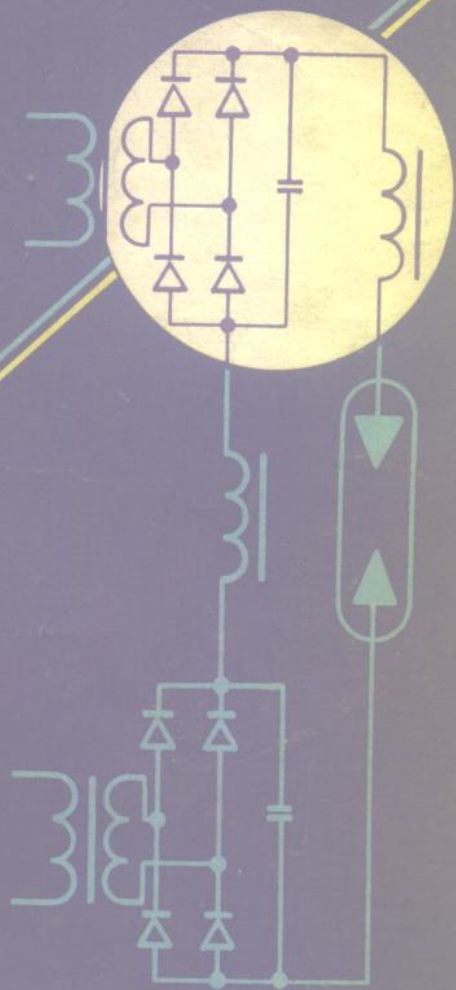


[苏] И. В. 波尔科夫 著
В. М. 巴枯连柯



激光器的电源

激光器的电源

〔苏〕И. В. 波尔科夫 В. М. 巴枯连柯 著

孙乃庚 王世贵 译

沃新能 校

科学出版社

1980

内 容 简 介

本书介绍脉冲激光器和连续激光器电源的主要功能部件及电路方案,电感-电容变换器的优点、设计方法以及所研制的激光器电源在工业上使用的经验。书中所介绍的许多装置(电流的调节器和稳定器,储能器的充电系统,脉冲控制系统等)可以成功地应用在无线电仪器、通讯装置和自动装置的电源系统中。本书可供在工厂和实验室中研制、使用激光器电源的工程技术人员参考。

И. В. Волков, В. М. Вакуленко

ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ЛАЗЕРОВ

Издательство «Техника», 1976

激 光 器 的 电 源

[苏] И. В. 波尔科夫 В. М. 巴枯连柯 著

孙乃庚 王世贵 译

沃新能 校

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1980 年 12 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1980 年 12 月 第一次印刷 印张: 5 5/8

印数: 0001—4,810 字数: 124,000

统一书号: 13031·1419

本社书号: 1960·13—3

定 价: 0.90 元

译 者 的 话

激光器具有许多优异的特性,因此在物理学、化学、生物学、医学以及工农业生产中获得了愈来愈广泛的应用,不少科技领域由于应用了激光器而发生了革命性的变革。

大多数激光器是用电能泵浦的,电源作为一种主要的泵浦装置,是激光器的重要组成部分。但是,目前电源的体积和重量往往比激光器本身还大,甚至大得多;电源的性能常常不能适应激光器的要求,而且随着激光技术的发展,对电源的要求也进一步提高。因此,如何研制出体积小、重量轻、损耗低、可靠性高、稳定度好的各种激光器电源,是摆在电工工作者面前的一项任务。

本书介绍了激光器对电源的要求;对不同的电源电路进行了理论分析,指出其优缺点,并且举例进行了计算。书中所介绍的有些内容如 LC 变换器,有一定的普遍意义,不仅适用于激光器电源,而且适用于电工部门或其他物理研究部门的冲击电流发生器和冲击电压发生器。尤其是冲击电压发生器,采用了 LC 变换器后,可以很容易地解决各级充电电压的均匀性问题,从而提高设备的利用率及动作的可靠性。本书对从事激光器电源研制的工作人员和其他有关工作者有一定参考价值。

在翻译过程中,我们纠正了原版中一些公式、电路图和符号的错误,一般未作说明。由于译者水平有限,错误在所难免,欢迎读者批评指正。

序 言

在过去的十年中,由于量子电子学的迅速发展,制成了大量的各种类型的激光器。不同类型的激光器,其工作物质、输出参数和功能用途各不相同。由于激光器具有十分独特的性能,所以近年来,在科学、技术、医学和生物学等各个方面,都成功地获得了愈来愈广泛的应用。现在,在近代科学技术发展的过程中,几乎没有一个方面,科学家和工程师们不想利用这种新的、具有高度单色性和相干性、具有极大光流密度和光波电场强度的大功率辐射源。

电源,或者象通常所称呼的电泵浦源,是激光设备最重要的组成部分之一,其特性主要由激光器的类型及它的使用条件来确定。随着激光技术的发展和使用激光器部门的增加,对电源的要求也正在提高,电源的功能部件也复杂起来。

本书的目的是介绍各种连续激光器和脉冲激光器的电源,这些电源要能满足经济、质量指标及使用参数的再现性的要求。

本书把主要注意力放在工业上所用的固体激光器电源设备上。这是由于固体激光器比其他类型的激光器制成较早。直到目前为止,它的许多重要参数仍然比气体和半导体激光器优越。固体激光器设备正用于各种材料的焊接和加工方面,也用于物理学、化学、医学和生物学的研究方面。

同时,书中所研究的大多数技术结论带有普遍的意义,可以成功地用来指导任何一种激光器电源的研制工作。当然,这是就脉冲电源和连续电源的方框电路以及储能器的充电设

备而言的。书中着重注意的是电感-电容变换器的利用问题。这种变换器的外特性，能与固体和气体激光器中所用的气体放电的伏-安特性理想地匹配起来。

研究激光器电源时所要弄清楚的问题，就其与量子振荡器各种参数的相互关系而言，是非常广泛的，因此，本书只叙述了其中的一部分。

目 录

译者的话	i
序言	ii
第一章 激光器的基本特性及其对电源的要求	1
1. 固体激光器的一般特性	1
2. 气体放电灯的参数和特性	5
3. 气体激光器和半导体激光器的主要电特性	10
4. 电源的特点和对电源的基本要求	14
5. 脉冲调制器和连续电源的方框电路	17
6. 储能器	21
第二章 电容储能器的充电设备	27
1. 最佳充电过程	27
2. 通过接在交流回路里的限流元件充电	35
3. 通过接在整流回路里的限流元件充电	41
4. 对电容储能器充电的可控整流电路	51
5. 脉冲充电	59
第三章 电感-电容变换器	67
1. 工作原理和基本特性	67
2. 单相变换器	73
3. 三相变换器	78
4. 设计方法	89
第四章 电感-电容变换器的应用	102
1. 在脉冲激光器中用来对电容储能器充电的变换器	102
2. 连续激光器电源中的变换器	121
第五章 激光器电源的电路	132

1. 脉冲灯调制器放电回路的设计.....	132
2. 脉冲灯调制器的控制系统.....	140
3. 固体激光器的电源电路.....	146
4. 气体激光器和半导体激光器的电源.....	157
参考文献.....	165

第一章 激光器的基本特性 及其对电源的要求

1. 固体激光器的一般特性

每一种类型的激光器——固体的、气体的、半导体的，都需要研制专门的电源，以便以最小损耗来泵浦激光工作物质，保证获得所要求的辐射参量。为了设计电源电路，首先必须研究激光器的电气特性，并查明这些特性对电源的功能部件和原理电路选择的影响。

任何一种激光器，其基本部分都是泵浦电源以及由激光工作物质和光学谐振腔组成的辐射器^[4,7,51,55,71]。

现在已经知道了大量的固体激光工作物质。人造红宝石晶体激光器是最早制成的。就物理性能和机械性能而言，红宝石晶体是最好的激光工作物质之一。钕玻璃激光器，在辐射比功率方面不如红宝石激光器，但在最大辐射能量和效率方面却超过它。最近，掺钕钇铝石榴石激光器已经问世。这种激光器使振荡阈值大大降低，效率大大提高。

在固体激光器中，通常采用由气体放电形成的高强度辐射源——光泵（简称为灯），作为泵浦手段。光泵是辐射器的一个组成部分。对光泵的基本要求是，在泵浦能量足够高的条件下，其辐射频谱要与激光工作物质的强吸收频谱相匹配。

按照工作状态的性质，固体激光器通常分为脉冲的和连续的两种。顾名思义，这样的分类也就确定了电源的研制方

向。因为在一种情况下,对光泵系统,必须保证脉冲式供电,而在另一种情况下,则必须保证连续供电。

脉冲激光器可以在自由振荡的状态下工作,也可以在调 Q 的状态下工作.第一种工作状态的特点是,振荡实际上是在整个光泵脉冲作用期间内形成的(图1),而且辐射脉冲时间 $\tau_{\text{辐射}}$ 通常比光泵脉冲时间 $\tau_{\text{泵}}$ 延迟一段时间,这段时间是激光工作物质内形成能级上的粒子数反转所必需的.延迟时间的长短,取决于工作物质的性质.对于红宝石大约为300微秒,钕玻璃大约为200微秒,掺钕钇铝石榴石大约为50微秒.自由振荡条件下的最大辐射脉宽,是由对辐射性质的要求来确定的,可达几十毫秒。

固体激光器的辐射能量取决于工作物质的性质、辐射器

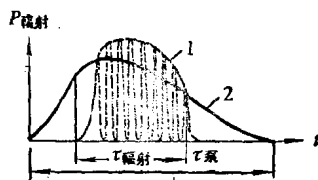


图1 固体激光器辐射功率与时间的关系

1——激光辐射; 2——光泵辐射

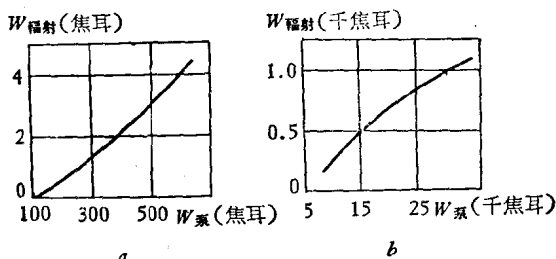


图2 固体激光器辐射能量与泵浦能量之间的关系

(a) 红宝石(晶体长度 $L=80$ 毫米, 直径 $d=8$ 毫米); (b) 钕玻璃
($L=300$ 毫米, $d=45$ 毫米)

的结构以及泵浦能量的大小。泵浦能量愈是超过阈值,辐射能量就愈大。图2指出了红宝石激光器[图2(a)]和钕玻璃激光器[图2(b)]的辐射能量 $W_{\text{辐射}}$ 跟泵浦能量 $W_{\text{泵}}$ 之间的实验关系。利用这些关系,不仅可以判断固体激光器可能输出的辐射能量,而且可以确定所需要的泵浦能量。对红宝石激光器作能量平衡计算表明^[66],储能器中全部能量的50%左右损耗于放电回路和灯中,输入辐射器的能量就是那么一些,以至总效率只有1%(钕玻璃激光器高些,为2%—4%)。

由于外界的气候因素和机械因素的影响,固体激光器的工作物质和谐振腔的参量要发生变化,因而其辐射能量将不稳定,光泵的发光效率也要逐渐降低。这些是固体激光器的特点。在泵浦能量不变的条件下,红宝石激光器的辐射能量随时间变化的曲线(曲线1)如图3所示。为了使辐射能量不变(曲线2),就必须逐渐增加泵浦能量。

固体激光器辐射脉冲的最高重复频率与工作物质和辐射器的冷却系统的效率有关。红宝石和钕玻璃这两种激光器的

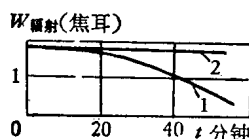


图3 固体激光器的辐射能量随时间的变化情况

重复频率通常较低,或者是单次的;在适当的冷却条件下,可达几十赫。掺钕钇铝石榴石激光器的重复频率有很大提高,可达到500赫,如果对连续辐射进行调制,还可达50千赫。

调 Q 能使固体激光器的辐射功率显著增加。调 Q 时可以采用电动机械开关、电光开关、磁光开关,也可以采用光化学开关。

在泵浦脉冲作用期间内,谐振腔先保持低的 Q 值,使得激光工作物质在充分泵浦之前,不能振荡,等到充分泵浦以后,打开光开关,使谐振腔恢复正常的 Q 值。这样,激光器就能输

射出一个短 (10^{-7} — 10^{-9} 秒) 而强 (10 — 1000 兆瓦) 的脉冲。在以这种方式工作的激光器中, 电动机械开关和电光开关获得了极为广泛的应用。光开关的打开应该与激光器电源的工作严格地协调起来。在图 4 中画出了红宝石激光器的辐射能量与光开关打开时刻的关系。这一关系表明, 存在着一个最佳的延迟时间 $\tau_{\text{延迟}}$, 与此相对应的辐射脉冲的能量有最大值。最佳延迟时间与工作物质和激光器的结构有关。

可以把几台脉冲激光器组成一个工作在自由振荡状态或调 Q 状态的激光器组。建立这种多路激光器的目的在于增加辐射脉冲的重复频率和功率以及延长整个系统的工作寿命。对于多路激光器的供电, 需要专门的多路电源。

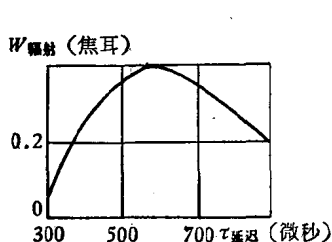


图 4 激光器的辐射能量与光开关打开时刻的关系

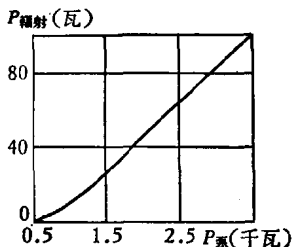


图 5 连续辐射功率与泵浦功率之间的关系

随着掺钕钇铝石榴石晶体的应用, 固体激光器的连续辐射有了实际意义。这种连续激光器的泵浦, 通常是采用连续的高强度光源。辐射功率 $P_{\text{辐射}}$ 与泵浦功率 $P_{\text{泵}}$ 之间的关系, 如图 5 所示。为了增加连续辐射功率, 可以采用多路系统。此外, 考虑到许多工作物质, 包括掺钕钇铝石榴石在内, 既可以工作在脉冲状态, 也可以工作在连续状态, 因此, 建立一套能自动地从一种状态转变为另一种状态的综合性供电系统是需要。

这样, 固体激光器电源的研制, 实际上可以归结为脉冲调

制器或气体放电光泵(即灯)的连续电源的研制。

2. 气体放电灯的参数和特性

在研究气体放电灯的特性时,我们是把灯作为对固体激光光源电源的设计有重要影响的电路元件来考虑的。灯的主要特性有:电特性、辐射特性、负载特性、频率特性和运行特性^[69]。

氙灯作为脉冲光泵,获得了最为广泛的应用,它的辐射特性与工作物质的特性能够最有效地匹配起来。

气体放电灯是一种可控的开关器件,就是说,在加上电源电压时,它能保证放电回路不导通。但是,对每一个灯来说,都存在着某个最小的自行放电电压——自闪电压。通常,电源的最大电压不超过自闪电压,而为了保证灯能够放电,可用高压短脉冲触发点燃。

灯上的电压,存在着一个下限值,电压高于此值时,灯才能在触发脉冲的作用下,产生自持放电。这一下限值叫做起燃电压。

因此,脉冲灯技术条件中的起燃电压和自闪电压,确定了电源输出电压的允许变化范围。

触发脉冲使灯击穿以后,储能器便开始向灯放电。当灯内的氙气压力为 600 毫米汞高、放电电流密度 j 为 100 到 10000 安/厘米²时,下述关系是成立的^[48,83]:

$$\rho_{\pi} = 1.15/\sqrt{j}, \quad (1)$$

式中 $\rho_{\pi} = R_{\pi}S/l$ 为灯中等离子柱的电阻率,等离子柱的截面积为 S , 长度为 l ; $j = I_{\pi}/S$ 为充满整个放电管截面的电流 I_{π} 的密度。

把一些已知值代入方程(1),就可以直接得到灯电阻 R_{π} 的表达式:

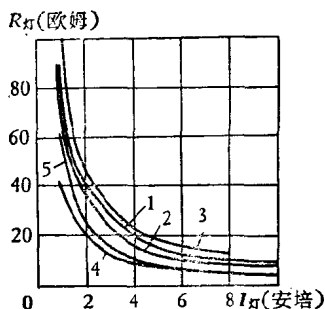


图 6 灯的电阻与泵浦电流的关系

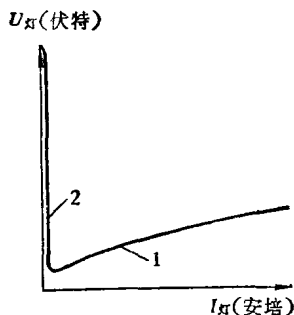


图 7 脉冲灯的伏-安特性

$$R_{\pi} = k_0 / \sqrt{I_{\pi}}, \quad (2)$$

式中 $k_0 = 1.3 l/d$, 对于一定型号的氙灯来说, 它是只和灯的几何尺寸有关的一个常数; d 为灯的内径。

甚至在电流密度 $j > 25$ 安培/厘米²的条件下, 关系式 (2) 也能与下面一些灯的实验特性 (图 6) 符合得很好 (起燃的阶段除外): 氙灯 ИСПТ-6000 (曲线 1)、ИФП-800 (曲线 2)、ИСП-250 (曲线 4) 和一些氪灯 (曲线 3 和 5)。

作为光泵的气体放电灯具有非线性的伏-安特性 $U_{\pi} = k_0 \sqrt{I_{\pi}}$, 如图 7 所示。特性曲线上的第 1 段为工作段; 第 2 段为起燃段, 具有负的动态电阻 (即 $\frac{dU_{\pi}}{dI_{\pi}} < 0$)。

泵浦脉冲的宽度属于灯的辐射时间特性。最小的泵浦脉宽应该超过激光器工作物质形成能级粒子数反转所需要的时间。最大的泵浦脉宽则取决于放电回路的参数, 可以超过几毫秒。

脉冲灯辐射的空间特性和光谱特性决定了它的照明效率。

泵浦能量的极限值 $W_{\text{泵, 极限}}$ 是脉冲灯的基本参数之一。

超过此值,灯点燃几次之后就会损坏. 实验表明,极限泵浦能量跟放电电流的脉宽、灯的几何尺寸和结构有关^[90]:

$$W_{\text{系, 极限}} = 12ld\sqrt{\tau_{\text{系}}},$$

式中 l 和 d 的单位为厘米, $\tau_{\text{系}}$ 为微秒, $W_{\text{系, 极限}}$ 为焦耳. 一些脉冲灯的极限泵浦能量跟泵浦脉宽的关系,如图 8 所示.

当脉冲灯在重复频率状态下工作时,灯中允许的耗散功率成了一个重要参数. 对于无强制冷却的石英管脉冲灯来说,灯管外表面所耗散的极限平均功率为 10 瓦/厘米². 在热稳定状态下,下述条件必须满足:

$$W_{\text{系}}F \leq \bar{P}_{\pi},$$

式中 F 为脉冲重复频率, $\bar{P}_{\pi}$ 为灯的最大允许平均功率.

灯的管壁和电极被强制冷却时,电负载可以显著提高. 如果泵浦能量不超过极限值,则泵浦脉冲的最高重复频率,可由脉冲灯的频率特性来确定. 每一个灯都有它的极限频率,超过这个频率,脉冲灯就会过渡到连续导通的状态. 为了恢复脉冲灯的耐电强度,就需要在储能器放电完了和再次充电开始之间,引进一个消游离的时间间隔. 脉冲灯的消游离时间跟许多因素有关,对于一个具体类型的灯来说,它主要取决于泵浦能量或功率以及电源电路的参数. 大多数脉冲灯的消游离时间不超过 15—20 毫秒.

为了恢复灯的耐电强度,就必须使灯从储能器上断开,或者使储能器的重复充电延迟一段时间(等于消游离的时间间隔). 第一种方法有一个缺点,就是全部的高达几千安培的脉冲放电电流要流过放电开关(这些开关,可以是电动机机械开

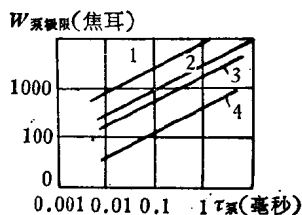


图 8 脉冲灯的极限泵浦能量与泵浦脉宽的关系

1—ИФП-500; 2—ИФП-1200;
3—ИФП-800; 4—ИСП-250

关——继电器，接触器；也可以是电子开关——闸流管，引燃管，可控硅）。这种方法现正在应用着，特别是用预燃方法点灯时要采用。第二种方法，在充电回路中接入开关元件即可实现。

在灯消游离的时间内，必须断开充电设备，这就使得充电电流不连续。因而，从原则上排除了在无附加损耗的条件下自电网吸取恒定功率的可能性。在泵浦脉冲重复频率范围宽的情况下，这一点表现得尤其明显。如果消游离时间与储能器充电时间可以相比较的话，那么，运用预燃方法点灯就合理了。这时，充电电流脉冲之间的间隙能缩减到最小值。

设计这样的电源时，应该考虑到灯过渡到连续导通状态的可能性，应使电源本身，或采取附加手段，限制事故状态下流过灯的电流。

脉冲灯的实验特性，具有重要的意义，例如不论在何种状态下，脉冲灯的可靠性和使用寿命是适用的标准。使用寿命是由使用过的脉冲数来表示的，它跟灯的负载程度（即实际负载与允许的极限负载之比）及其他许多因素有关。根据实验资料，在泵浦脉宽不变的条件下，使用寿命跟能量之间的关系为

$$N = K^{-6.57},$$

式中 N 为使用寿命（使用过的脉冲数）； $K = W_{\text{泵}} / W_{\text{泵, 极限}}$ 为负载系数。

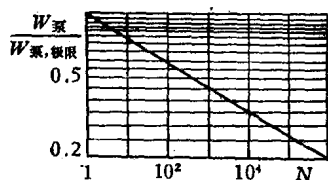


图9 灯的寿命跟
泵浦能量之间的关系

在极限状态下工作时，寿命降低；减小负载系数时，寿命提高（图9）。

脉冲灯的一系列特性决定了它对电源的要求，这些要求不同程度地影响到电源原理电

路的选择和各个元件的结构设计。表 1 列出了固体激光器中最常用的脉冲灯的参数^[53]。

表 1 一些脉冲灯的参数

型 号	泵浦能量 (焦耳)	功率 (瓦)	起燃电压不 高于(千伏)	自闪电压不 低于(千伏)	尺寸* (毫米)	冷却方式
ИФП-800	800	800	0.7	2.5	80×7	水冷
ИФП-1200	600	6000	0.6	3.0	120×7	水冷
ИФП-2000	2000	2000	0.6	2.0	130×11	强制风冷
ИФП-5000	5000	165	1.2	3.0	250×11	自然冷却
ИФП-5000-2	5000	500	1.5	3.5	250×11	水冷
ИФП-8000	8000	264	1.8	3.5	250×16	自然冷却
ИФП-20000	20000	660	2.0	6.0	580×16	自然冷却
ИСП-250	50	250	0.5	2.0	40×5	水冷
ИСПТ-6000	600	6000	0.6	3.0	120×7	水冷

* 第一个数字为电极之间的距离,第二个数字为内径。

固体连续激光器的泵浦,可采用氙灯、高压氙灯、超高压汞灯和白炽碘钨灯。由于掺铈钇铝石榴石激光器主要是工作在连续状态,因此,在研制它的泵浦系统时,主要的注意力是放在寻找高强度的光源上,而且光源的光谱特性要能很好地与掺铈钇铝石榴石的吸收光谱相匹配。氙灯能最有效地满足这些要求。

对连续灯的辐射特性的要求与脉冲灯是相同的,但要考虑伏-安特性的特点。几种氙灯和两种氙灯的静态伏-安特性实验曲线,如图 10(a)所示。特性曲线分为三种不同的区间。在小电流的起燃电压的区间,灯电流与其极间电压有十分明显的关系;在中间的对应于灯电压最低的区间,电压与电流的关系是不明显的;第三区间,电压 U_{π} 随电流的增加而增加。应该指出,无论是哪一种类型的灯,它的伏-安特性都可能具有离散性。在设计电源时,必须考虑到这一点。