

## 脉冲光压的产生及其应用尝试 (上)

朱连新 余畅和

(云南光学仪器厂设计研究所)

1975年8月,我们在激光腔中发现了光压现象。为了探索其应用价值,我们进行了实验。原理实验和应用尝试的结果都较令人满意。

The production of pulse light pressure and its applications

Zhu Lianxin, Yu Changhe

(Design Institute of Optical Instrument Factory of Yunnan)

Abstract

We found the pressure phenomenon of pulse light in a laser cavity in August 1975. In order to explore its applicable significance, we have made some experiments and got more satisfactory results on the principle and applications.

### 一、前 言

1975年8月,我们在测试激光腔内的温度时,发现了脉冲式的光压现象。如图1所示。

每当氙灯发光的一瞬间,温度计的液柱都要脉冲式地向上跃升一个高度 $H$ ,并随氙灯闪光的消逝而很快地恢复到原高度,然后,液柱按常规随温度的增加而缓慢上升。为了探索这种脉冲光压的应用价值,于1979年6月起,我们进行了大量的原理实验和应用尝试工作。

从波动论来看,光波是一种电磁波。由电动力学知,电磁波具有电磁动量 $[1]^{(2)}$ 。另一方面,物质是由原子或分子组成的。物体表面层原子或分子的外壳层电子(即金属键型、离子键型、共价键型等结构的外围电子)在无外场作用的情况下,它们的运动对

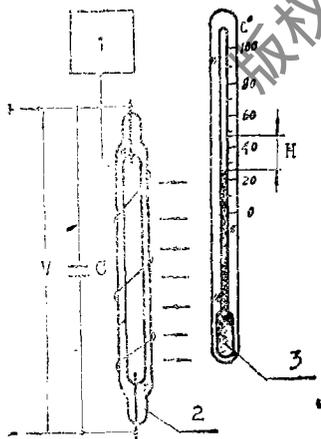


图1 氙灯脉冲光压导致温度计的液柱跃升一个高度 $H$ 。1. 高压触发器;2. 氙灯;3. 温度计

整个物体表面而言是无规律的，在表面的各个方向上，电流的统计平均值都为零。当具有电磁动量的光波传到物体表面时，被照射表面里的原子或分子的外围电子受光波电矢量（即电场强度 $E$ ）的作用而产生和这电矢量方向相同的电流（传导电流），光波的磁矢量（即磁感应强度 $B$ ）按照安培定律作用于这个电流上，其作用的方向与光波的传播方向相同。因此，入射光和物体反射（或吸收的）光之间有质动力的相互作用，把光波的电磁动量传给了物体而形成对物体表面的压力<sup>[3]</sup>。

如果取面元 $d\sigma$ 的方向与波矢量 $k$ 的方向一致，则单位时间内流过 $d\sigma$ 的动量为

$$dp = \frac{1}{8\pi c} d\sigma (E^2 + B^2) \left(\frac{k}{k}\right) \quad (1)$$

式中， $c$ 是光速， $k$ 与波的角频率 $\omega$ 的关系为 $\omega/c$ 。从这个公式看出，如果某物体的表面垂直于光波前进的方向，并且将光波完全吸收的话，则它每单位面积上将受到光的压力为（如图2所示）。

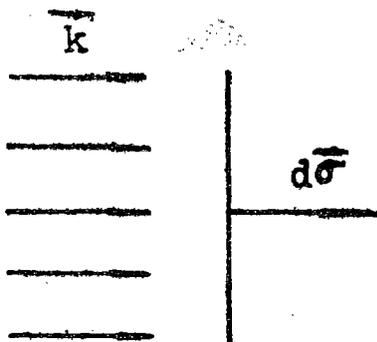


图2 光波对物体表面的压力

$$df = \frac{1}{8\pi c} d\sigma (E^2 + B^2) \left(\frac{k}{k}\right) \quad (2)$$

如果物体的反射系数 $\rho$ 不为零，则物体表面在单位时间单位面积上所受到的压力是全吸收的 $(1 + \rho)$ 倍。如果物体表面成全反射，即 $\rho = 1$ ，则其压力为全吸收的2倍。因此，可将(2)式改写成如下的普遍形式<sup>[4]</sup>

$$df = (1 + \rho) \frac{1}{8\pi c} d\sigma (E^2 + B^2) \left(\frac{k}{k}\right) \quad (3)$$

从光子理论的观点来看，光压是光子把它的动量传给物体的吸收壁或反射壁的结果。我们知道，原子核外的电子，是在核外的一些特定的能级轨道上围绕着核运动。当电子从一个能级按跃迁准则跃迁到另一个能级时，需要吸收能量（从低能态跃迁到高能态）或释放能量（从高能态跃迁到低能态）；所吸收的或释放的能量恰等于这两个能级间的能量差。当具有某能量的光子入射到物体表面，而其能量又恰等于原子某两能级间的能量差时，电子便吸收这个光子的能量而从低能态跃迁到高能态。然后，电子放出与入射光的频率相同的光子（形成反射光）或以荧光辐射的形式释放能量而回到低能态。这样，入射的光子就把其动量传给物体表面的原子而形成对该物体表面的压力<sup>[5,6,7]</sup>。

设光是频率为 $\nu$ 的单色光，则每个光子具有动量为

$$p = h\nu/c \quad (4)$$

式中， $h$ 是普朗克常数， $c$ 是光速。

如果物体的壁上每平方厘米面积在每秒钟内有 $N$ 个光子正入射时，则这 $N$ 个光子传给该单位表面的动量，亦即作用在此表面上的压力

$$P = (1 + \rho)N_p = (1 + \rho)Nh\nu/c \quad (5)$$

式中,  $\rho$ 是物体壁的反射系数。如果物体壁是完全吸收体, 即 $\rho = 0$ , 则 $P = Nh\nu/c$ , 如果壁是完全反射体, 即 $\rho = 1$ , 则 $P = 2Nh\nu/c$ 。这些结果与波动论完全一致。

## 二、原理试验

### 1. 试验装置

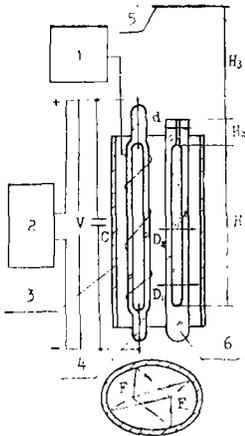


图3 原理实验装置简图。1. 高压触发器; 2. 整流充电系统; 3. 椭圆聚光腔; 4. 氙灯; 5. 屏; 6. 试验管

图3所示的是实验装置简图。图中有剖面斜线者是一个椭圆筒式聚光腔(成竖直放置)。腔的横截面椭圆的长半轴 $a = 18\text{mm}$ , 短半轴 $b = 16.35\text{mm}$ , 腔长 $64\text{mm}$ 。腔的两个端面封闭, 在各端面的两个焦点上做成通孔。腔的内表面全部镀金, 以便提高内表面的反射率。在椭圆筒腔的一个焦轴 $F_1$ 上放置一支高重复频率的氙灯, 其尺寸为 $\phi 8.5 \times 60\text{mm}$ 。氙灯的两个电极与激光电容器 $C$ 连接, 由整流充电系统提供氙灯的输入能量。在氙灯的两个电极之间绕置一高压触发丝, 并与高压触发器连接。在椭圆腔的另一个焦轴 $F_2$ 上放置我们需要试验的液柱。试管内径之所以要设计成有大小区别的 $D_2$ 和 $d$ , 一方面是根据帕斯卡定律<sup>[8]</sup>, 另一方面是为了遏制 $H_2$ 部分液柱在光压产生时对 $H_1$ 部分的倒流(见后面的讨论)。  $H_2$ 部分之所以做得这样短, 是

为了减少液柱在跃升过程中管壁对它的摩擦。为了方便测量液柱跃升的高度, 在液柱上方放置一个可以上下移动的垂直于焦轴 $F_2$ 的屏(即 $H_3$ 可变)。当电压 $V$ 加到氙灯的着火电压以上, 且万伏以上的高压通到高压触发丝时, 氙灯导通, 发出强烈的闪光。按光学理论, 椭圆腔满足光传播的稳定条件<sup>[9,10]</sup>, 因而从焦轴 $F_1$ 上发出的氙灯脉冲光, 则汇聚于 $F_2$ 的液柱面上, 使液柱面受到了一个指向液柱轴心的光压力, 压缩被光照射部分 $H_1$ 的液柱, 由于液体的压缩性小, 便产生一个高度 $H_3$ 的跃升。

### 2. 试验结果及其讨论

(A) 常温试验 a. 对几种非金属液体的光压试验。在做试验前先备置4种液体: A液——水加黑色染料; B液——水加红色染料; C液——水加蓝色染料; D液——酒精加红色染料。

在图3中的焦轴 $F_2$ 上分别放置二根注有编号而且下端封闭的3C-11玻璃管(其尺寸为: 1号管, 外径 $D_1 = 6\text{mm}$ , 内径 $D_2 = 4\text{mm}$ ,  $d = 1\text{mm}$ , 高 $H_1 = 59\text{mm}$ ,  $H_2 = 19\text{mm}$ ; 2号管, 除内径 $D_2 = 2\text{mm}$ 外, 其余尺寸与1号管相同), 分别注满A、B、C、D 4种液体, 在 $V = 900\text{V}$ 、 $C = 300\mu\text{F}$ 、 $T = 20^\circ\text{C}$ 的条件下进行试验。跃升高度的测定是反复调整屏的位置, 使其调到比液体上升到下落的转折点稍低的位置, 液体打到屏上, 出现一个斑点, 这时我们测量 $H_3$ , 它为液体跃升的高度。从我们的试验来看, 现象比较强烈, 致使液柱在跃升过程中, 上升部分的液体在刚离开上管口时就与下部分液体断开, 形成一个液团向上抛射, 且不再回到试管内。因此, 我们用精度为 $\pm 0.1\text{mg}$ 的瑞士分析天平测定出每次喷射出来的液体重量。试验结

果见表1。

表1

液体媒质	试管编号		跃升高度 (cm)		跃升部分液体的 平均重量 (g)
			平均值	最高值	
A液	1	号	205	211	0.0108
	2	号	239	248	0.0116
B液	1	号	194	213	0.0063
	2	号	210	225	0.0102
C液	1	号	299	305	0.0193
	2	号	333	335	0.0205
D液	1	号	191	213	0.0125
	2	号	286	297	0.0234

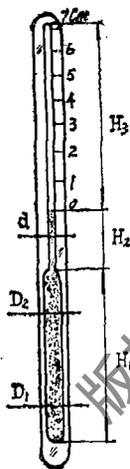


图4 水银试管筒图

表2

液体媒质	试管编号	H (mm)	H <sub>T</sub> (mm)	t (s)
水 银	1 号	36.2	0.43	63
	2 号	47.3	0.27	62.5

b. 对水银的光压试验 在图3中的焦轴F<sub>2</sub>上分别放置二根注有编号而形状如图4所示的玻璃管。它们的尺寸为：1号管，外径D<sub>1</sub> = 6mm，内径D<sub>2</sub> = 4mm、d = 1mm，高H<sub>1</sub> = 58mm、H<sub>2</sub> = 22mm、H<sub>3</sub> = 7cm(注有标尺)；2号管，除内径D<sub>2</sub> = 2mm外，其余尺寸与1号管相同。将水银注入试管内达H<sub>2</sub>高度为止，并抽去水银上面的空气到10<sup>-6</sup>mmHg，然后封闭。为了使水银柱在跃升过程中保持连续，我们在V = 800V、C = 100μF的条件下进行试验。试验结果见表2。

在表2中，H是水银柱受光压而跃升的平均高度，H<sub>T</sub>是氙灯闪光消逝、水银柱回到原高度后水银受温度的影响而缓慢上升的平均高度，t是水银柱升高H<sub>T</sub>所需要的平均时间。

(B) 低温 (1~4℃) 试验 在可调温的低温室里，用a试验中所用的2号管注满结冰温度仍为0℃的A液，置于图3中的焦轴F<sub>2</sub>上。用一支读数精度为1/10℃，上限为+50℃的标准温

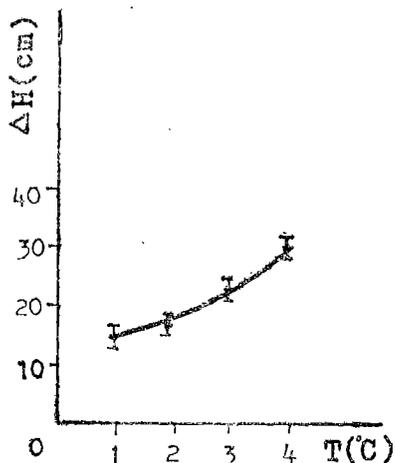


图5 在1~4℃低温下液柱受光压后跃升高度  $\Delta H$  的曲线图

度计监视温度，在  $V = 900V$ 、 $C = 300\mu F$ 、 $T = 1 \sim 4^\circ C$  的条件下进行试验。试验结果见图5。

(C) 几个对比试验 1. 液柱加挡光物与未加挡光物的对比试验。取b试验中的1号水银管(如图4所示)，将液柱的  $H_1$  部分用黑纸遮盖住，再置于图3中的焦轴  $F_2$  上，试验条件与b试验相同。以每分钟一次的频率让氙灯闪光10次，然后去掉  $H_1$  部分的黑纸，以相同的频率再让氙灯闪光10次。结果发现氙灯在前10次闪光时，水银柱不跃升，而在后10次闪光时，每次闪光，水银柱都跃升，跃升的平均高度与b试验中的平均值36.2mm相近。说明液柱跃升不是光以外的其他场的作用。

2. 液柱偏离焦轴与未偏离焦轴的对比试验。将上述1号水银管置于图3中的焦轴  $F_2$  上，试验条件和氙灯的工作频率与试验1相同。先让氙灯闪光10次，然后让液柱的  $H_1$  部分在垂直于腔正投影椭圆长轴的方向上偏离焦轴  $F_2$ ，使其与轴  $F_2$  斜交，交角  $\alpha$  约为  $6^\circ$ ，如图6所示。图中直线  $F_2 F_2'$  即是焦轴  $F_2$ ， $ZZ$  为水银柱的轴线。  $H_1$  的上端与氙灯的上电极要对齐。让氙灯闪光10次。最后使水银柱回到焦轴  $F_2$  上，再让氙灯闪光10次。结果发现，氙灯在前10次和最后10次闪光时，水银柱都跃升，跃升平均高度与b试验中的平均值36.2mm也相近，唯独中间10次闪光，水银柱都不跃升。说明由于液柱偏离焦轴  $F_2$  后，氙灯光压没有径向地指向液柱轴心而被分散了，故柱液不跃升。

3. 两种不同管形液柱的对比试验。取A、B两种不同管形的玻璃管，如图7所示。图中的A管即是a试验中的1号管。图中B管与A管的不同之处在于：B管的  $D_2 = d$ ，即为直管。而A管的  $D_2 > d$  (见对1号管尺寸叙述)。其余，A、B两管  $D_1$  相同， $D_2$  相同，液柱的高度也相同。氙灯的输入能量与a试验相同，工作频率为每分钟1次。液体使用a试验中的B液。

将A、B两管注满B液，分别置于图3中的焦轴  $F_2$  上，各让氙灯闪光10次。结果发现A管在氙灯闪光时，每次闪光都使液柱跃升，跃升的平均高度与表1中1号管的数据相近。而B管呢？氙灯10次闪光都没有使液柱跃升。

为什么氙灯脉冲光未使B管中的液柱跃升呢？我们经分析后认为这是液柱的倒流现象引

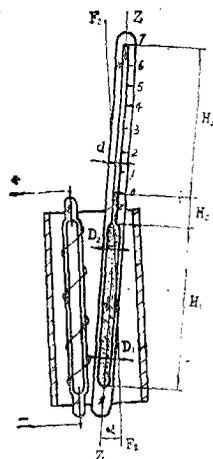


图6 水银管偏离焦轴  $F_2$  的示意图

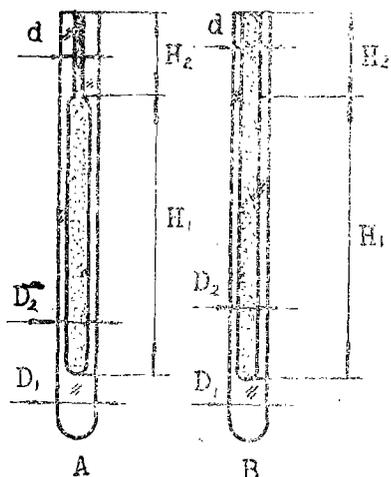


图7 两种管形示意图

率与试验3相同，让氙灯闪光10次，然后在液柱底部置一个直径为1~1.5mm的气泡(如图8所示)，再让氙灯闪光10次。结果发现，在氙灯闪光时，液柱底部未置气泡者，液柱跃升，而置气泡者，液柱不跃升。将此管换注a试验中的A液，重复上述试验，结果仍然相同。分析后者受光压后不跃升的原因，是因为气泡的压缩性大，当光压作用于H<sub>1</sub>部分液柱时，此压力立即传给气泡，并压缩气泡，使光压受到缓冲，致使液柱不跃升。我们减小气泡的直径到1mm以下，重做试验，结果发现又有跃升现象，但跃升高度比未置气泡的低很多，喷射出来的液体也很少。这是由于气泡体积小，当其被压缩到最大限度时，尚有部分光压未被缓冲，因而液柱出现很小的跃升。

上面的几种试验，从1979年6月至今，经过了多次的重复。从每次的试验来看，都有下述6个特点表现出来：①压力服从帕斯卡定律。从表1可以看出，1号管和2号管除内径D<sub>2</sub>不同外，其余尺寸都相同，但由于D<sub>2</sub>不同，使所试验的每种液体的跃升高度和喷射出来的液量都有非常明显的差异。D<sub>2</sub>减小，即H<sub>1</sub>部分的液柱面减少，单位面积上的压力增加，跃升高度和喷射的液量就增加。D<sub>2</sub>增大，情况则相反，跃升高度和喷射出来的液量就减少。从表2中亦可看出这个特点；②如果D<sub>2</sub>和d相等，就有明显的倒流现象呈现。特别是当试管内径增加到4mm时，其现象非常显著。例如，从对比试验3就可看出这一现象。在对比试验3中，A、B两管的D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>、H<sub>1</sub>、H<sub>2</sub>都相等，只是d不相等，A管的d=1mm，B管的d=4mm但仅此不同，试验结果就完全不同。如果用比重较大的水银做试验，倒流现象尤为突出。例如，我们用一根D<sub>1</sub>=3mm、D<sub>2</sub>=3.5mm、d=1.9mm、H<sub>1</sub>=58mm、H<sub>2</sub>=22mm的水银管

起的：当液柱的H<sub>1</sub>部分受到光压力时，该部分液柱的直径D'<sub>2</sub>变小，在液柱和管壁之间瞬时出现一个真空区域。这时如果d和管内径D<sub>2</sub>相等，而且H<sub>2</sub>部分又未受到指向轴心的光压力的话，那么，H<sub>2</sub>部分液柱靠近管壁的液体由于自身的重量和压强差的关系，就要向下流入真空区域。当H<sub>1</sub>部分在光压作用下向上跃升的液体与H<sub>2</sub>部分往下倒流的液体，在数量上达到基本平衡时，就观察不到液柱向上跃升现象。

4. 液柱底部置气泡与未置气泡的对比试验。取a试验中的1号管注满B液，置于图3中的焦轴F<sub>2</sub>上。氙灯的输入能量和工作频

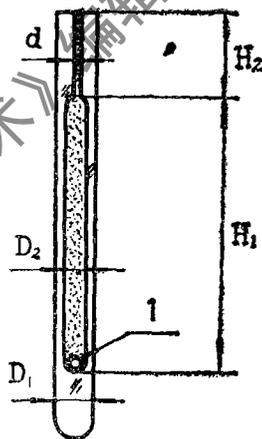


图8 置有气泡的液柱示意图。1. 气泡

(管形见图4)做试验,  $D_2$  与  $d$  只差 1.6mm, 在氙灯闪光时, 液柱跃升 25mm。但如果用  $D_2 = d$  的直管做试验时, 在其他尺寸不变的情况下, 即使用  $D_2 = d = 1\text{mm}$  的水银管做试验, 液柱的跃升高度也为零。如果从液体的热膨胀、热蒸发、热致冲击波和微气泡来看, 就不应产生这个倒流现象, 因为从原理分析, 这四者都不会引起上述的那个真空区域的出现, 因此不应产生倒流现象; ③如果液柱偏离焦轴  $F_2$  一个较小角度, 液柱就不跃升, 原因已在前面的对比试验 2 中提及了。虽然液柱偏离焦轴  $F_2$ , 但氙灯光经过腔壁多次反射, 大部分还是会被液柱吸收, 如果热膨胀、热蒸发、热致冲击波和微气泡起作用, 那么液柱应该跃升, 但情况确相反, 说明液柱跃升主要由光压引起; ④如果液柱底部置一个气泡, 液柱就不跃升。这个现象在对比试验 4 中已作了分析。如果是热膨胀等四者在起作用, 那么液柱应该跃升, 但结果是如此相反, 说明这四者的影响很小。如果液柱跃升是氙灯强电流产生的场引起的, 那么也应使液柱跃升, 但情况正相反, 说明强电流产生的场对液柱的影响也很小, 并且对比试验 1 已说明了强电流场和其他场对液柱没有影响或影响甚微。这也说明光压对液柱在起主要作用; ⑤用 a 试验中所用的 A 液在  $1\sim 4^\circ\text{C}$  的低温下作试验, 结果是液柱仍然向上跃升。我们所用的 A 液, 加入黑色染料后, 浓度为 0.49%, 经试验, 它的结冰温度仍在  $0^\circ\text{C}$ , 说明微量染料的加入并没有改变水的主要物理特性。按水的物理特性来看, 它的膨胀系数  $\beta$  在  $4^\circ\text{C}$  以上时为正值, 在  $4^\circ\text{C}$  时为零, 在  $4^\circ\text{C}$  以下时为负值。如果说氙灯脉冲光对液柱的瞬间作用是热效应, 那么, 液柱在  $4^\circ\text{C}$  以下受热时应该收缩而不应该向上跃升。但试验结果正与此相反(见图 5), 这说明氙灯脉冲光对液柱的热效应很弱; ⑥液柱在氙灯脉冲光的作用下成喷射状地很快向上跃升, 并随闪光的消逝而很快地恢复到原高度。然后, 液柱才随温度的增加而按一般规律缓慢上升。这个现象在 b 试验的表 2 中可以看出, 它也说明了氙灯脉冲光对液柱的瞬时热效应很弱。从上述六个特点看出, 氙灯脉冲光对液柱的作用主要是光压力。一些研究者在研究脉冲激光的水声效应中, 提出了热声模型或微气泡模型<sup>[11]</sup>, 并以此来模拟高能粒子的水声效应。按热声模型, 脉冲光射入水中后, 加热水而使其很快膨胀, 产生一个膨胀压力波。在  $4^\circ\text{C}$  以下,  $\beta$  为负值, 水被加热而收缩。按微气泡模型, 脉冲光射入水中后, 使水很快产生一些微气泡, 体积膨胀, 产生一个压力波。但从我们的试验来看, 很难用这两种模型

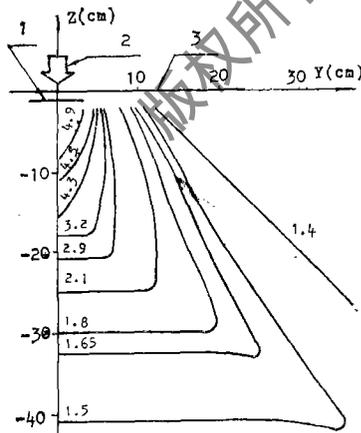


图 9 在水中加遮光透声膜的情况下, 31.5kHz 的场分布。1. 膜; 2. 入射光束; 3. 水面

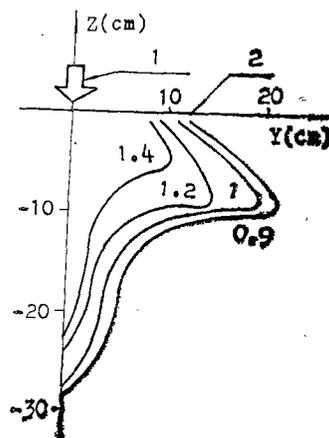


图 10 在水中未加遮光透声膜的情况下, 31.5kHz 的场分布。1. 入射激光束; 2. 水面

来解释。就我们在试验中观察到的六个特点来看，要想利用这两个模型来解释它们，都会遇到困难。1979年10月至1980年1月，我们和中国科学院高能物理所合作进行了脉冲激光水声效应试验（即用遮光透声膜研究激光的水声效应），所测得的声场如图9和图10所示。图中，入射激光束的直径为5cm，它是波长为 $1.06\mu\text{m}$ 的脉冲激光。遮光透声膜是经抛光镀金反射率很高的铜箔，置于水面下1cm处。图中曲线是测得的等压线。从这两图分析，这个压力场主要由光压引起。它对我们的脉冲光压问题是一个较好的验证。（待续）

· 简 讯 ·

### 国内首次研制成功重量不到1kg的微型激光测距机

西南技术物理所在国内首次研制成功重量不到1kg的微型激光测距机。该机采用了低阈值双掺杂（Ce, Nd）：YAG激光器；高效率激光充电电源；整机组件化设计等先进技术。该机体积小、重量轻，其测距能力、精度和显示功能与手持式（2kg左右）固体激光测距机相当，其主要技术性能：

测距范围：在中等能见度条件下，80~12000m；

测距精度： $\pm 5\text{m}$ ；

测距重复频率：16次/分~20次/分；

激光器束散角： $0.8\text{mrad}$ ；

瞄准视场（单目式）： $7^\circ$ ；

视放大率： $7\times$ ；

具有距离选通、满电压、欠电压指示和超程、无激光、超万米等显示功能；

重量（含电池）： $< 850\text{g}$ ；

体积（不含目镜）： $130 \times 100 \times 50\text{mm}^3$ ；

一次充电工作500次左右。

该机的研制成功，使我国脉冲激光测距机的系列，增添了一种新型的机种。

（本刊通讯员 供稿）

· 简 讯 ·

### 西南技术物理所重复频率风冷激光器研制成功

西南技术物理所采用本所研制的耐高温、低阈值、高效率的双掺YAG晶体，在对散热、泵浦效率和染料Q开关进行精心计算、设计和改进的基础上，突破技术难关，成功地研制出国内第一台以10pps频率工作的风冷激光器，并顺利地通过了50万次寿命试验和环境温度为 $50^\circ\text{C}$ 的高温运转试验。重复频率风冷激光器在外军的各种地对空、空对空的激光测距系统中被广泛采用。

（本刊通讯员 供稿）