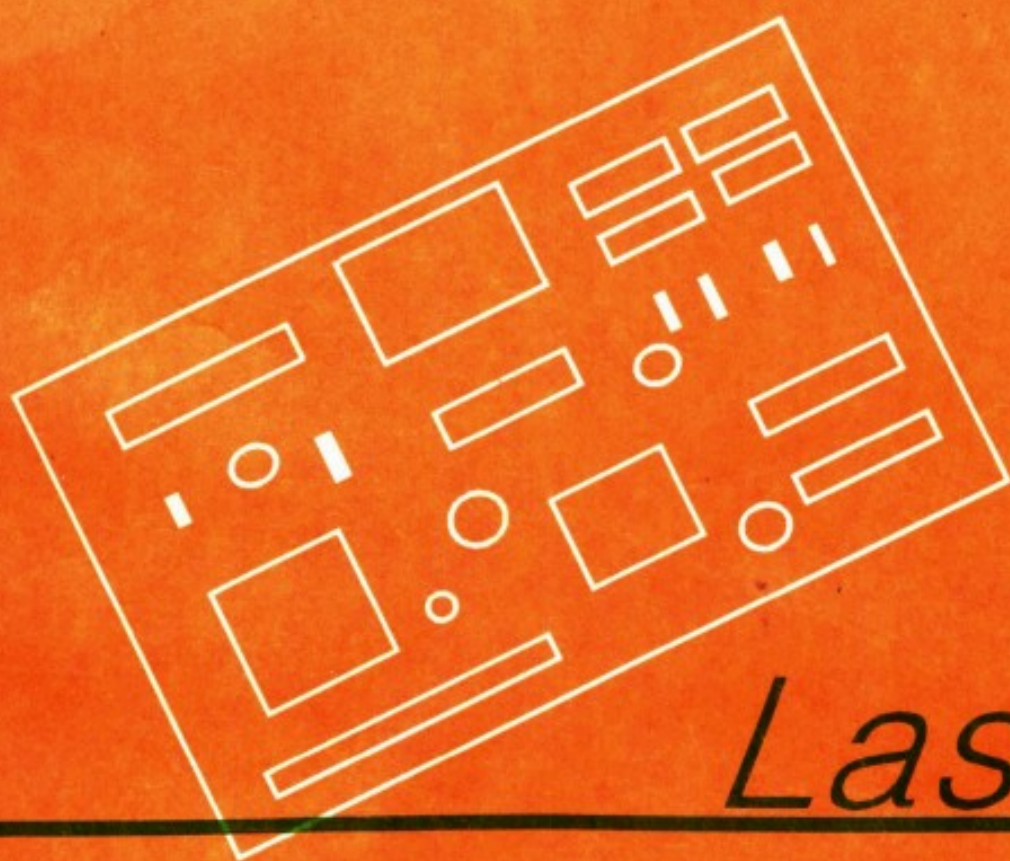


普通高等教育
兵工类规划教材

激光电源电路

梁国忠 梁作亮 编著



Laser

兵器工业出版社

兵器工业出版社
PDG

激光电源电路

梁国忠 梁作亮 编著

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书是作者在多年教学和科研的基础上,查阅许多参考文献而写成的,全书共分六章,主要包括三方面内容:激光器电源使用的电子器件介绍;开关型激光器电源的基础知识及设计方法;激光器电源的工作原理。本书除注重必要的理论分析外,还介绍了若干典型电路,供读者参考。

本书可作为大学光电专业学生教材,也可供从事激光器电源技术的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

激光电源电路/梁国忠,梁作亮编著. —北京:兵器工业出版社,1995

ISBN 7-80038-938-3

I. 激… I. ①梁… ②梁… III. 激光器-电源电路
IV. TN248

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第16070号

兵器工业出版社出版

(北京市海淀区车道沟10号)

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经销

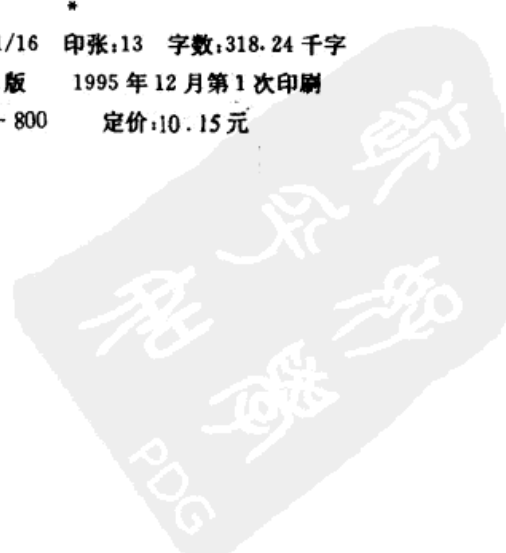
北京怀柔燕文印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:13 字数:318.24千字

1995年12月第1版 1995年12月第1次印刷

印数:1—800 定价:10.15元



出版说明

遵照国务院国发[1978]23号文件精神，中国兵器工业总公司承担全国高等学校兵工类专业教材的规划、编审、出版的组织工作。自1983年兵总教材编审室成立以来，在广大教师的积极支持和努力下，在国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的积极配合下，已完成两轮兵工类专业教材的规划、编审、出版任务，共出版教材211种。这批教材出版对解决兵工专业教材有无问题、稳定教学秩序、促进教学改革、提高教学质量都起到了积极作用。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设需要，特别是国防现代化培养人才的需要，反映国防科技的先进水平，达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求，我们以提高教材质量为主线，完善编审制度、建立质量标准、明确岗位责任，建立了由主审人审查、责任编委复审和教编室审定等5个文件。并根据兵工类专业的特点，成立了十个专业教学指导委员会，以更好地编制兵工类专业教材建设规划，加强对教材的评审和研究工作。

为贯彻国家教委提出的“抓好重点教材，全面提高质量，适当发展品种，力争系统配套，完善管理制度，加强组织领导”的“八五”教材建设方针。兵总教材编审室在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1991年制订了1991~1995年兵工类专业教材编写出版规划，共列入教材220种。这些教材都是从学校使用两遍以上、实践证明是比较好的讲义中遴选的，专业教学指导委员会从兵工专业教材建设的整体考虑对编写大纲进行了审查，认为符合兵工专业培养人才要求，符合国家出版方针。这批教材的出版必将为兵工专业教材的系列配套，为教学质量的提高、培养国防现代人才，为促进兵工类专业科学技术的发展，都将起到积极的作用。

本教材由赵双全主审，经中国兵器工业总公司光学技术专业教学指导委员会复查，兵总教材编审室审定。

限于水平和经验，这批教材的编审出版难免有缺点和不足之处，希望使用本教材的单位和广大读者批评指正。

中国兵器工业总公司教材编审室

1995年8月

前 言

自第一台激光器——红宝石激光器诞生以来，短短几十年，激光技术的发展非常迅速。它已广泛应用于科学研究、工农业、军事及医疗等许多领域。激光器电源是激光装置的重要组成部分。其性能好坏直接影响整个激光装置的技术指标。从这个意义上来说，无论是固体激光器、气体激光器，还是半导体激光器，其电源的研制，都是一件值得重视的问题。

国内出版了不少有关激光原理及应用方面的书籍，但尚未见到有关激光器电源的专著。本书是作者在多年教学和科研的基础上，查阅许多参考文献而写成。目的在于，除满足教学需要外，也希望能对从事激光器电源技术的科技人员提供帮助。

从内容上看，本书可分成三部分：

1. 介绍了激光器电源中使用的几种电子器件，诸如晶闸管(SCR)、功率场效应晶体管(VMOS)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)。这几种器件各具特点，在激光器电源及电力电子学中有广泛应用。特别是IGBT，目前在国内还处于起步阶段，应用前景十分可观。此外，本书还介绍了一些特殊半导体器件，如雪崩晶体管、阶跃恢复二极管等。

2. 介绍了开关稳压电源。开关稳压电源比线性稳压电源有许多优点。开关稳压电源原理在激光器电源中的应用大大促进了激光器电源技术的发展，不仅提高了激光器电源的效率和可靠性，而且明显减小了电源的体积和重量。本书第二章介绍了开关型激光器电源的基础知识及设计方法。

3. 本书第三到第六章分别叙述了固体激光器电源、气体激光器电源和半导体激光器电源的工作原理。除了注重必要的理论分析外，还介绍若干典型电路，供读者参考。

本书第一、二、四和第五章由梁国忠副教授编写，绪论、第三和第六章由梁作亮教授编写。

本书由中科院长春光机所赵双全副研究员担任主审，经吉林工业大学申铨国教授复查。长春光机学院沈柯教授、姜晓华副教授及中科院上海光机所王世贵高级工程师对本书的编写给予很多支持和帮助。在讨论编写大纲时，吉林大学魏振乾副教授也提出不少宝贵意见。作者对以上同志表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不妥和错误之处，欢迎读者批评指正。

作者

1995. 12. 15

目 录

绪论	(1)
第一章 激光器电源中的电子器件	(5)
1.1 晶闸管	(5)
1.2 功率场效应晶体管	(15)
1.3 绝缘栅双极晶体管	(24)
思考题	(29)
第二章 开关型激光器电源基础	(31)
2.1 引言	(31)
2.2 开关稳压电源原理分析	(33)
2.3 开关稳压电源的设计考虑	(40)
思考题	(53)
第三章 固体激光器电源	(54)
3.1 固体激光器对电源的要求	(54)
3.2 基本的储能器充电过程	(56)
3.3 储能器最佳充电电路	(59)
3.4 恒流变换器	(66)
3.5 阶梯充电电路	(74)
3.6 恒功率充电电路	(78)
3.7 带有限流元件的充电电路	(83)
3.8 逆变器充电电路	(88)
3.9 激光器电源的幅值稳定电路	(92)
3.10 储能器的放电电路	(97)
3.11 氙灯的触发电路	(110)
3.12 固体脉冲激光器电源总体设计	(114)
3.13 连续固体激光器电源	(117)
思考题	(124)
第四章 气体激光器电源	(125)
4.1 引言	(125)
4.2 He-Ne 激光器电源	(130)
4.3 CO ₂ 激光器电源	(139)
4.4 Ar ⁺ 激光器电源	(144)
4.5 气体脉冲放电激光器电源	(145)
思考题	(149)
第五章 半导体激光器电源	(150)
5.1 概述	(150)
5.2 快速晶闸管开关电路	(152)

5.3	雪崩晶体管电路	(155)
5.4	高频功率晶体管电路	(159)
5.5	用VMOS管形成快速脉冲	(160)
5.6	阶跃恢复二极管电路	(162)
5.7	连续半导体激光器电源	(166)
5.8	半导体激光器电源的调试	(167)
5.9	半导体激光器的温度控制	(172)
5.10	光脉冲信号源	(176)
	思考题	(179)
第六章	激光器电源的控制电路	(180)
6.1	概述	(180)
6.2	晶闸管的触发电路	(182)
6.3	同步信号源与延时电路	(188)
6.4	电源的保护与抗干扰电路	(191)
6.5	激光调制电路	(194)
6.6	微机在激光器电源中的应用	(198)
	思考题	(201)
	参考文献	(202)

绪 论

一、激光器电源的发展概况及特点

1. 激光器电源的发展历程

激光器电源是激光器装置的重要组成部分。它随着激光器的发展而不断完善。

激光器的泵浦方式有多种,有光激励、放电激励、化学激励、核能激励等。采用光激励和放电激励时,激光器必须配有一台与其相适应的供电电源。对固体激光器电源来说,它的负载为一气体放电器件。例如Nd:YAG激光器的工作物质为一掺钕钇铝石榴石晶体,该晶体就是吸收气体放电器件——脉冲氙灯在弧光放电时 $0.7\sim 0.9\mu\text{m}$ 范围内的光能而形成受激辐射的。为了点燃脉冲氙灯,必须具有用电容器作储能器的放电电路,以及储能电容器的充电电路、氙灯的触发电路,它们实际上就组成一个完整的激光器电源电路。

最初出现的固体激光器电源采用直流电源经过限流电阻R给储能电容器C充电,即RC充电方式。这样构成的电源只能在低重复频率下及要求电源的充电效率不高的场合使用。随着新型激光装置的不断出现,对激光器电源提出了高效率、高重复频率、低成本和高可靠性等诸多要求。为了满足在低频大能量工作下的激光装置例如红宝石激光器、钕玻璃激光器,而研制出LC恒流充电电路。其特点是以恒定电流给储能电容器充电,既提高了充电效率又提高了电源的稳定性。为了满足高重复频率的激光装置,研制出直流LC谐振充电式电源。它有效地解决了激光器电源在高频下工作的充电效率问题,并克服了脉冲氙灯的连通现象。存在的主要问题是体积和重量不能明显减小,但这种类型的电源目前仍广泛使用。

为了进一步减小体积和重量并提高充电精度,人们又把开关电源技术引入激光器电源中。80年代初出现了用快速晶闸管作电子开关的逆变器充电电路,它的出现解决了电源存在的体积和重量问题。但是,晶闸管的工作频率限制在10kHz以下,并且控制电路比较复杂。

随着电子学技术的不断进步及制造工艺的不断完善,出现了自行关断的功率场效应晶体管(VMOS)和绝缘栅双极晶体管(IGBT)。尤其是IGBT兼有VMOS和大功率晶体管的优点,具有高速度、高可靠性、低功耗等特点,被逐步应用于大功率开关型激光器电源之中。80年代后期出现的IGBT大功率逆变电源,使激光器电源向高效率高可靠性方面前进一大步,基本上满足了不同使用者的要求。同时,计算机技术也进入激光器电源中,用微机控制的多功能激光器电源相继问世。

激光器电源中的放电电路直接影响激光器的转换效率,因此人们不断地研究改进放电电路,使其更好地与放电器件的电学参数匹配。放电电路已从最初的电容放电发展成单节LC放电和多节LC放电方式,并从理论上解决了放电电路最佳参数的设计问题。在放电电路中引入预燃电路,不仅能提高电光转换效率,而且能有效地抑制电源中的放电干扰问题。

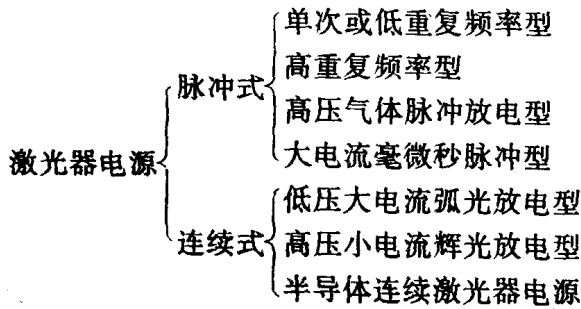
气体激光器电源和半导体激光器电源的发展历程与固体激光器电源有相似之处,这里不再叙述。

2. 激光器电源的特点

激光器电源因激光器不同而异,每一种激光器必须有与其相适应的电源。由于激光器的

工作方式不同，有在脉冲状态下工作的，也有在连续状态下工作的，因而激光器电源也相应地分为脉冲式和连续式两种类型。例如，固体脉冲激光器电源中的脉冲氙灯工作在脉冲弧光放电状态，放电电流可达几千安培；He-Ne 气体激光器则工作在直流连续状态，工作电流只有几毫安到几十毫安；固体连续激光器及某些离子激光器工作在低压大电流状态，工作电流一般在几安培到几十安培；而准分子激光器则要求工作电压上万伏，脉冲宽度为毫微秒量级的高频状态。因此，激光器电源的特点可概括如下：

(1) 无论是固体的、气体的，还是半导体的激光器电源，都有脉冲式和连续式两种类型，如下所示：



而且，这些电源的电压和电流都有比较宽的工作范围。

(2) 对于负载是气体放电器件的激光器电源而言，它是一个多电源供电系统。除了要有一个主供电电源外，还要有一产生上万伏脉冲高压的触发电路及一预燃电源。

(3) 对于脉冲式激光器电源，要求整个供电系统按一定的时序进行控制。氙灯的点燃、预燃、储能电容器的充电和放电过程必须有严格的时间关系。此外，电源也受外界同步信号的控制。

作为一个例子，图 0-1 给出脉冲式固体激光器电源的方框图。它由专用供电电源(充电电路和放电电路)、预燃电路、触发电路及定时(同步)电路组成。

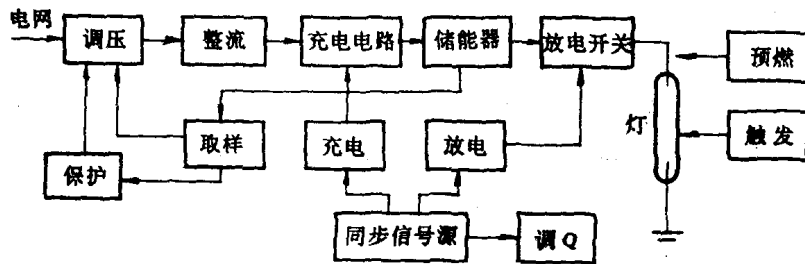


图 0-1 脉冲式固体激光器电源方框图

上述各部分电路的工作原理，将在第三章及第六章中介绍。

(4) 激光器电源是一个受控供电系统，在工作过程中，会辐射出很强的电磁干扰。在高压脉冲点灯过程、预燃放电路过程及主电路放电过程中都产生强的电磁辐射。如果不抑制这些干扰，电源往往不能正常工作。而且，它们会对邻近的电子仪器设备产生干扰。

以上列出的四个方面是激光器电源不同于一般电源的几个主要特点，在设计和制作激光器电源时，必须考虑这些问题。

二、激光器电源的技术指标

如上所述,激光器电源种类繁多。激光器用途不同,对电源提出的指标也不一样。对每一台具体的电源,总会有些特殊的要求。这里,我们以固体激光器电源为例,对几个主要技术指标进行说明。

(1) 输出功率,即激光器电源传送到负载上的功率。

对脉冲式电源,输出给氙灯的单次能量是一项基本的指标。如果储能电容器为 $100\mu\text{F}$,每次充电电压为 1kV ,则单次能量为 50J 。如果要求每秒工作 20 次,电源的输出功率就是 1kW ,可按以下公式进行计算

$$J_c = \frac{1}{2}CU_c^2 \quad (0-1)$$

$$P_o = J \cdot f \quad (0-2)$$

式中 C —— 储能电容器容量;
 U_c —— 充电电压终值;
 J —— 电源的输出能量;
 f —— 电源工作频率;
 J_c —— 电源输出的单次能量;
 P_o —— 电源的输出功率。

激光工作物质有效吸收的光谱范围很窄,电光转换效率较低,普通 YAG 激光器的电光转换效率只有 2% 左右。一台要求激光输出为 20W 的激光器,它的电源应输出 1kW 的电功率。如果电源本身的效率为 85% ,则这种激光器电源的输入功率为 1.2kW 。激光器输出功率的大小,与储能电容器的充电方式及其它电路结构有关系。

(2) 重复频率。重复频率是脉冲电源的一项重要指标,是指电源向负载每秒钟放电的次数。

一般情况下,固体激光器的重复频率为 1 次/s、 5 次/s、 10 次/s、 20 次/s或更高。通常把低于 1 次/s的电源,叫低重复频率电源,而把高于 1 次/s的电源叫高重复频率电源,目前已有 1000 次/s的超高重复频率电源。电源的重复频率是根据激光器的要求而决定的。

(3) 充电效率。储能电容器上获得的能量与充电电源提供的能量之比,称为充电效率。通常用下列公式表示:

$$\eta = \frac{J_c}{J} \quad (0-3)$$

式中 η —— 充电效率;
 J —— 充电电源提供的能量;
 J_c —— 电容器存储的能量。

充电效率的高低与充电电路有很大关系。充电效率高,说明充电电路的损耗小,因而充电电路中的元器件(特别是大功率开关器件)不容易发热,能保证电源长时间可靠运行。充电效率高是衡量激光器电源性能好坏的一项十分重要的指标。在第三章中,将详细讨论如何提高充电效率。

(4) 充电精度。大多数激光系统要求激光输出稳定。要做到这一点，就要求泵浦光源发出的光稳定。对激光器电源而言，就要求储能电容器的充电电压稳定。目前，逆变式充电电路的充电精度可达 $\pm 1\text{V}/1\text{kV}$ ，即0.1%的充电精度。

为了达到满意的充电精度，必须采取有效的电路设计，这也是研究逆变式充电电路的重要内容。

(5) 体积和重量。随着激光技术的应用和发展，对激光器电源的体积和重量的要求愈来愈高。过于笨重的激光器电源给应用带来不便，甚至失去实用价值。提高充电效率，是减小电源体积和重量的有效途径。

(6) 可靠性。激光器电源必须有很高的可靠性。连续工作状态的电源，应保证长期运行而不出故障。脉冲工作状态的电源，也应在几百小时之内不出现故障。

第一章 激光器电源中的电子器件

激光器电源要使用许多种不同类型的电子器件。早期的电源曾经大量使用电子管、闸流管。随着半导体技术的发展,新型半导体器件不断涌现。后来的激光器电源主要使用双极晶体管、晶闸管、大功率场效应管及绝缘栅双极晶体管等。这些器件具有体积小、重量轻、转换速度快、易于控制等特点。它们的使用,促进激光器电源技术的飞速发展。

本章重点介绍在各种激光器电源(固体的、气体的和半导体的)中经常遇到的电子器件,即晶闸管、大功率场效应管和绝缘栅双极晶体管。虽然普通晶体管(双极晶体管)也是电源中一种常用器件,由于人们对它已经比较熟悉,本章不再介绍。

1.1 晶闸管

晶闸管(Thyristor)亦称可控硅(Silicon Controlled Rectifier, 缩写为SCR),于1956年研制成功。外形上,它可以看成是一个带有控制部件(控制极)的普通二极管整流器。但是,与普通二极管整流器相比,晶闸管不但可以用于整流,而且还具有调压、逆变及开关功能,因而,广泛应用于调压电源、静态开关、电池充电、电机控制、相位控制等领域。

晶闸管的这几种功能,在激光装置中经常遇到,例如构成激光器电源及其它控制电路。

一、工作原理及特性

1. 工作原理

晶闸管是一种 pnpn 四层三端器件,其结构示意图如图 1-1(a)所示。这四层半导体材料形成三个 pn 结,三端引线分别为阳极 A、阴极 K 和控制极 G。晶闸管的电路符号如图 1-1(b)所示,国产晶闸管器件的命名可参考有关手册中的说明。

在电路中,要使晶闸管正常导通,必须同时满足下面两个条件:

- (1) 阳极对阴极加正向电压;
- (2) 控制极对阴极加正向电压(或正向脉冲)。

而且,晶闸管还有一个重要特点,就是它一旦导通后控制极即失去控制作用,器件始终处于导通状态,除非阳极对阴极电压降低到很小,致使阳极电流降到某一数值之下。

上述工作原理可用图 1-2 来说明。这里,我们把晶闸管看成是由一对 pnp 和 npn 晶体管相互连接而成。

如果阳极 A 加正向电压为 E_A ,控制极 G 加正向电压为 E_G ,如图 1-3 所示,则对图中各结点应用克希荷夫定律,可写出以下关系:

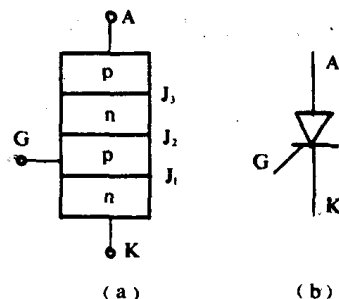


图 1-1 晶闸管的结构及符号

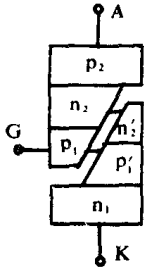


图 1-2 晶闸管相当于两个晶体管的组合

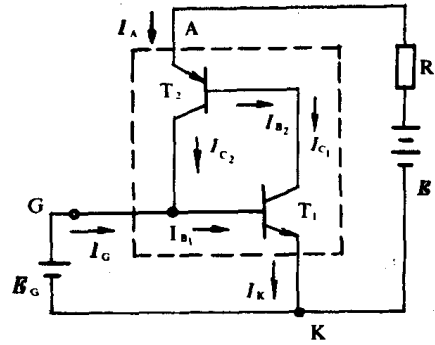
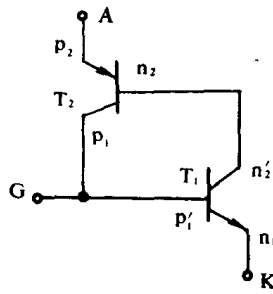


图 1-3 晶闸管工作原理分析

$$\left. \begin{aligned} I_K &= I_{E1} \\ I_A &= I_{E2} \\ I_{C1} &= I_{B2} \\ I_{B2} &= I_{E2} - I_{C2} \\ I_K &= I_{C1} + I_{B1} = I_A + I_G \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

此外

$$\left. \begin{aligned} I_{C1} &= \alpha_1 I_{E1} \\ I_{C2} &= \alpha_2 I_{E2} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中 α_1 ——晶体管 T_1 的电流放大系数；
 α_2 ——晶体管 T_2 的电流放大系数。

整理上述各式，可得到

$$I_{C1} = \alpha_1 I_{E1} = \alpha_1 (I_G + I_A) \quad (1-3)$$

$$\begin{aligned} I_{C1} = I_{B2} &= I_{E2} - I_{C2} \\ &= I_{E2} (1 - \alpha_2) = I_A (1 - \alpha_2) \end{aligned} \quad (1-4)$$

由式(1-3)和(1-4)解出 I_A ：

$$I_A = \frac{\alpha_1 I_G}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-5)$$

没有阳极电流通流时， $\alpha_1 + \alpha_2$ 很小，晶闸管中仅有少量的漏电流流过。随着控制极电流的出现， α_1 和 α_2 也增加，直至 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 时，式(1-5)的分母变为零，使得阳极电流达到无穷大。一旦出现这种情形，去掉控制极电流 I_G 也不会影响阳极电流 I_A 的大小。就是说，晶闸管导通后，其导通状态完全依靠器件本身的正反馈作用(见图 1-3)来维持，即使控制电流消失了，器件仍维持导通状态。欲使晶闸管关断，必须将阳极电压降到很低，使阳极电流减小而不能维持正反馈过程。

2. 特性曲线

晶闸管的导通与关断，是由阳极电压、阳极电流和控制极电流决定的，它们之间的关系就是晶闸管的伏安特性。图 1-4 给出晶闸管的伏安特性曲线。

• 实际工作中，受外接负载限制， I_A 仅为一定有限值。

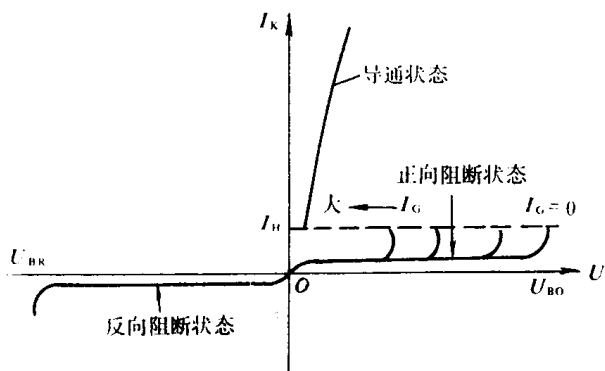


图 1-4 晶闸管的伏安特性曲线

首先考虑正向特性。当控制极不加电压(即 $I_G = 0$)而阳阴极间加正向电压时,结 J_1 和 J_3 正向偏置,结 J_2 反向偏置。在较低正向电压下,只有很小的漏电流 I_{FX} 。当正向电压很高时,反偏的 J_2 击穿,这时的正向电压叫做正向转折电压 U_{BO} 。晶闸管达到饱和时,阳阴极电压立刻下降到正向导通电压 U_F 。

现在考虑反向特性。当晶闸管的阳阴极间加反向电压(结 J_2 正向偏置、结 J_1 和 J_3 反向偏置)时,有一小的反向漏电流 I_{RX} (它近似等于 I_{FX})流动。反向电压增加时, I_{RX} 基本保持不变。当反向电压增加到某一数值时, J_1 和 J_3 雪崩击穿,反向电流剧增,这时所对应的电压叫做反向击穿电压 U_{BR} 。

从图 1-4 中也可看出,在正向特性中,当 $I_G > 0$ 时,晶闸管容易导通,正向转折电压降低。 I_G 愈大,正向转折电压愈低。

正向特性曲线中,导通之前的区域叫正向阻断区,导通之后的区域叫正向导通区。

3. 晶闸管的主要参数

(1) 断态重复峰值电压 U_{DRM} ——在控制极断路、额定结温时,允许每秒 50 次、每次持续时间不大于 10ms 重复加在器件上的正向峰值电压。这个电压规定为断态不重复峰值电压 U_{DSM} 的 80%,而后者应低于正向转折电压 U_{BO} ,所低数值一般由器件制造厂自行规定。

(2) 反向重复峰值电压 U_{RRM} ——控制极断路、额定结温时,允许重复加在器件上的反向峰值电压。这个电压规定为反向不重复峰值电压 U_{RSM} 的 80%。

(3) 额定电压——通常把 U_{DRM} 和 U_{RRM} 中较小的那个数值标作器件型号上的额定电压。

由于瞬时过电压也会使晶闸管遭到破坏,因而应选用晶闸管的额定电压为其正常工作峰值电压的 2~3 倍,作为安全系数。

(4) 通态平均电压 U_T ——通过正弦半波的额定通态平均电流和稳定的额定结温时,器件阳极和阴极间电压降的平均值,一般称作管压降。

(5) 通态平均电流 I_T ——在环境温度为 $+40^\circ\text{C}$ 和规定冷却条件下,器件在电阻性负载的单相工频正弦半波、导通角不小于 170° 的电路中,当稳定的额定结温时所允许的最大通态平均电流。

由于晶闸管的过载能力小,应选用晶闸管的通态平均电流为其正常电流平均值的 1.5~2 倍,使其有一定的安全余量。

(6) 维持电流 I_H ——在室温和控制极断路的情况下，晶闸管被触发导通后，从较大的通态电流降至维持通态所必需的最小电流。

(7) 断态电压临界上升率 du/dt ——在额定结温和控制极断路条件下，使器件从断态转入通态的最低电压上升率。

实际应用中，晶闸管上的电压上升率太快时，会造成晶闸管误导通。

(8) 通态电流临界上升率 di/dt ——在规定条件下，由控制极触发使晶闸管导通时，晶闸管能够承受而不致损坏的通态电流的最大上升率。

(9) 开通时间 t_{on} ——在规定温度下，晶闸管阳极阴极间加正向电压，从控制极加上幅度足够大的触发信号时起，到器件进入导通状态所需的时间。

(10) 关断时间 t_{off} ——在规定温度下，器件从切断通态电流起到恢复阻断能力为止所需的时间。

(11) 控制极触发电压 U_G 、电流 I_G ——在规定的环境温度和阳极阴极间加一定正向电压的条件下，使晶闸管从阻断到导通所需的最小控制极触发电压和电流。

在用晶闸管构成的激光器电源中，为减小功耗及管的发热状况，应选择 U_T 较小的晶闸管。此外，为提高电源的工作速度和可靠性，应选用 t_{on} 、 t_{off} 较小及 du/dt 、 di/dt 适当的晶闸管。

二、可控整流与调压

整流与调压是晶闸管的常见功能，广泛用于单相或三相电路中。这里，仅讨论晶闸管单相半波整流和半控桥整流情况。

1. 单相半波可控整流电路

(1) 电阻性负载

这种单相半波整流电路及主要波形如图 1-5 所示。

在变压器次级电压 u 的正半周 $0 \sim \omega t_1$ 期间，晶闸管 SCR 虽然加正向阳极电压，但控制极未加触发脉冲，它不导通。

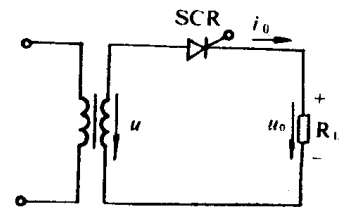
在 ωt_1 时刻，触发脉冲 u_G 出现，SCR 导通，电压 u 加在负载 R_L 两端，输出电压 $u_o = u$ 。

当电压 $u = 0$ 时，SCR 的电流小于其维持电流而关断。

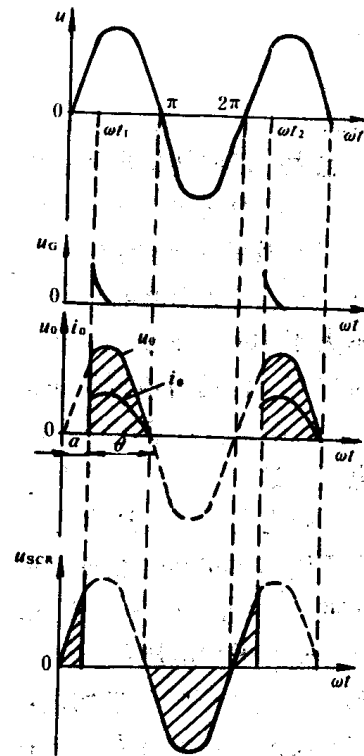
在变压器次级电压 u 的负半周，晶闸管 SCR 承受反向电压，它不导通。一直到下个正半周的 ωt_2 时刻又出现触发脉冲 u_G 时，SCR 再次导通。

几点主要电压电流波形示于图 1-5(b)。由于是电阻性负载，输出 u_o 和 i_o 的波形相同。

由上面的讨论可知，改变触发脉冲 u_G 加入的时刻，



(a)



(b)

图 1-5 单相半波整流电路
(电阻性负载)

就能改变输出电压 u_o 的波形及输出电压的大小。

在图 1-5(b) 中, 我们把晶闸管在正向电压下不导通的范围叫移相角, 用 α 表示。而把晶闸管导通的范围叫导通角, 用 θ 表示。

可以求出输出电压与移相角的关系。

设 $u = \sqrt{2}U\sin\omega t$, 其中 U 即变压器次级电压的有效值, 则输出电压的平均值 \bar{U}_o 为

$$\begin{aligned}\bar{U}_o &= \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U\sin\omega t d(\omega t) \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2\pi} U(1 + \cos\alpha) \\ &= 0.45U \frac{1 + \cos\alpha}{2}\end{aligned}\quad (1-6)$$

可见, 改变移相角 α 就改变了输出电压的大小, 这就达到调压的目的。

当 $\alpha=0$ 时, $\bar{U}_o=0.45U$ 。这相当于普通二极管半波整流情形。

负载中整流电流的平均值 \bar{I}_o 为

$$\bar{I}_o = \frac{\bar{U}_o}{R_L} = \frac{0.45U}{R_L} \cdot \frac{1 + \cos\alpha}{2}\quad (1-7)$$

变压器次级电流的有效值 I 为

$$\begin{aligned}I &= \frac{1}{R_L} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2}U\sin\omega t)^2 d(\omega t)} \\ &= \frac{U}{R_L} \sqrt{\frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{2\pi}}\end{aligned}\quad (1-8)$$

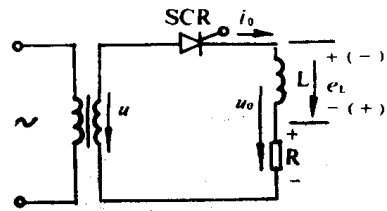
(2) 电感性负载

电感性负载可用电感 L 及电阻 R 来表示, 如图 1-6 所示。

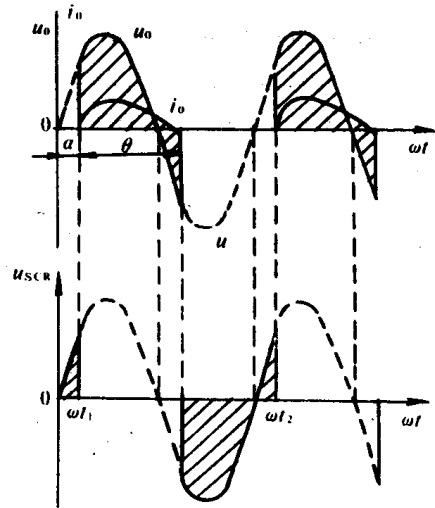
当晶闸管刚导通时, 电感 L 中产生阻碍电流变化的感应电动势(图中, e_L 为上正下负)。由于电感中电流不能突变, 它由零逐渐上升。当电流达最大值时, 感应电动势为零, 之后电流减小, 电动势 e_L 也改变极性(下正上负)。直到 u 达零值之前, e_L 和 u 同极性, 晶闸管 SCR 当然能导通。即使 u 过零变负后, 只要 e_L 大于 u , SCR 就承受正向电压, 电流仍继续流通。该电流大于维持电流时, SCR 不关断, 负载上出现负电压。当电流下降到维持电流以下时, SCR 关断。

上述过程示于图 1-6(b)。可以看出, 单相半波可控整流电路带电感性负载时, 晶闸管的导通角 θ 将大于 $(\pi - \alpha)$ 。 L 愈大, θ 愈大, 则整流器输出电压和电流的平均值愈小。

输出电压的平均值 \bar{U}_o 为



(a)



(b)

图 1-6 单相半波整流电路(电感性负载)