C→A)可调谐激光波形比较  
(λ=501 毫微米)

率达到1千瓦/厘米<sup>2</sup>, 在λ=455毫微米和λ=529毫微米的谱带边缘处, 光强下降10%左右。

需要特别强调的是: 要想得到较强的、谱线准确的连续可调谐激光输出, 光学系统的仔细校准和准直是非常重要的。为此, 我们充分利用了氙离子激光器从454.5毫微米到528.7毫微米的10条不同谱线作为标准, 首先观察相干图案使谐振腔达到初步准直。然后把氙离子激光器的输出减小到几乎为零的临界状态, 再进一步细调谐振腔基元, 使相应波长的氙离子激光在色散元件和耦合输出镜之间产生临界振荡, 这样谐振腔才被认为调整到了最佳状态, 接着还要对已校准好了的接受器: 光电二极管和OMA分别进行准直检查, 务必使在谐振腔内振荡的光束或相干环能够垂直地入射到二极管的轴心和OMA前面狭缝的中心部分。以上这些步骤每改变一次, 振荡谱线最好都要从头到尾检查调整一次, 以确保得到良好的重复性结果。

### 参 考 文 献

- [1] W.K. Bischel *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **34**, 565~567.
- [2] N. G. Basov *et al.*; *Sov. J. Quant. Electr.*, 1979, **QE-9**, 629.
- [3] W. E. Ernst, F. K. Tittel; *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **35**, 36~37.
- [4] J. D. Campbell *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **37**, 348~350.



- [5] R. Burnham; *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **35**, 48~49.
- [6] C. H. Fisher *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **15**, 26~28.
- [7] W. K. Bischel *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1981, **52**, 4429.
- [8] D. L. Huestis; *Lasers'80 Dec.* 15~19, 1980, New Orleans, LA.
- [9] C. H. Fisher *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **35**, 901~903.
- [10] W. E. Ernst, F. K. Tittel; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1980, **QE-16**, 945~948.
- [11] R. M. Hill *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **34**, 137~139.
- [12] G. Marowsky *et al.*; *Appl. Optics*, 1980, **19**, 138~143.
- [13] D. Kligler *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **33**, 39~41.
- [14] T. G. Finn *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **34**, 52~55.
- [15] M. Rokni *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **35**, 729~731.
- [16] W. E. Ernst, F. K. Tittel; *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**, 2432~2435.
- [17] R. A. Klein; Sandia Report SAND, 1979, 79~1659.

.....

(上接第 452 页)

装置能够透视观察生物体内部的软组  
织, 以及不透明材料的内部缺陷。图 8 至 11  
显示了成象的情况, 另外可见脉冲氩离子激  
光的成象有较多的细节及较高的反差, 声全  
息作动态的电影记录或磁录象观察效果更为  
好。

#### 四、讨 论

脉冲玻璃壳氩离子激光器能够应用于声  
全息研究, 在实验中已经使用了一年以上, 至  
今输出功率尚未衰落, 恒定冷却水压是保证  
激光输出功率不变的关键。超声波工作在 3  
兆周, 系统分辨率可达 1 毫米左右。氩离子  
激光对光学镜面的要求较高, 如镀铝反射镜

面氧化后, 脉冲氩离子激光的功率损失要比  
氩-氟激光严重得多。此外脉冲氩离子激光  
器的激励电源较氩-氟复杂, 操作较繁琐些。  
脉冲氩离子激光在声学中除了可用于声全  
息显象外, 还可以用于斯利伦声场显示研  
究。

孙慧芳同志也一起参加本研究工作, 特  
别是南京工学院凌一鸣老师为实验提供了激  
光管, 江苏师院姜锦虎老师协助联系, 参加联  
试实验, 特此感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] 气体激光编写组; 《气体激光》, 上海人民出版社,  
1975 年。
- [2] B. P. Hildebrand *et al.*; "An Introduction to  
Acoustical Holography", 1972, p. 137.