

超短激光脉冲研究

——产生和测量, 选择和放大

唐贵琛 支婷婷 谢梓铭 裘佩霞

(中国科学院上海光机所)

Investigations on ultrashort laser pulses

——Generation and measurement, selection and amplification

Tang Guisheng Zhi Tingting Xie Ziming Qiu Peixia

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Investigation results on ultrashort pulses of a passively mode-locked Nd glass laser are presented in this article. The generation, selection and amplification of the ultrashort pulses are described in particular. The effects of dye cell, dye concentration and the transmissivity of the output mirror on mode locking have been studied. The amplification factor and the signal-to-noise ratio for pulses of 10 ps to 130 ps have been measured. Some of the experimental results on interaction between ultrashort pulses and plasma are also included.

关于被动锁模钕玻璃激光器产生超短脉冲的研究, 在国外已做了大量的工作^[1]。我们对超短脉冲的研究也已有多年的历史了。本工作一方面是为了产生微微秒脉冲和亚微微秒脉冲, 以供某些物理实验应用; 另一方面, 进一步摸索锁模规律, 考察饱和吸收体锁模机理, 研究各种参数对锁模的影响以及超短脉冲的性质等等。

一、实验装置和测试方法

锁模振荡器的实验, 是在两种装置上进行的, 如图 1 的(a)和(b)。(a)为普通的振荡器装置, (b)是一种实验室的样机。两种装置全是半共焦腔, 腔长 1.5 米, 因而, 光的往返

周期 $T=2L/C=10$ 毫微秒。凹面镜的曲率半径 $R=3.0$ 米, 输出端是 $30' \sim 2^\circ$ 的楔形部分反射镜, 楔形板的角由输出腔板到棒端面的距离来决定。(a)装置中, 棒的尺寸是 $\phi 12 \times 200$ (毫米)_{有效}, 两个端面的法线与光轴成小角度, 用的是双圆柱形聚光筒, 供给二根直管氙灯的电容为 600 微法。棒用恒温水冷却, 而灯是自然冷却的。图 1(b)的样机装置中, 激光器的腔板放在殷钢支架架上, 而整个激光器置于恒温箱内, 箱内的温度变化可控制在 1°C 以内。棒的端面磨成布儒斯特角, 其尺寸为 $\phi 10 \times 200$ (毫米), 并另有恒温水冷却。双直管氙灯 $\phi 10 \times 220$ (毫米) 由双椭圆聚光筒与之相匹配, 双灯串连, 电容是 150 微

收稿日期: 1979 年 2 月 2 日。

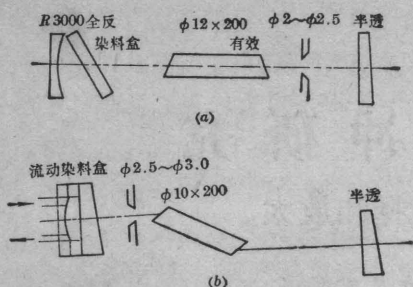
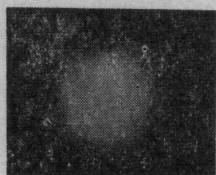
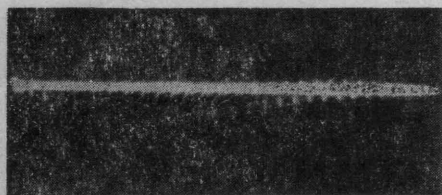


图1 两种锁模钕玻璃激光装置



(a) 基模输出场图照片



(b) 锁模脉冲序列照片

图2

法。样机上的染料盒，与凹面全反镜呈一体化，这有助于消除卫星脉冲的产生^[2]。此外，谐振腔内均置有 $\phi 2.5 \sim 3$ 的选横模光阑，以保证激光器的输出是基模。基模输出场图照片如图2(a)所示。多次实验反复证明，基模振荡是锁模好的必要条件之一。

对锁模脉冲的测量及其方法包括了以下内容：

- (1) 能量：用高灵敏卡计测量。
- (2) 能量的空间分布：用照相法测量较准，一般实验中，用场图灵敏纸观察。
- (3) 脉冲序列：用国产强流光电管GD-44AT和快速行波519示波器观察[图2(b)]。
- (4) 脉冲宽度和锁模质量：用双光子荧光(TPF)法测量。
- (5) 单脉冲-背景信噪比：放大后用光电法测量^[5]。
- (6) 铌酸锂选脉冲开关消光比：用能量

法和光电法测量[见第二部分]。

(7) 锁模的稳定性：由示波器波形、能量和TPF等监视。

(8) 超短脉冲的增益：用能量和功率法测量[见第二部分]。

二、若干实验及其结果的解释

1. 不同脉冲宽度的获得

采用十一甲川蓝色素溶于丙酮锁模，染料盒的液层厚度是1毫米，透过率为60%，染料盒以布鲁斯特角的形式插入腔内。这种情况下，能得到10微微秒的脉冲。它的TPF轨迹照片和黑密度扫描轨迹见图3。这种放置方式，常常在主脉冲旁边出现卫星脉冲[如图4的(a)和(b)]。主脉冲与卫星脉冲的时间间隔是 $\Delta T = 2l/C$ ， l 为染料盒到凹面腔板的距离。

饱和和吸收体锁模的起伏机理，能够说明卫星脉冲产生的原因。由腔面反射回来的主脉冲将染料饱和，这时刚好有一个小脉冲不遭损耗地反向通过染料盒，由于它少经受一次吸收损耗，净增益变大了，因此它的振荡几率也增加了。

如果将染料盒摆成小的倾角并紧贴近一个腔板或染料盒与凹面镜一体化，都可获得几十微微秒的脉冲。图5(a)为一体化染料盒(厚1毫米)时所拍得的TPF照片。5(b)为腔内加了0.32毫米厚两面镀膜的标准具($R = 35\%$)所拍得的照片。

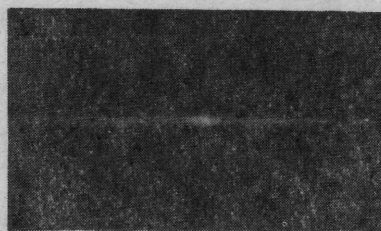
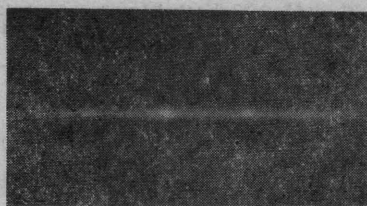
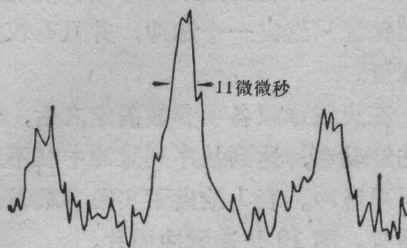


图3 微微秒级脉冲 TPF 照片

若染料盒摆成布儒斯特角，腔内插入0.5毫米厚，两个面反射率为20%的镀膜标

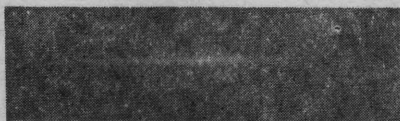


(a) 有明显卫星脉冲的微微秒脉冲 TPF 照片



(b) 微微秒脉冲 TPF 黑密度扫迹

图 4



(a) 一体化染料盒的 TPF 照片, $\tau_p \sim 25$ 微微秒



(b) 一体化染料盒腔内加 0.3 毫米 ($R=35\%$) 标准具的 TPF 照片, $\tau_p=54$ 微微秒

图 5

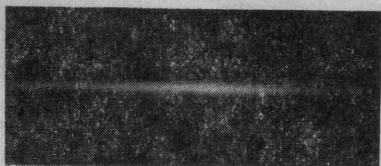


图 6 腔内加 0.5 毫米 ($R=20\%$) 一块标准具的 TPF 照片, $\tau_p \sim 75$ 微微秒

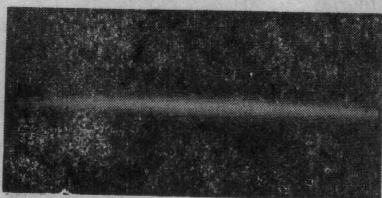
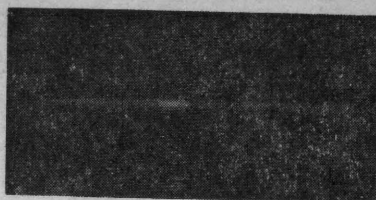
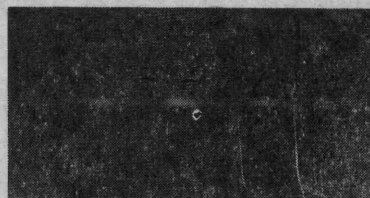


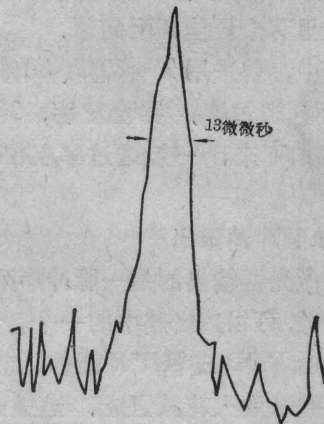
图 7 腔内加 0.2、0.6、3.2 毫米三块平板的 TPF 照片, $\tau_p \sim 130$ 微微秒



(a) 腔内加一块 0.2 毫米的选模板的 TPF 照片



(b) 腔内加 0.2、0.6 毫米两块选模板的 TPF 照片



(c) 微微秒脉冲 TPF 黑密度扫迹 (腔内加 0.2、0.6 毫米平板标准具)

图 8

准具, 输出脉宽约 80 微微秒。插入 0.2、0.6、3.2 (毫米) 厚的三块平板, 输出脉宽约 130 微微秒, TPF 照片如图 6 和图 7。实验表明, 仅加 0.2 或 0.6 毫米厚的平板一块, 或两块一起加, 对拉长脉冲作用很小。TPF 照片如图 8(a)、(b) 所示, 即脉宽与不加标准具时差不多。

2. 染料浓度的影响

实验表明, 染料透过率从 50% 增加到 70%, 脉冲宽度从 24 微微秒增加到 28 微微秒。因受脉冲的不稳定所影响, 小浓度变化时, 则看不出脉冲的显著变化。这种变化是符合染料的锁模原理的。因浓度增加, 漂白阈值升高, 脉冲前沿变陡, 因而, 脉宽就相应变窄了。

染料浓度不仅影响脉宽，而且还影响锁模脉冲发生的几率。实验表明，在本实验装置条件下，染料透过率在 55~60% 范围内，锁模比较稳定。

3. 输出腔板透过率的影响

输出腔板的透过率影响锁模脉冲的强度。当透过率较低时，双光子荧光相当暗，甚至拍不下发光轨迹，相反，TPF 就亮起来。很明显，由于腔板透过率的增加，输出到腔外的功率增加了。当然，透过率如果过大，将影响单模振荡，高次模多，对锁模又是不利的，说明了在这里有个最佳匹配问题。

实验中，曾采用 $T=70\%$ 、 50% 、 45% 、 28% 等不同透过率。实验表明， $T=28\%$ ，TPF 很难拍下来。一般透过率应在 50% 以上。

4. 单脉冲的选出

锁模激光器输出的是一脉冲序列，采用选脉冲开关，可以选出其中的一个。通常，选脉冲开关由 KDP 或 KD^*P 晶体、起偏、检偏棱镜和激光触发火花隙组成。这类开关，由于元件多，损耗大，调整也复杂。其消光比大约是 $10^{3[4]}$ 或 $10^{4[5]}$ 量级。

我们采用双 45° 单块铌酸锂和激光触发火花隙作为选脉冲开关。图 9 是选脉冲开关的示意图。

锁模振荡器输出的是线偏振的一系列锁模

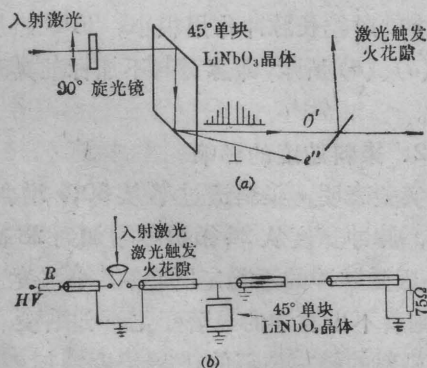


图 9

(a) 选脉冲开关示意图

(b) 激光触发火花隙与 $LiNbO_3$ 晶体连结图

脉冲，经腔外 90° 旋光板后*，其电场振动方向垂直纸面。铌酸锂上未加电压时，序列脉冲从 O' 方向射出，当在铌酸锂上与序列脉冲瞬时同步地加上一半波电压时，那么选出的脉冲从 e' 方向射出。我们用激光触发火花隙作为电压瞬时同步开关，把一个宽度约为 9 毫微秒的半波电压矩形脉冲加在铌酸锂上，从而保证只选出一个脉冲，并且有较大的调制深度。

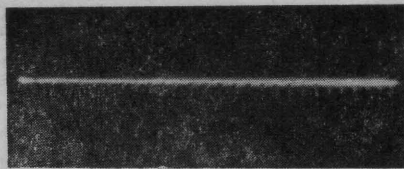
在火花球隙各项参数确定之后，通过改变击穿功率，达到从序列脉冲中在不同位置选出单脉冲。表 1 给出了实验参数及选脉冲的结果。图 10 是选脉冲照片。

表 1 选脉冲开关实验参数和结果

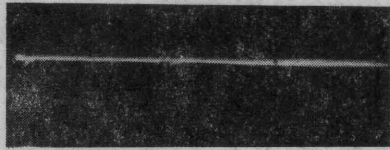
半波电压	5200~6000 伏	实验
	4500 伏	理论
调制深度 (电源电压)	14000~15400 伏	$\leq 50\%$
	11000~11800 伏	$> 75\%$
成形电缆	90 厘米	
传输电缆	80 厘米	
匹配电缆	50 米	(防反射用)
方波电压	~9 毫微秒宽	
电极间距	0.4 毫米	
球隙气压	12 公斤/厘米 ²	
充气气氛	75%	N_2
	25%	Ar
工作电压/自击穿电压	95%	
选出脉冲	1 个	
选出几率	$> 90\%$	
脉冲宽度	0.01~0.150 毫微秒	
脉冲能量	~1 毫焦耳	

我们用能量测量法和光电测量法，在我们选定的通光范围内测得此块铌酸锂的消光比为 1:3000。不论是那种方法，都是加两级 $\phi 20 \times 500$ 毫米的棒状放大器以后进行的。

* 旋光板不是必须的，无此板时，调整稍复杂些，须将晶体偏一小角度，对 e 光调制^[6]。



(a) 箭头指示的位置脉冲被选出



反冲干扰

(b) 箭头指示的是选出的单脉冲

图 10 选脉冲波形

铌酸锂的总体消光比较差,但是,若锁模激光脉冲光束口径小,选择应用其局部光学质量好的通光范围,消光比就可以提高上去。

用直径为 2 毫米的氩-氦激光作为探测光束,检验了不同晶体和同块晶体不同位置的消光比,得知各块晶体和同块晶体不同位置的消光比可以有很大差别,因此,有必要事先进行挑选和定位。

总之铌酸锂选脉冲开关,具有结构简单,调整方便,损耗小等优点。单块铌酸锂的消光比达 10^{-3} 量级。在脉冲功率密度为 $10^8 \sim 10^9$ 瓦/厘米²时,尚不见破坏。

5. 信噪比的测量

根据可饱和吸收体被动锁模的起伏理论^[7],在输出序列的脉冲间隔内,会有一定的背底存在。锁模脉冲与背底之间的信噪比,是鉴别锁模好坏的判据之一。同时,我们的选脉冲开关的开关时间约是 10 毫微秒,在 10 毫微秒内单脉冲和背底同时进入放大器级,进行放大,而背底的放大是有害的。因此,总体实验也十分需要知道信噪比的大小,以便进行总体设计。

我们采用跟 Dobé^[8]类似的方法来测量信噪比。图 11 是测量示意图。强流光电管 P_1 从第三级放大器斜端面取触发信号,使示波器触发。强流光电管 P_2 从 M_6 反射镜取被

测信号。进入 P_1 和 P_2 的信号,相对延迟 28 毫微秒。用三级 $\phi 20 \times 500$ 毫米钨玻璃放大器放大,增益大于 10^{-3} 。在延迟光路上,放置合适的衰减片 S ,使被测信号有合适的高度,量出扫描起点与脉冲信号起始点之间的距离 α 。衰减片取走后,被测信号脉冲的幅度远远超出示波器屏外。若背底强度经放大后,超过衰减片的衰减值,那么被测信号必提前发生,使 α 变小。如果背底强度不强,虽经放大,但仍不能和衰减片的衰减值相比较,那么 α 看不出变化。当时,我们只用了一块铌酸锂作选脉冲开关元件,它的消光比为 1:3000,当被测信噪比大于此值时,就会在扫描线中明显地出现铌酸锂开关元件的漏光脉冲信号。

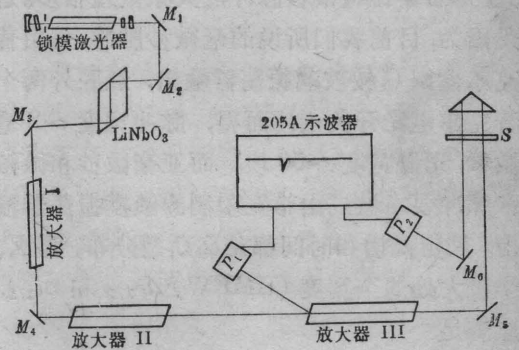


图 11 测量信噪比实验示意图

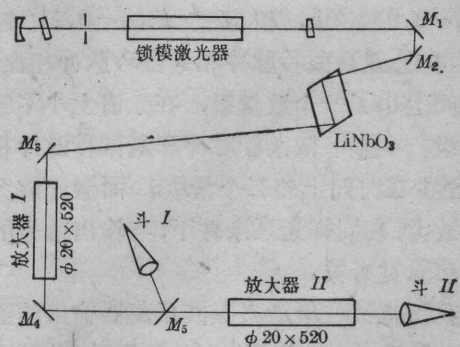


图 12 单脉冲放大实验示意图

从衰减片 S 的衰减值和测量距离 α , 得知我们的亚毫微秒锁模脉冲的信噪比约 3000:1, 在毫微秒范围内没有发现 α 变小。

由于接受器和示波器的联合响应时间为毫微秒量级,因此,我们所得的信噪比,是毫微秒以外的,至于毫微秒以内的情况,此法不能了解。而 TPF 法,由于在本实验中荧光管长度有限,也不能了解 300 微微秒以外的脉冲情况。只能结合其对比度的测量来判断锁模的质量。

6. 亚毫微秒和微微秒脉冲的放大

对于毫微秒 (2~30 毫微秒) 脉冲的放大,已有经验,但微微秒脉冲放大的经验不多,而亚毫微秒脉冲的放大,几乎没有什么经验。可是,亚毫微秒和微微秒级脉冲放大的情况,对这类脉宽的大功率激光系统的设计是极为重要的。

人们担心,亚毫微秒和微微秒脉冲的放大,是否会比毫微秒脉冲放大系数差很多。这是因为,目前我们所说的毫微秒脉冲,是由普克尔盒调 Q 钕玻璃振荡器输出,经腔外两个普克尔电光开关削波而得,脉冲宽度 ~2 毫微秒,光谱宽度 ~50 埃。而亚毫微秒和微微秒脉冲要求做到由带宽限制的锁模振荡器输出,假定光谱和时间都是高斯型分布,那么,半极大处的全宽度 (HMF_W) $\Delta\nu_{1/2}$ 和 $\Delta t_{1/2}$, 应满足

$$\Delta\nu_{1/2}\Delta t_{1/2}=0.44 \quad (2)$$

如果 $\Delta t_{1/2}=150$ 微微秒,由 (2) 式得 $\Delta\nu_{1/2}=2.94 \times 10^9$, 相应的 $\Delta\lambda_{1/2}=0.11$ 埃。由此可见,亚毫微秒脉冲和毫微秒脉冲相比,在时间上小了一个数量级,在光谱上小了三个量级。同样,微微秒脉冲和毫微秒脉冲相比,至少在时间上差二个量级。而激光放大器的放大,在同样光泵条件下,与输出信号的带宽和脉宽有关。

我们将钕玻璃染料锁模振荡器输出的亚毫微秒脉冲 (脉冲宽度 ~130 微微秒,单脉冲能量 ~1 毫焦耳) 作序列和单脉冲放大。将微微秒脉冲 (脉宽 ~10 微微秒,单脉冲能量 ~1 毫焦耳) 作单脉冲放大。图 12 是放大实验的示意图。

在铷酸锂上加恒定的半波电压,就得到序列脉冲放大。亚毫微秒脉冲的序列放大是在一级放大器下测得的。图 13 给出它们的放大增益曲线。

由图 13 看出,亚毫微秒和微微秒脉冲的放大倍数还是高的,达 14~20 倍,和同样光泵条件下的毫微秒脉冲放大倍数差不多。

我们认为,获得此结果的可能原因是:

(1) 钕玻璃的交叉弛豫时间很快,即脉冲在 $10^{-10} \sim 10^{-11}$ 秒时,仍然能及时将反转粒子补充进来。

(2) 是否还是毫微秒脉冲的放大? 因为对毫微秒范围内的锁模脉冲情况了解不充分,因此有必要进一步研究在毫微秒范围内的锁模脉冲情况。

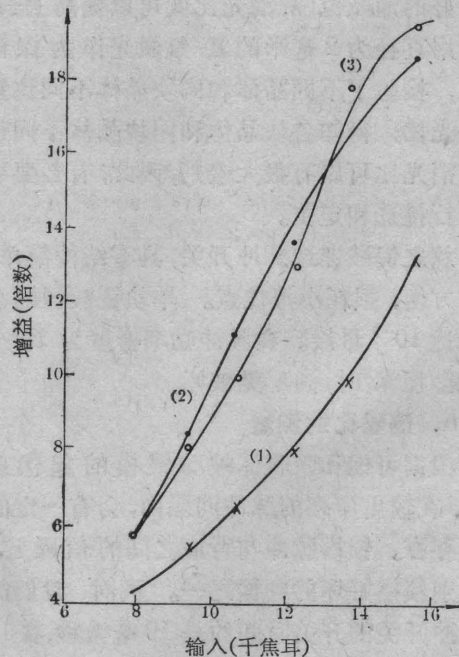


图 13 亚毫微秒、微微秒脉冲增益曲线

(1) 7-72-21 棒, 亚毫微秒序列脉冲; (2) 74-21 棒, 亚毫微秒单脉冲; (3) 74-21 棒, 微微秒单脉冲。× 亚毫微秒序列脉冲 ● 亚毫微秒单脉冲 ○ 微微秒单脉冲

7. 某些总体实验结果

图 14 是总体实验装置示意图。总体实验装置,基本上是脉宽为 2 毫微秒的单路大器件装置,仅把我们的锁模振荡器和选脉冲系

三、锁模振荡器的稳定性

可饱和吸收体被动锁模再现性差，主要表现为，每次发射的锁模脉冲序列的包络不一样，甚至出现双列或多列脉冲；每次发射的脉冲序列中每个脉冲的宽度也有所变化；每次发射的脉冲能量不同，脉冲的光滑性有区别，甚至有亚结构。

在实验性被动锁模激光器样机上做的一组实验结果列于表 2。实验连续了 12 次，其中脉冲序列波形好的有 9 次，不好的是指二列或鱼肚形。从表中看出，凡是波形不好的，能量均偏大，波形好的，能量变化为 $\pm 10\%$ 。脉冲宽度可分为两类，一类是 25 微微秒左右的，有 7 次，另一类是 39 微微秒左右的，在每一类之内，脉宽变化为 $\pm 10\%$ 。脉宽从一类到另一类跳跃式的变化，可能跟线状光谱结构有关，线状光谱的变化不可能是连续的，这样一来，脉宽的变化也不可能是连续变化的。表中的 TPF 对比度 K 是个参考值，是偏高的，测量误差较大。

表 2 一组相继发射的锁模脉冲数据

次序 No.	TPF 对比度 K	脉宽 τ_p (微微秒)	脉冲序列能量(格)	示波器波形记录
1	2.88	25.4	19	好
2	2.9	28.8	20	好
3	3.5	39	22	好
4	3.6	23.7	26	双列
5	3.08	25.4	19	好
6	2.82	23.7	19	好
7	2.95	39	24	好
8	3.08	40.9	29	双列
9	2.88	22	21	好
10	2.99	37.2	20	好
11	—	37.2	24	好
12	2.88	25.4	27.5	双列

被动锁模的不稳定性，是由染料锁模的机理决定的。被动锁模脉冲起源于噪声，脉冲方式工作的被动系统，没等脉冲达到稳态运转，增益已经耗尽，因此，最终的锁模脉冲

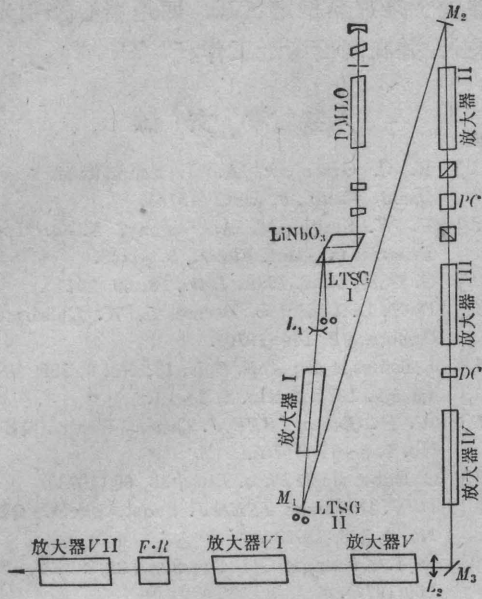


图 14 总体实验装置示意图

DMLO——染料锁模振荡器；LiNbO₃——铌酸锂选脉冲开关；LTSG I——选脉冲用激光触发火花隙；LTSG II——普克尔盒用激光触发火花隙；L₁——R=1 米发散透镜；L₂——R=10 米会聚透镜；PC——普克尔盒隔离开关；F·R——法拉第隔离器；M₁、M₂、M₃——平面反射镜；放大器 I~放大器 IV—— $\phi 20 \times 520$ 毫米；放大器 V—— $\phi 35 \times 520$ 毫米；放大器 VI、VII—— $\phi 40 \times 520$ 毫米；DC——染料盒

统代替原来的普克尔盒调 Q 振荡器和削波系统。

我们测量了第四级放大器的增益，在最佳延迟下，当输入信号为 0.4~0.5 焦耳时，输出 ~5 焦耳，增益达 10 倍，与原来的 2 毫微微秒脉冲放大时的增益差不多。

因铌酸锂选脉冲开关的隔离比(1:3000)还不够高，在第三级和第四级间用十一甲川蓝色素染料隔离，控制漏光和超辐射，进行总体打靶实验。分别用 10 微微秒和 ~130 微微秒脉冲进行了打 LiD 平面靶的实验。当用 10 微微秒脉宽时，总体输出为 15 焦耳，测得电子温度为 600 电子伏；用 ~130 微微秒脉宽时，总体输出为 21 焦耳，测得电子温度为 700 电子伏。器件运转正常，共作了 20 次打靶实验。

必然还包含有噪声的性质, 没有完全摆脱统计规律, 很好的再现性是不可能的。一般认为, 出现好的锁模的几率, 与饱和吸收体的弛豫时间有关, 脉冲长于染料的弛豫时间, 稳定性较好, 反之, 稳定性较差, 但是稳态锁模则不同^[9,10], 因此, 实现稳态锁模是提高稳定性的根本方法。

其次, 染料溶液的热效应, 也是影响锁模稳定性的很重要参数之一^[11]。因为激光与染料多次相互作用, 会使染料逐渐变质, 影响锁模, 所以流动染料应是保证稳定锁模很必要的条件。对于我们的器件, 工作6~10次, 染料流动更新一盒, 但是没有严格的界限。

为尽可能保持输出的稳定, 实验工作须注意下列几点, 一是避免来自腔内或腔外的有害反馈, 二是每次实验染料透过率要一样, 三是控制各次发射之间的时间间隔, 使激光

器处于某种热稳定状态, 四是精心控制光泵输入, 并在阈值附近工作。

参 考 文 献

- [1] R. C. Greenhow, A. J. Schmidt; *Advances in Quant. Electr.*, **2**, part2 (1974).
- [2] P. W. Smith, M. A. Duguay, E. Q. Ippen; *Progress in Quant. Electr.*, **3**, part2.
- [3] G. Dube; *Appl. Phys. Lett.*, **18**, 69 (1971).
- [4] D. V. D. Linde, O. Bernecked, W. Kaiser; *Opt. Commun.*, **2**, 149 (1970).
- [5] I. Soures *et al.*; *Appl. Opt.*, **13**, No. 9, 239 (1974).
- [6] 《激光》, 1975, **2**, No. 2, 8~19.
- [7] W. H. Glenn; *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-11**, No. 1, 8~17 (1975).
- [8] G. Dube; *Appl. Phys. Lett.*, **18**, 69 (1971).
- [9] D. V. D. Linde; *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-8**, No. 3, 328 (1972).
- [10] D. J. Kuizenga; *Opt. Commun.*, **22**, No. 2, 156~160(1977).
- [11] R. Wilbrandt, H. Weber; *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-11**, No. 5, 186 (1975).

He-Ne 激光治疗高血压疾病及其作用的初步探讨

应用输出功率1毫瓦、功率密度为 2.6×10^2 毫瓦/厘米²的He-Ne激光治疗仪, 对高血压患者进行了临床治疗, 并对其作用原理进行了初步探讨。因为人的血压调整是借对心脏活动与血管舒缩的控制来实现的, 血管主要受交感神经支配, 同时, 也受付交感神经的支配, 此外, 还有多种液体因素控制的。当外部刺激时, 由外周传入中枢后, 它可调整血压, 如刺激交感神经, 致使它兴奋, 心搏动力增加, 血管收缩, 使血压升高(若给予过量刺激, 也可使交感神经抑制); 如付交感神经兴奋, 心搏动力减弱, 血管舒张, 使血压降低, 其作用与交感神经相反。因此, 可以认为: He-Ne激光照射颈交感神经, 反会使血压上升; 同时, He-Ne激光可穿透组织仅10~15毫米的深度, 但颈交感神经与表皮的距离超过15毫米, 因此, 激光难于直接照射到它。

根据这一分析, 我们的治疗方法, 试用了照射颈动脉窦压力感受器, 颈内总动脉近旁的迷走神经-付交感神经(它与表皮的距离也较短), 此外, 又

陆续选用“人迎”、“涌泉”、颈部降压穴、耳前降压穴等四对穴位, 而且在照射前使用仪表来精确地确定穴位, 然后进行治疗。每次照射的部位数, 以当时血压即刻降低为度, 照射时间为3~5分钟, 有的穴位可照射10分钟。每个疗程7~10次, 接受医疗者共10人, 经1次照射见降压者9人, 第二次才降压者1人。最少的照射4次, 最多的照射30余次, 10人均有不同程度的疗效, 其中3人已基本痊愈。患者的病程10~17年的6人; 5年的3人; 新发现的1人。前6人均均为II-III期患者, 且伴有心脏病。

激光可直接刺激到真皮层中的神经末梢, 使神经冲动传递加快, 它所接受的刺激可能是电磁场刺激信号或受到光压的作用引起的, 也可能受二者同时的作用而引起的。激光也能刺激血管, 使之舒张或收缩, 引起血压变化, 这将涉及到血液动力学的问题。

(福建师范大学 孙秀贞)