

激光器的泵浦灯

提要 本文主要论述四种类型的激光器泵浦源（脉冲灯、弧光灯、白炽灯和焰火灯）的技术现状和应用情况。指出了这些泵浦灯的优缺点。

目前，激光器可以用很多种方法来泵浦，例如灯的辐射、太阳光的辐射、爆炸丝的辐射、惰性气体中的击波发光、等离子体箍缩发光、电子激发发光等等。在这些方法中，要数泵浦灯最有成效，也是最先应用的。这一方法之所以受到重视，原因有两个：第一是它的制作容易；第二，除了焰火灯以外，所有类型的泵浦灯都能在必要的时间内多次重复或连续工作。这些优点是很有价值的。而这种光泵方法也有它不足的地方，主要在于它的泵浦效率很低，对于大多数脉冲泵浦激光器来说，这种效率为 $\sim 1\%$ ，而对应用于连续工作的弧光灯和白炽灯来说，这种效率更低。与此相反，在刚才列举的几种不是用灯泵浦的方法中，有些方法却能得到很高的效率，例如半导体激光器的效率就能达 50% 以上。

在第一次实验的激光装置中应用的就是脉冲灯，这类泵浦源在最近几年中有更广泛的应用。配上了这种脉冲灯的各种不同结构的激光器能在自由振荡状态下工作（这种状态产生单个或周期性的闪光），也能在Q调制状态下工作。目前，这种脉冲灯能用来泵浦固体、液体及蒸汽状的工作物质。在脉冲激光器运转不久即制成了连续工作的固体激光器，这种激光器用弧光灯和碘白炽灯来泵浦。最近，又成功地用焰火灯泵浦了脉冲激光器。这样，激光器到目前为止就有了四种泵浦灯。

（一）脉冲灯

在И. С. Мармак^[1]、H. Edgerton^[2,3]、J. G. Edwards^[4]等人的文章中，对脉冲灯已经作了详细的介绍。早在四十年前就出现了第一支脉冲灯，这时正是揭开各种条件下脉冲放电中出现的各种现象的时候。这些年来，对灯进行了很多改进并增加了不少新品种。

目前，灯的外壳多半是用石英玻璃制成的，叫石英脉冲灯，但也可以用派勒克斯玻璃制成，叫玻璃脉冲灯。对于这两种灯来说，最理想的单位工作负载，也就是输入每一立方厘米等离子体中的放电能量焦耳数（焦耳/厘米³）应该是既能保证最大的辐射，又能忍受住一定的闪光次数而不使光能有明显的损失。

单位工作负载值的大小取决于灯的结构、尺寸和工作状态。在这一方面，玻璃脉冲灯要让位于石英灯，后者具有更高的发光强度。因此，在最初的固体激光器件中，应用的只是石英脉冲灯。用很薄的带状铝箔真空封接在石英灯的芯柱中作为电流引出线^[1]。但是，由于第一次实验样品的振荡阈值很高，因此对灯的单位工作负载也要求很高，致使它们时常在闪光时遭到破坏。

研究损坏的原因后得知，这种情况多半是由于焊在石英内的箔被部分熔化引起的，因为铝箔在放电电路中形成了一定的欧姆电

阻，进入灯内的一部分能量也落到钼箔上。有时，这一小部分能量足以熔化钼箔的某一部分，由此破坏了石英的完整性甚至导致整个灯的爆炸事故。当然，有时在放电时灯不一定爆炸，但它们的钼箔电极却因为熔化而失去了它的导电性。这样，在往后的工作中此种灯就成为不适用的了。

由于箔灯的不足而促使人们去研究新型的脉冲灯，创造了较之先进的帽式结构^[5,6]。在这种新结构中，石英管的两头真空封接在金属帽内，金属帽也充当外接头、电流引线和工作电极的载体。金属帽的电阻是微不足道的，它不会承担很大的能量，但同时却能支持相当大的电流负荷。然而，在金属帽的壁和石英管壁粘合的地方，只有在温度不超过 150°C 时才能保持它固有的性质。因此，

帽式结构又在温度稳定性上较之连续工作弧光灯及白炽碘灯来欠缺了一些，这对于那些要求重复闪光的泵浦源来说，就显得不足。在这一点上，它又比钼箔灯稍次了一点。

激光器的泵浦源大多数是各种类型的石英管灯。虽然有时也采用 II 型结构的闪光灯，但一般都是采用直管或螺旋型石英灯。对于激光器来说，螺旋形闪光灯是一种很方便的光源，因为它完全不需要专门的光学聚焦，振荡棒就直接放在螺旋形中，并随便就可以把它固定下来。但这样的一种配置也不是一种最理想的光学系统。最有效的要算是直管式泵浦灯，它可以与振荡棒并行安置在诸如椭圆形的聚光腔内。直管灯一般最常见的尺寸是：两电极间距离 40 毫米~几米，灯的内径 2~30 毫米(见图 1)。螺旋形石英灯

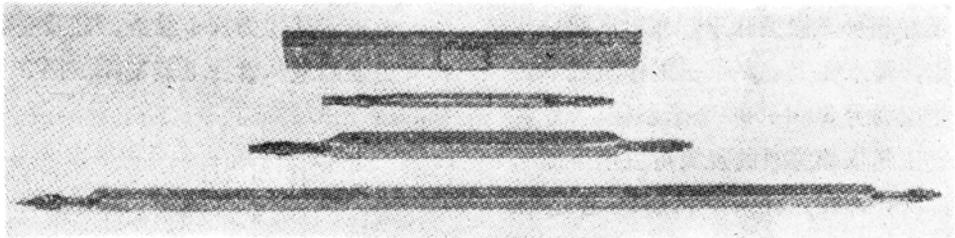


图 1 三支帽式结构的直管脉冲灯。

也可以有这样的内径(管本身)，匝数一般不超过 6，每一匝之间的间隙尽量小些。螺旋内径的大小要看振荡棒的情况，一般不小于 20 毫米，也不大于 60 毫米(见图 2)。从工艺学的角度出发，管的内径应该比螺旋的内径要小得多(见图 2)。

脉冲灯中一般充以氙气，因为此种气体的电离电势低，使它比其它惰性气体有更高的光能量密度。

为了得到脉冲灯辐射的高亮度，必须在管内增加气压和输入功率，但是后者又受到管壁材料强度的限止。因此，对于上述尺寸

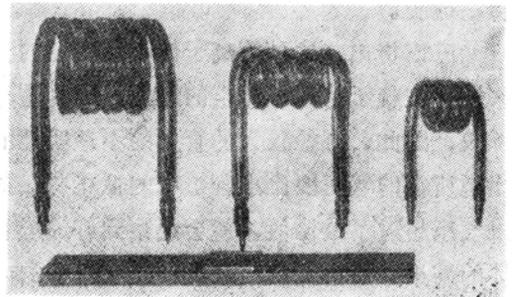


图 2 三支帽式结构的螺旋脉冲灯(左边两支五匝，右边那支四匝)。

的石英脉冲灯已作了很多实验，选定了它们的单位工作负载，保证能闪光几千次而不使辐射强度有多大降落。对于帽式灯在平均闪

光持续时间为~1 毫秒时，此种灯的单位工作负载一般为 100~150 焦耳/厘米³。在这种负载下灯的辐射是很完整的，亮度温度在 1.0~1.8×10⁴K。对于小尺寸的灯（例如 ИФП-400），输出光能在 4,000~9,000 埃范围内约为 25%。输出光能不仅与放电状态有关，而且也与灯的结构和尺寸有关：随着灯管截面的增加在 4,000~9,000 埃范围内光能输出的比例也会增加^[7]。对于一般的石英管灯这种光能输出约为 50%，而对于 ИФП-15,000，却为 52%^[10]。

大家知道，当惰性气体的气压很低时，脉冲灯的辐射强度随着气压的增加而增加，一直达到气压的最佳值为止。到了这个最佳数值，如果再加大气压，辐射强度仍保持在最佳值而不再上升。随着单位工作负载的增加，即使在低压下辐射强度也不再依赖于气压甚至正好相反。假设脉冲灯在单次脉冲状态下工作，那末在上述高单位工作负载下，灯的最佳压力为 300—600 毫米汞柱。辐射强度与气压无依赖关系的现象可以用下面的理由来说明，即在这种条件下的放电过程中，整个管子都充满了等离子体，这种等离子体使黄红——红外光谱区域的本征辐射变得不透明。

应该指出，这种等离子体不透明性的到来还得依赖于等离子体层的厚度。因为这个缘故，因此，直径较大的管中的不透明性的出现所需的气压要比小管子中的低一些。如果气压超过了最佳值，就会观察到好的或者坏的结果。所谓好的结果，即是在灯管的内壁表面上的深褐色薄膜减少，这种薄膜是由电极的粒子溅射和石英管内层的硅及硅的氧化物蒸发所造成的。所谓坏的结果，即是放电时气体冲击波的功率增加，从而提高了爆炸的可能性。

在单位工作负载不变的情况下，如果灯内的氙气没有充到应有的气压，那末光通量就会降低。放电等离子体具有透明性时其光通量值就依赖于气压。与此同时，灯的管壁很快会被深褐色薄膜所覆盖而丧失了自己的透明性。

可以这样假设，如果增加灯管的气压而使脉冲压力增高，提高了管壁爆炸的可能性的话，则如果降低气压，就会使这种可能性减小了。

但是我们的实验却推翻了这种假设。事实上，如果降低气压超过了一定的极限，也会提高爆炸的可能性。看来，这里有两个原因在作怪：第一，低气压时，放电过程中就会增强电流强度，其结果就在放电沟道到达管壁的瞬时提高了热冲击；第二，石英管内减少气体后，放电时的气压脉冲当然也会减小，但也就是因为这个缘故，硅及它的化合物就更强烈地从管壁上蒸发掉。图 3 示出了

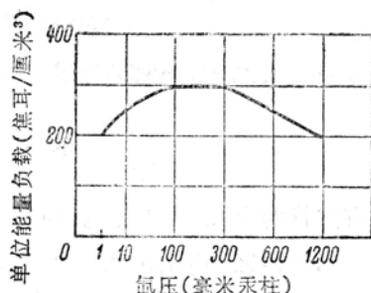


图 3 引起脉冲灯爆炸的单位能量负载的极限值同灯内氙压的关系。

引起灯爆炸的单位能量负载的极限值同氙压的关系（氙气压力的变化范围很大，从 1 毫米汞柱到 1,200 毫米汞柱）。每次闪光的平均持续时间为 40 毫秒。曲线是根据箔灯画出来的，这种箔灯的两电极间相距 50 毫米，灯管的内径为 7 毫米。帽式灯在图中所示的负载和气压下是不会爆炸的。

典型的脉冲灯的爆炸稳定性还和它们的馈电方式有关系。这时，为了寻找灯的极限负载，实际上应用了两个经验公式。第一个公式是在灯的电路中没有电感或比较少的情况下使用的：

$$\frac{CV^4}{L^3} = K,$$

式中， C ——电容， V ——电压， $L \geq 100$ 毫米——灯两电极间的距离， K ——常数，为 $4d^2$ 微法·千伏⁴·厘米⁻³ (d ——灯管的外径， $0.1 < d < 1.2$ 厘米)。常数 K 对于每一种灯实际上都是要测定的。上式中， CV^4 的极限允许值称为“负载因素”。

当灯的电路中存在电感时，第二个公式是比较通用的：

$$A^2 = KT,$$

式中， A ——单次闪光的极限值 (这次闪光使灯遭受破坏)， T ——闪光的持续时间， K ——依赖于灯的结构和尺寸的常数。大家知道， A 的大小可以用下面的公式来计算：

$$A = \frac{CV^2}{2}$$

式中， C ——电容， V ——电压。如果 C 以微法表示， V 用千伏表示，则 A 以焦耳表示。

如果单位工作负载不变，增加电容并相应地降低电压 (到所知的极限值为止，那时灯还可以点燃)，则脉冲持续时间将延长，由于缓和并减弱了冲击波，因此爆炸危险大大地减小。当电压增高时，相应地电容减小了，则冲击波的强度就迅速增强，因此，爆炸的可能性就急剧地增大。

当灯的供电状态改变时，按光谱分布的辐射能量的极大值位置发生位移。于灯的单位负载为恒值时，随着电压的减小，电容增大引起光谱长波部分能量的不大的位移。但假如提高电压，减小电容，则紫外光谱区域

的辐射部分迅速增加，红外光谱区域的辐射部分降低^[11]。光谱组成也与单位工作负载有关。如所知那样，ИФП-15,000 型灯的供电部分的能量增加 4.5 倍，紫外辐射部分增加 20% 到 25%，而红色和红外辐射部分减少 55% 到 45%^[10]。

在最近五年内，与激光器的研究和应用工作的发展相联系，各种类型的脉冲灯的品种也显著增加。利用它们的方法也是各种各样的。大尺寸的灯，通常工作时不冷却，一般情况是提高其能量负载来工作的，当然这就要牺牲它的使用寿命。最大的实际应用是用于工作于各种重复触发频率的激光器上。这种激光器的被冷却的激活材料的尺寸一般不大 (长度到 100 毫米)，为此生产了相应的小尺寸脉冲灯，能在冷却时重复触发工作 (图 4)。其结构和制备工艺与一次触发的脉冲灯不同。问题在于，当制备小尺寸灯 (供

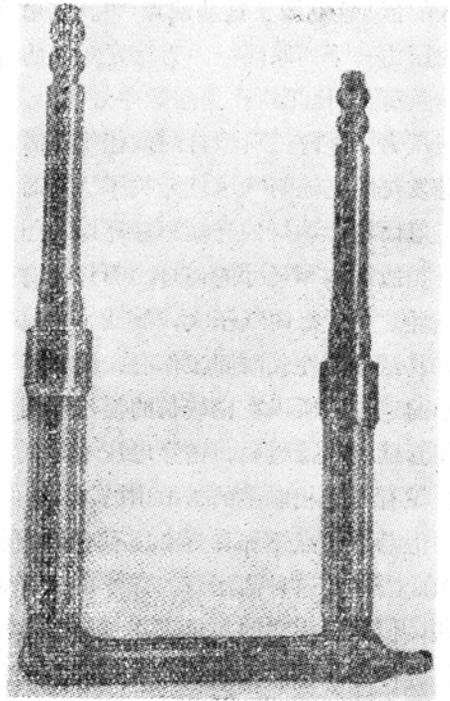


图 4 重复闪光的 II 型小尺寸脉冲灯；灯及它的两个电极用循环水来冷却。

重复触发工作作用的)时,曾发觉下列情况。假如这些灯充以氙气到最佳压力,则自它以这种或那种重复频率开始工作后,经过短时间,出现两个不好的结果。首先,由于电极溅射粒子的沉淀层以及石英中硅和硅的氧化物粒子的蒸发层所致,使灯的管壁变暗。第二,降低了击穿电压。频率越高,这些因素的作用也就越厉害^[12]。击穿电压的降低,看来可用二种原因来解释。在放电时,发生气体压力的减小,这要以溅射在灯壁上的粒子是封闭的为先决条件。此外,由于电极的金属蒸汽进入放电等离子体,相当于氙的电离电位降低,击穿电压的降低导致灯中被散射的功率的减小。在灯的工作过程中,二种因素的作用迅速地降低它的光效率,致使灯很快变得不适于用激发振荡了。

Б. М. Седов 和 Л. П. Шишадкая 共同制备了重复触发的脉冲灯,灯内充以几个大气压的氙,就克服了这些缺点^[13]。采用这么大的压力有下列原因。因为重复触发的灯的工作负荷率,比单次作用的脉冲灯的小几倍,当气压大大地超过典型灯的最佳气压时,重复触发灯的光流与气压就无关了。同时,以光流值而论,新灯的光流超过充以最佳气压的、类似结构和尺寸的氙灯。新灯还有一种优越性。由于灯内气压大,故减小了电极溅射,其结果使在长时间工作时,阻缓了气压减小的速度,所以在比较长的使用期间内,灯的管壁仍保持透明,击穿电压不降低,并且也没有与之相联系的被散射的功率的降低。但是为了点燃那种灯必须有有效的点燃装置。当然,这种高压灯的爆炸事故可能会多些,但是因为它的单位工作负载与单次作用的脉冲灯相比是不大的,所以事实上并未看到过这种情况。然而,灯在工作时剧烈地被加热。这种情况导致,对重复触发的激光器

的泵浦来说,宁愿采用铝箔式的温度稳定的灯。因为在小的单位工作负载和低频率时,甚至在没有强迫冷却的情况下,它们也能工作,因为焊接在灯的石英管脚上的铝箔,在这些情况下,熔化的几率是很小的。

光泵时经常发生的激活材料的加热使它们的荧光特性变坏,招致激励阈值增高。所以振荡体有时不得不用低沸点的液体进行冷却(如液态空气、液态氧、液态氮),但同时使照明器中的氙灯与这类冷却剂隔离开,而仍然保持在室温。这样就使照明器盒子的制备和结构复杂化了。

为了避免类似的复杂化, J. W. Tucker 和 J. N. Bradford 制备了一种新型的脉冲灯,充入混合气体——氙(气压 100 毫米汞柱)和氙(气压 600 毫米汞柱)^[14]。把这种灯与振荡体放置在同一腔中,用液氮同时冷却它们。于液氮的沸点(为 77°K)时,灯内建立起氙的分压为 25 毫米汞柱,氙为 $3 \cdot 10^{-3}$ 毫米汞柱。从效果来看,新型灯几乎并不逊色于不冷却的标准的氙灯。

一开始已经提及,所有现时以灯泵浦的激光器,效率非常低;尽管受激辐射有它独特的优点,但这种低效率自然而然地阻碍了并继续阻碍着它们的普遍推广。因此,必须探求提高效率的方法。但是在探求时,必须考虑到激光器效率不高的主要原因,绝不可认为仅仅是泵浦灯的关系。泵浦灯虽然实际上降低了激光器的效率,但与振荡材料本身固有的其他因素相比较并不算大。最好的例证是脉冲灯,因为对大多数灯激励的激光器来说,在确定的情况下,效率等于 1% 或稍高些,而且它们比起其他三类泵浦灯来,更为人们所乐于采用。

假设,取一激光器,红宝石棒由一支脉冲灯照射,灯从预先充电的电容器组取得能

量。为了明显起见，假设电容器组的储能是1,000焦耳。电容器组放电时，就产生触发闪光。下面，我们对能量的损失和能量的有用的消耗作一简单的近似的计算。

第一种损失 放电时，大约电容器组的能量的一半即 500 焦耳损耗在电容器组本身、电线上、仪器上以及耗费在灯管加热、电极加热上和被石英灯管壁所吸收的辐射上（即波长短于 180 毫微米和长于 3,500 毫微米的辐射）。最大部分的损耗是在电容器上^[10]，特别是当放电发生振荡状态时，换言之，于 L/C 值大、电阻值小时^[15]。此外，某种程度上，损耗值是与灯的电极间距离的长度有关。距离越大损耗越小。剩下的 500 焦耳用于形成灯的辐射输出上，这些辐射是能透过石英管壁的，并分布在提及过的所有广阔的光谱范围内。

第二种损失 它们由二种因素决定：照明器效率和泵浦不均匀的程度。我们先撇开后一因素，同时假定泵浦大大地超过阈值。如所知那样，各种结构的照明器效率是60~80%^[16]，取其平均值为70%，那末第二种损失是 150 焦耳；则剩下 350 焦耳辐射，位于

180~3,500 毫微米范围内。但是红宝石的主吸收带位于光谱的蓝色和绿色区域，在这一区域，灯的辐射十分强。故认为近于 25% 的剩余的能量是位于其吸收带上^[10]。因此大约有 90 焦耳的能量是用于激励振荡的，而其余的能量成为第三种损失。

第三种损失 等于 260 焦耳。耗费在吸收带以外的这些能量被滤光系统所屏蔽掉。

第四种损失 在 90 焦耳中约有 60% 即 54 焦耳是耗费在无辐射跃迁上的（详见红宝石的能级图）。这些损失同样会引起工作物质的加热，有时会明显地使无辐射跃迁的吸收带牺牲掉。这样就使灯的相应为“无用的”吸收带辐射谱段被附加地滤波。于是只有 36 焦耳是用于红宝石内部的受激辐射上的。但是其中重要的损失还占 70%。

第五种损失 光束在谐振腔中反射镜之间多次反射所耗费的能量约为 26 焦耳。这些损失主要由于无关杂质的吸收、各种散射损失及光学不均匀性和衍射损失。

于是，激光束输出辐射能量为 10 焦耳，或者为电容器储能的 1%。图 5 中给出了灯泵浦的激光器的能量平衡图。

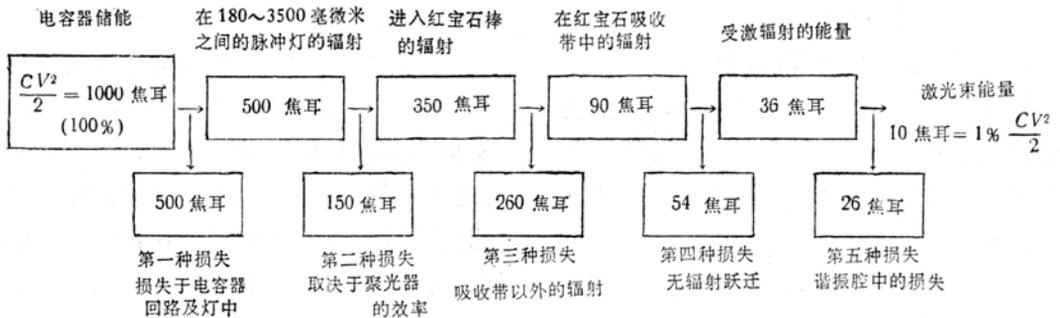


图 5 灯泵浦激光器近似的能量平衡图。

现在，研究的问题在于当泵浦灯的效率最高时，激光器的效率将如何。当然，这种灯能够将落在它上面的能量完全转换成仅在

红宝石吸收带内的极强的辐射。这时辐射能量密度大大超过了阈值。这时的能量平衡就换成了下面的形式。在放电时，电容器中的

储能转化成第一种损失和第二种损失是不可避免的。而在这种灯的辐射光谱组成中相应仅为红宝石的吸收带。所以在电容器、回路、灯本身及照明器中损失后，剩下的 350 焦耳用于激励振荡，但是这些能量的 60% 即 210 焦耳耗费于无辐射跃迁，而 140 焦耳是用于受激辐射的。在谐振腔内，这 140 焦耳又损耗了 70% 能量，约 100 焦耳。因此激光束的能量为 40 焦耳，即在这种较好的情况下量子振荡器的效率增加了四倍，为 4%。

由此可见，即使用具有极高辐射效能的脉冲灯泵浦时量子振荡器的效率离所希望的数值还相差很远。基于采用高效能灯缺乏明显的优越性的事实，同时，这种脉冲灯实际上也无法制造，于是也就不应当阻止新的辐射器的探索和研制。这种辐射器的自身参量趋近于这种能高效能泵浦的理想的泵浦灯。无论对于脉冲灯还是对于连续点燃的弧灯都进行了上述的探讨和研究。下面简述所获得的结果。

Ю. А. Ананьев、В. Б. Бородзюля 等在大尺寸的脉冲灯中将氙的气压由 400 毫米汞柱减少到 80 毫米汞柱，脉冲灯在相应于铍玻璃主要吸收带的光谱区为 580~620 和 720~920 毫微米的辐射强度平均提高了 25%^[17]。这些作者对直径为 16~30 毫米，极间距离为 600 毫米的脉冲灯进行研究后表明，大管径的脉冲放电能提供强红外辐射源，并能在几毫秒时间内其辐射功率基本不变这一点是很重要的。

Г. А. Волкова 和 В. К. Прокофьев 找到了在 240 至 300 毫微米紫外光谱区内提高辐射强度的方法^[18]。主要是在脉冲灯管的内表面涂上一层锌的薄膜。当灯管中氙的气压约为 1 毫米汞柱时，放电就使锌蒸发并发出光来。所得到的光谱是除了硅的吸收谱线以外

的连续谱。在上述光谱区锌的连续辐射强度较之典型的充以最佳气压的脉冲氙灯的连续辐射强度要高出 2~3 倍。在图 6 上比较了锌和氙的光谱强度。

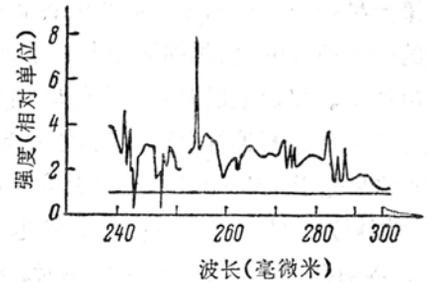


图 6 充氙和锌的放电管与同样的只充氙的放电管的光谱辐射强度相对分布的比较。将仅充氙的放电管的每一波长处的强度值均取为 1。

众所周知，钐作为激活剂与其他激活元素相比较有一系列的优点：

1. 它的工作跃迁的上能级的位置接近于吸收带。所以，与无辐射跃迁相关连的热损失就不大；
2. 所发出的 0.7083 微米红线没有脉动也没有伴随现象；
3. 在液氢 (20°K) 冷却时钐具有很低的激励阈值；
4. 钐在 300~650 毫微米范围内具有宽广的吸收带。

然而它在 632~650 毫微米的红色光谱区域具有最大的吸收。根据这一情况，С. И. Андреев、М. П. Ванюков 和 Г. Е. Гаврилов 设想建立一种主要辐射红色光谱的脉冲灯^[15]。为此目的研究了一种以氙气代替氙气的脉冲灯。研究指出，这些灯的很多能量是电容器储能中大部分能量在放电回路中耗损之后才辐射出去的。因此，脉冲氙灯的氙气在 610~650 毫微米的一组弧线所起的有效作用是在发光的后阶段。这一谱段与钐的最大吸收带是很好匹配的。将试制的氙灯与普通的氙

灯进行了比较。不出作者所料：氙灯在钐的吸收带处的强度较之氙灯提高了约2~3倍。

最后，应该再提一下脉冲灯辐射的选择性问题。按 A. Tewes 的报导，如果在脉冲氙灯中掺入铈会提高红宝石激光器的泵浦效率^[31]。这种金属蒸汽的辐射光谱在535毫微米谱线处特别强，这与红宝石的绿色吸收带是很匹配的。

可以看出，这里所叙述的改变脉冲灯光谱组成试验虽然已得到了某些结果，然而距离明显改善量子振荡器效率的要求还相距很远。这种情况是早就预料到的。实际上气体脉冲放电概念的现有水平还没有任何理论基础足以制造我们所希望的具有辐射选择和高强度的新的脉冲灯。诚然，在低气压和能量负载不大的情况下，在透明放电等离子体灯管中不管怎样还能获得某些辐射选择，但是这种类似的选择的辐射强度是很小的，对于激励振荡也是勉强的。提高它只有一种方法：增加放电功率和提高灯中的气压。然而，此时等离子体丧失了它的透明性，因为在等离子体中产生了热力学平衡的稳定条件，使灯的辐射“变黑”了，当然光谱的选择也就不可能了。总而言之，目前还不知道用什么方法使等离子体在一定的光谱区域发出很高强度的辐射。由此可以得出结论，所有的脉冲灯在近期内仍然是激光器的低效率的泵浦源，一直到更有效的更方便的泵浦源出现为止。

(二) 弧光灯

这种灯是连续点燃的。它们用于泵浦激励阈值很低的连续激光器，因为弧光灯的辐射强度实际上要让位于脉冲灯。这种类型的激光器除了科学目的之外还没有得到任何实际的应用。这是由于它的结构很复杂，要求低沸点液体冷却，而它的效率较脉冲激光器

的效率又低的缘故。因此，对弧光灯的注意要比脉冲灯小得多。

弧光灯有三种类型——高压氙灯、高压氙灯和超高压汞灯。通常均制作成球形和管状二种型式。球形灯用于按照 D. F. Nelson 和 W. S. Boyle 提出的凹形共焦反射镜的激光器^[19]或用于 P. H. Kock、J. J. Redmann 等提出的聚光回路的激光器^[20]中。在实际实验中管状灯应用得比较多，因为它们比较方便。它们应用在 L. F. Johnson^[21] 或 G. D. Boyd^[22] 设计的激光器中。以下仅对管状灯作进一步的叙述。它们的电流密度较之脉冲灯要小得多，因此辐射的变黑程度不大，这样，就使它们的光谱的本底上同时还存在极强的中性原子的谱线。管状灯的极间距离一般不大——从20毫米至80毫米，即约为这些灯的泵浦的振荡材料的长度。

В. Ф. Егорова、Н. А. Козлов、А. А. Мак 和 С. А. Яковлев 研究和试制了 КсТв-45 型高压管状弧光氙灯^[23,24]。它的功率为4.4瓦，放电工作电流——40安培，沿轴发光亮度——160兆尼特。灯在这种工作状态需要循环水冷却。沿放电通道轴的能量绝对光谱分布如图7所示。按照对辐射谱线

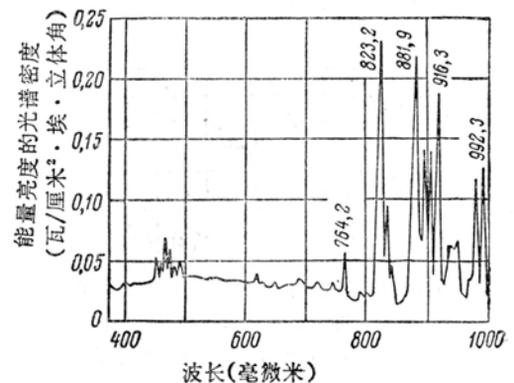


图7 管状弧光氙灯沿放电通道轴上辐射亮度的光谱分布(内径3毫米，极间距离30毫米，室温时的氙压为8个大气压)，横轴表示波长，纵轴表示辐射功率值。

(XeI 谱线 0.8812 微米)强度的计算, 沟道的亮度温度不超过 $4,000^{\circ}\text{K}$ 。在 $400\sim 1,000$ 毫微米区域内的能量输出约占 $15\sim 45\%$, 当提高灯的功率和增加氙气压时这一区域的能量输出随之增加。这种灯用来泵浦激活的氟化钙。由于这种晶体的低能级趋近于基态 (35厘米^{-1}), 为了减少终态的集居数, 要用液氮来冷却晶体。在这样的温度下氮的阈值功率足够小, 约几十瓦。Xe 的 916.3 毫微米与晶体的近似 $1,000$ 毫微米强吸收带的相匹配, 对于振荡的获得起着很大的作用。

为提高连续激光器泵浦效率所作的弧光灯方面还有一些引人注目的工作。很明显, 水冷的气弧灯的辐射光谱中在 810 毫微米附近有极强的红外谱线, 这与掺钕百分之一的钇铝石榴石的吸收带是很好一致的^[25]。当用氩弧灯、氙弧灯和碘白炽灯(详见图 8)不同照明石榴石棒时, 对钕的受激辐射线 ($1,060$ 毫微米) 的强度进行了比较测量。棒的直径为 3 毫米, 长度为 50 毫米, 棒具有共焦端面, 端面上的介质反射镜(反射系数 99.5%) 和灯一起装在具有镀金反射层的、长轴为 97 毫米、偏心度为 0.25 的椭圆聚光器中。T. B. Read 的测量结果画在图 8 上, 从中可以

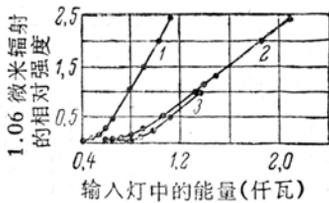


图 8 掺钕钇铝石榴石在用不同弧光灯泵浦时的振荡强度比较。
1—氩弧灯; 2—氙弧灯; 3—碘钨灯

看出用氩灯来代替氙灯和碘灯泵浦效率增加两倍多。

超高压汞灯的辐射亮度要较氙灯和氩灯

的辐射亮度高出两倍多。在苏修的科学技术资料中仅描述了一种由 Ю. А. Марцинковский、С. А. Яковлев 和 Л. Б. Воздвиженская 所试制的毛细管汞灯^[26]。

在内径为 $1.0\sim 1.5$ 毫米、极间距离为 $20\sim 25$ 毫米的石英毛细管灯中充有氙气压 50 毫米汞柱并充入适量的汞。灯工作时部分汞在毛细管中蒸发, 由此在灯中产生了数百大气压的汞蒸汽压。通过灯的工作电流为 $1.1\sim 1.3$ 安培, 电压—— $1.2\sim 1.4$ 千伏, 沿放电沟道轴的亮度——约 350 兆尼特, 光通量—— $10,000$ 流明, 寿命—— 20 小时。冷却毛细管的水流明显地吸收对激光器来说“有害的”红外辐射。图 9 上画出了沿灯管沟

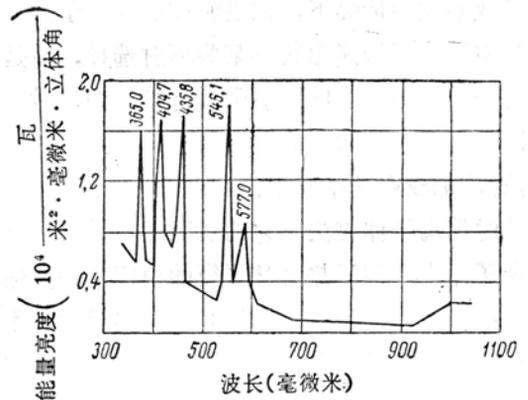


图 9 在功率为 2.25 瓦的超高压毛细管汞灯的放电沟道轴上能量亮度的光谱分布。

道的能量亮度的光谱分布。显然, 亮度的增长是以增加本底强度为先决条件的。利用这种灯取得了用钕激活的钨酸钙的连续振荡。

国外采用了 PEK 公司和通用电气公司制造的 AH-6 型或 A 型毛细管汞灯。灯的尺寸与上面所描述的灯大致相同。Johnson 和他的同事们在上面提及的早期装置中利用功率为 1.6 瓦的汞灯在掺钕的钨酸钙中获得了历时 12 秒的振荡^[21], 相干束的功率为 1 兆

瓦。晶体用液氧冷却。

在 Boyd 和他的同事们的装置中曾利用毛细管汞灯获得铯激活的氟化钙的振荡^[22]。灯用循环水冷却,而晶体则由液氮冷却。灯和棒放在椭圆柱形聚光器的焦轴上。灯的功率为 1.15 瓩、周期为 60 赫时在波长为 2.613 微米处获得振荡,周期为 120 赫,功率为 10 微瓦。

《Гановия》941-B 球型汞灯,在 D. F. Nelson 和 W. S. Boyle 设计的激光器中用以激励红宝石振荡^[19]。为了更好地集中灯的辐射,利用了截断的青玉锥体。任何进入锥体大的基面的光束,由于它侧壁的全内反射,使光束穿过小的基面进入处在液氮冷却的杜拉容器中的红宝石的一端。另一端是透过系数为 0.05% 的反射涂层。当灯的负载为 ~850 瓦时,在波长为 0.6934 微米处观察到振荡,功率约为 4 毫瓦。应当指出,如同脉冲泵浦那样,相干束具有高频脉动。

(三) 白炽碘灯

众所周知,在这种灯中碘的循环能使灯中卷成稠密的螺旋加热至 $3,500^{\circ}\text{K}$ ^[27]。在这样高的温度下,辐射的最大值处于相应于铽的主吸收带之一的 800 毫微米附近。由于辐射从线圈内表面发出,所以螺旋的辐射有一定的“变黑”,因此它的发光亮度也就很大,有时达到 50 兆尼特^[24]。这就使碘灯能用于泵浦低激励阈值的铽激光器。

J. E. Gensik、H. M. Marcos 等利用石英白炽碘灯激励了铽激活的钇铝石榴石的振荡^[32]。室温时振荡波长为 1.0648 微米,液氮温度时的波长为 1.0612 微米。不论是 AH-6 型汞灯还是碘灯都实现了泵浦,而后的效率提高了 2.3 倍。在这之后, J. E. Gensik、M. L. Hensel 和 Smith 同样在掺

铽的石榴石中利用碘循环的千瓦白炽灯获得了连续振荡^[33]。受激辐射的功率为 250 毫瓦。

白炽碘灯与氙弧灯及汞弧灯有所不同,它的辐射具有高度的稳定性。这就使得利用这些灯激励的受激辐射的特性有着本质上的差别。H. M. Галактионова、B. Ф. Егорова 和 A. A. Мак 对用直流供电的氙弧灯^[34]及 ЛНИ-4 型白炽碘灯^[24]连续泵浦钇铝石榴石 ($1\%\text{Nd}^{3+}$) 的结果进行了比较。他们认为第二种情况不存在受激辐射的尖峰,波型的光谱宽度小于 50 赫。在第一种情况下,当氙灯功率由 450 瓦变化到 1,400 瓦时,波型的宽度由 50 千赫变化至 150 千赫,而尖峰的宽度相应由 20 微秒变化至 8 微秒。很明显,氙灯辐射的不稳定,导致了激光器辐射的尖峰特性。

(四) 焰火灯

所有上述各种泵浦灯均需要能源(大多数情况下是线路供电)。它们总是与主体以外的能源相联系的。脉冲和弧光灯同样需要大尺寸的笨重的启动调节装置。例如对于用脉冲灯泵浦的激光器,为了取得能量为 1 焦耳相干束所需设备的重量不少于 5 公斤(激光器和灯的电源部分总和)。对于连续激光器,这个数值更大。由于前面所提及的灯在泵浦激光器时低效率的缺陷,使其又附加了两个不利因素:对能源的依赖和设备笨重,尺寸庞大。因此,自然而然就会产生这样一个问题:能否制作某些与这些因素无关的小功率激光器呢?很明显,解决所提出的任务的比较好的方法之一,应当是利用某些化学反应的能量,例如氧化放热反应。

A. И. Бодрецова、A. A. Каминский、С. И. Левиков 和 B. B. Осипко 由于在这方面试

验工作的结果制造了特殊的焰火灯(图10)^[28]。在石英圆柱形管壳中放置有经压缩过的氧化剂和燃料混合物所组成的焰火筒。用过氯酸钾(KClO_4)作氧化剂,用锆作燃料。在焰火筒中放有很细的钨丝,它的两端引到管壳外面的接点上。若从如 ЦИЧ-5 这样轻的蓄电池(150克)中对接点加上不大的电压,则钨丝被加热并点燃焰火筒。引爆时伴随着发出明亮的光。发光过程是由下列顺序所引起的:过氯酸钾点燃分解时,所释放出来的氧气使锆氧化;放出的大量能量耗费在反应产物的蒸发上,它们的加热和强发光的最大值是在光谱的红色部分。

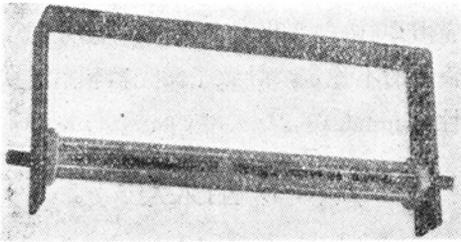


图 10 焰火灯。在圆柱形石英泡壳内,沿轴有悬挂着钨丝的三块小薄片,它是过氯酸钾和锆的压缩混合物所组成的(焰火筒)。

利用这些灯在激励阈值约为 2 焦耳的钹激活的钨酸钙棒中获得了振荡。相应于波长为 1.0584 微米谱线的焰火筒的重量阈值为 30 毫克。当增至 80 毫克时,在振荡光谱中出现了波长为 1.0654 微米的第二条谱线。振荡持续时间由 7 毫秒变化至 10 毫秒与焰火筒的重量有关。这样长的振荡持续时间表明辐射状态是准连续的,因为钹的激发态的寿命要比这一时间短 50 倍。钹离子能级的基态与终态之间的距离很大,因此,晶体不必要人工冷却。

他们还试制了更复杂的用四个焰火灯泵

浦的准连续激光器,焰火筒的成份与上述相同,重量 600 毫克。用液氮冷却的铈激活的氟化钙晶体作振荡器。受激辐射的波长为 2.36 微米,能量——4 焦耳。

应当指出,焰火灯还具有一个重要的优点。当在焰火筒中添加经选择的特殊的杂质使发出所希望的光色时,它们可以改变自身辐射的光谱组成而它的辐射强度没有明显的降低。

最近, C. L. Smith 和 E. Homentowski 制作了泵浦用的特殊的气体火焰光源^[30]。发光依赖于在钢制容器中的氩(52%)和氧(48%)的易爆混合物。在容器的中间有穿透的通道,通道中放置红宝石棒,以避免冲击波的透过和使外壳稳定。由于化学反应的结果,在 1~3 毫秒之后亮度温度达到 7000°K。引爆以后经过 1.4 毫秒产生激励振荡,持续时间约 10 微秒。混合物用火花进行点燃。新的光源较之以往的焰火灯具有一系列的优点。首先,它的温度高;其次,爆炸产物是气相的(CO_2 和氮),所以不遮光,而当焰火筒爆炸形成固体产物时就可以观察到遮光现象;第三,辐射器可以作成各种尺寸等等。

现在我们对焰火泵浦一般性的评价一下。所有的焰火光源只能工作一次。然而对于用附有笨重能源部分的放电灯泵浦的激光器来说,它们尺寸小,简单而且价格也要便宜很多倍。因此可以预期焰火光源在适应于它的可能条件和参量的情况下会具有广阔的实际应用。

参 考 资 料(略)

取自 С. И. Левиков, ОМЛ, 1969, (Авт.) № 8, 54~62