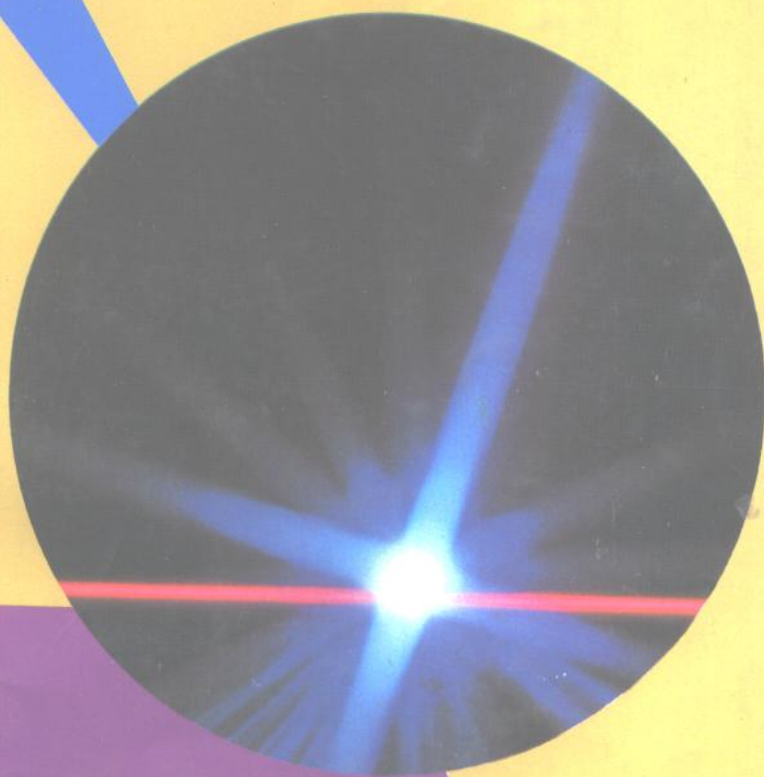


激光器件与技术

激光器件与技术

刘敬海 徐荣甫 主编



北京理工大学出版社

激光器件与技术

刘敬海 徐荣甫 等编著

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书为高等院校统编教材，是一本有关激光器件与技术方面的专业性教材。其内容共分十章，系统介绍各类激光器件与技术的基本原理、装置结构和工作特性。主要内容包括有氮-氦激光器、二氧化碳激光器，一般固体激光器、激光调制和调Q激光器、超短脉冲激光器、选模和放大器件、激光变频和可调谐激光器、其它激光器等。可供72讲课学时用。

本书的特点是将激光器件与激光技术有机地结合起来，并尽可能使之融为一体，在取材方面力求反映国内外最近的成果和水平，在阐述上力求深入浅出，理论联系实际，以便于读者自学。

本书主要用作高校光电子技术专业及相关专业本科生教材，也可供研究生及从事激光器件和技术工作的有关科技人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

激光器件与技术/刘敬海，徐荣甫主编. —北京：北京理工大学出版社，1995. 12

ISBN 7-81045-058-1

I. 激… II. ①刘… ②徐… III. ①激光器-高等学校-教材②激光技术-高等学校-教材
IV. ①TN248②TN24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 13868 号

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路7号)

(邮政编码100081)

各地新华书店经售

北京房山先锋印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 20印张 488千字

1995年12月第一版 1995年12月第一次印刷

印数：1—2000册 定价：15.80元

※图书印装有误，可随时与我社退换※

前言

本书系全国普通高等学校（兵工类）夜视与激光教学指导委员会审定的统编教材之一。

本书是“激光器件与技术教程”（1986年出版）的修订本。修订的原因是：（1）原教材按100学时编写，全书83万字，由于贯彻加强基础、扩大专业面的教改精神，本课程已压缩为72或54学时，因此，教材必须精简；（2）根据近几年的教学实践，原教材应作一些调整和改进，特别是新的激光技术正在不断发展，必须推陈出新，把最近国内外发展起来的激光新技术内容充实进去；（3）1986年出版的本教材早已销售一空，为满足有关高校专业教学和工程技术人员的需求，必须尽快出版原教材的修订本。

本教材的特色有：（1）将相同或相似的内容放到一起，有利于缩减学时。例如：固体激光器件的YAG、钕玻璃和红宝石等器件都是由谐振腔、工作物质和泵浦系统所组成。如果以YAG、钕玻璃、红宝石……为序分别讲解，势必有些内容重复。我们将固体激光器融为一体，采取先介绍整体概念再分别阐述谐振腔、工作物质和泵浦系统，这样处理不仅有利于减少学时，而且，利于比较各种激光器的特点。又如电光调Q、声光调Q与调制、偏转技术，其理论基础都是电光效应和声光效应，我们将这些部分放到一起，先介绍理论基础，再讲相应技术，则大大缩减了学时。（2）将器件与技术融为一体，例如，将主要应用于气体He-Ne激光器的稳频技术结合到He-Ne激光器中去讲，把激光的纵模选择和调谐问题放到与之密切相关的可调谐激光器件中讲解，这样结合不仅有利于精简内容，压缩学时，而且也更有利于深入讲解He-Ne、染料等一类重要器件。（3）本教材增加了反映国内外新技术发展的内容，例如，半导体激光泵浦的固体激光器、射频激励的CO₂激光器件、准分子激光器、固体可调谐技术、高重频和高功率、单横模（TEM₀₀）技术等。（4）本教材理论密切联系实际，所有的激光器件与技术内容均采用现有的典型结构和模型，以便于结合实物教学。与本教材密切相关的还有实验环节，通过实验使学生加深对激光器件与技术的理解，同时培养学生的动手能力。

全书共十章，把相关器件与技术的内容融合在一起讲，不再分器件与技术两大部分的格式编写。本着由浅入深，便于进行直观演示等，先介绍He-Ne等气体器件，然后介绍各类固体器件与技术，新发展起来的器件放到最后。

本书由刘敬海、徐荣甫主编。刘敬海负责编写前五章，徐荣甫负责编写后五章，其中§5.4（半导体激光泵浦系统）和§10.1（半导体激光器）由孙志勇编写，第九章由张国威、雷海容编写，第六章由雷海容和徐荣甫编写，§3.5（射频激励的CO₂激光器）由辛建国编写。全书由沈柯教授主审。

在讨论本教材的编写大纲过程中，沈柯教授、倪国强教授等全体编审委员提出了许多宝贵意见，在编写过程中得到了北京理工大学四三一教研室全体同志的帮助，在此向这些同志一并表示感谢。

欢迎广大师生和专家对本教材提出批评和指正。

作者 1995年10月

目 录

第一章 概述	(1)
§ 1-1 激光器的分类及特点	(1)
§ 1-2 激光器的基本组成及泵浦方式	(4)
第二章 氦-氖气体激光器	(7)
§ 2-1 He-Ne 激光器的结构及工作原理	(7)
§ 2-2 He-Ne 激光器的输出功率及稳定性	(12)
§ 2-3 He-Ne 激光器的频率特性及稳频	(22)
§ 2-4 He-Ne 激光器的其它输出特性	(28)
第三章 二氧化碳激光器	(33)
§ 3-1 二氧化碳激光器的工作原理	(33)
§ 3-2 纵向放电激励的封离型连续 CO ₂ 激光器	(40)
§ 3-3 横向激励的高气压 CO ₂ 激光器	(49)
§ 3-4 CO ₂ 波导激光器	(56)
§ 3-5 射频横向激励 CO ₂ 激光器	(60)
第四章 其它气体激光器	(66)
§ 4-1 氮分子激光器	(66)
§ 4-2 氙离子激光器	(72)
§ 4-3 He-Cd 镭离子激光器	(76)
§ 4-4 准分子激光器	(81)
第五章 一般固体激光器	(86)
§ 5-1 固体激光器的能量转换环节	(86)
§ 5-2 固体工作物质	(87)
§ 5-3 灯泵浦系统	(95)
§ 5-4 热效应、冷却与滤光	(108)
§ 5-5 连续和长脉冲固体激光器	(114)
§ 5-6 半导体激光二极管泵浦的固体激光器	(123)
第六章 激光调制和调 Q 激光器	(126)
§ 6-1 调 Q 原理及速率方程	(126)
§ 6-2 电光调 Q 激光器	(134)
§ 6-3 可饱和吸收调 Q 激光器	(148)
§ 6-4 声光调制和调 Q 激光器	(153)
§ 6-5 透射式调 Q 激光器	(163)
§ 6-6 激光调制与偏转	(168)
第七章 超短脉冲激光器	(185)

§ 7-1 概述	(185)
§ 7-2 锁模原理	(186)
§ 7-3 锁模方法及锁模激光器	(192)
§ 7-4 单脉冲选取及脉宽测量	(206)
§ 7-5 高功率锁模/调Q激光器	(211)
第八章 选模、放大和高功率、单横模激光器件	(214)
§ 8-1 激光选模器件	(214)
§ 8-2 激光放大器件	(223)
§ 8-3 高重频、高功率、单横模 (TEM_{00}) 激光器	(235)
第九章 激光变频和可调谐激光器	(241)
§ 9-1 染料激光器	(241)
§ 9-2 过渡金属离子激光器	(261)
§ 9-3 光学非线性波长变换技术	(271)
§ 9-4 其他可调谐激光器	(280)
第十章 其它激光器	(284)
§ 10-1 半导体激光器	(284)
§ 10-2 自由电子激光器	(300)
§ 10-3 化学激光器	(306)
参考资料	(312)

第一章 概 述

§ 1-1 激光器的分类及特点

1960年,美国的梅曼(Maiman)首先在实验室用红宝石晶体获得了激光输出。此后,激光器件和技术获得了突飞猛进的发展,相继出现了种类繁多的激光器件。

激光器的分类方法有许多种,按产生激光的工作物质不同可分为气体激光器、固体激光器、半导体激光器、液体激光器、化学激光器、自由电子激光器等。

气体激光器以气体或金属蒸气为发光粒子,它是目前种类最多、激励方式最多样化、激光波长分布区域最宽、应用最广泛的一类激光器。自从1961年氦氖激光器问世以来,相继出现了各种类型的气体激光器,这些激光器可分为三大类:原子、分子、离子气体激光器。在原子气体激光器中,产生激光作用的是没有电离的气体原子,所采用的气体主要是氦、氖、氩、氪、氙等惰性气体,有时也采用氯、溴、碘、氮、硫、碳、氧等原子气体,或铯、镉、铜、锰、锡等金属原子蒸气。其典型代表是氦氖激光器。在分子激光器中,产生激光作用的是没有电离的气体分子,所采用的分子气体有:CO、N₂、O₂、CO₂、N₂O和水蒸气等。分子激光器的典型代表是CO₂激光器和氮分子(N₂)激光器。准分子激光器,工作气体在常态下为原子,当激发时,可暂时形成寿命很短的分子,称为准分子。常采用的准分子有:Ar₂^{*}、Xe₂^{*}、XeF^{*}、KrF^{*}、ArF^{*}、XeCl^{*}、XeBr^{*}、XeO^{*}、KrO^{*}等。离子气体激光器是利用电离后气体离子产生激光作用,主要有惰性气体离子和金属蒸气离子。离子激光器的典型代表是氩离子(Ar⁺)和氦-镉(He-Cd)离子激光器。气体激光器比其他激光器有着突出的优点:首先它所发射的谱线分布在一个很宽的波长范围内,目前,已经观测到的激光谱线不下万余条,其波长几乎遍布了从紫外到远红外整个光谱区。4mm波长的激光器以及波长为0.1nm~10nm的X射线激光器也在研制中。其次,由于气体工作物质均匀性较好,使得输出光束的质量较高,如He-Ne激光器的单色性很高, $\Delta\lambda$ 很容易达到 $10^{-9}\sim 10^{-11}$ nm,比固体和半导体激光小得多,因此,它是很好的相干光源。又如He-Ne激光的发散角只有1~2mrad,比一般的固体和半导体激光器小得多,可以很好地用来准直、导向。再次,气体激光器很容易实现大功率连续输出,如二氧化碳激光器目前可达万瓦级,为材料加工提供了一个很好的能源。此外,气体激光器还具有转换效率高、工作物质丰富、结构简单、造价低廉等优点。由于气体激光器具有以上优点,在工农业生产、国防和科学研究中,它被广泛应用于准直导向、计量、材料加工、全息照相以及医学、育种等各个方面。由于气体原子(分子)的浓度低,一般不利于做成小尺寸大能量的脉冲激光器。但近年来,气体激光技术有重大突破,小型和大能量的气体脉冲激光器也已出现,并开始与固体脉冲激光器进行竞争。

固体激光器是将产生激光的粒子掺于固体基质中。工作物质的物理、化学性能主要取决于基质材料,而它的光谱特性则主要由发光粒子的能级结构决定,但发光粒子受基质材料的影响,其光谱特性将有所变化,有的甚至变化很大。固体工作物质中,发光粒子都是金属离子,称之为激活离子。目前,可作激活离子的元素有四大类:(1)过渡族金属离子,如铬

(Cr^{3+})、镍(Ni^{2+})、钴(Co^{2+})等。(2)三价稀土金属离子,如钕(Nd^{3+})、镨(Pr^{3+})、钐(Sm^{3+})、铕(Eu^{3+})、镝(Dy^{3+})、铽(Ho^{3+})、铒(Er^{3+})、镱(Yb^{3+})等。(3)二价稀土金属离子,如钐(Sm^{2+})、铒(Er^{2+})、铥(Tm^{2+})、镱(Dy^{2+})等。(4)铜系离子,这类离子大部分为人工放射元素,不易制备,其中只有铀(U^{3+})曾有所应用。工作物质的基质材料应能为激活离子提供合适的配位场,并应具有优良的机械性能、热性能和光学质量。基质材料分为玻璃和晶体两大类。最常用的基质玻璃有:硅酸盐、硼酸盐和磷酸盐玻璃等。用作基质的主要晶体有:(1)金属氧化物晶体,如蓝宝石 Al_2O_3 、氧化钇 Y_2O_3 、钇铝石榴石 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG)、钇镓石榴石 $\text{Y}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (YGaG)、钆镓石榴石 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (GdGaG)和钆钪石榴石(GdScAG)等;(2)铝酸盐、磷酸盐、硅酸盐、钨酸盐等晶体,如铝酸钇 YAlO_3 (YAP)、氟磷酸钙 $\text{Ca}(\text{PO}_4)_3\text{F}$ 、五磷酸钕 $\text{NdP}_5\text{O}_{14}$ 、硅酸氧磷灰石 CaLaSO_4 、钨酸钙 CaWO_4 等;(3)氟化物晶体,如氟化钙 CaF_2 、氟化钡 BaF_2 、氟化镁 MgF_2 等。目前能实现激光振荡的固体工作物质多达百余种,激光谱线多达数千条。其中典型的代表是 $\text{Na}^{3+}:\text{YAG}$ 、红宝石、钕玻璃激光器。固体激光器的突出特点是:产生激光的粒子掺于固体物质中,其浓度比气体大,因而可获得大的激光能量输出,单个脉冲输出能量可达万焦耳,脉冲峰值功率可达几十太瓦。但因固体热效应严重,连续输出功率不如气体高,可达千瓦级水平。固体激光器具有能量大、峰值功率高、结构紧凑、牢固耐用等优点,广泛应用于工业、国防、医疗、科研等方面。

半导体激光器是以半导体为工作物质。常用的半导体激光器材料是GaAs(砷化镓)、CdS(硫化镉)、PbSnTe(碲锡铅)等。半导体激光器有超小型、高效率、结构简单、价格便宜等一系列特点。在光纤通信、激光唱片、光盘、数显、准直、引信等领域得到广泛应用。

液体激光器可分为两类:有机化合物液体(染料)激光器(简称染料激光器)和无机化合物液体激光器(简称无机液体激光器)。虽然都是液体,但它们的受激发光机理和应用场合却有着很大的差别。由于染料激光器已获得了越来越广泛的应用,本书主要介绍这类液体器件。已发现的有实用价值的染料约有上百种。最常用的有若丹明6G、隐花青、豆花素等,染料激光器的特点是:

(1)激光波长可调谐且调谐范围宽广,它的辐射波长已复盖了从紫外321nm至近红外1.3 μm 谱区,某些染料激光波长连续可调范围达上百纳米;

(2)可产生极短的超短脉冲,目前脉冲宽度已压缩到 $3\times 10^{-15}\text{s}$;

(3)可获得窄的谱线宽度,目前脉冲染料激光的线宽可达 $6\times 10^{-5}\text{nm}$,连续染料激光可达 10^{-6}nm 。

这些可贵的特性使染料激光器获得了迅速发展,并广泛应用到光生物学、光谱学、光化学、同位素分离、全息照像等技术中。

化学激光器是基于化学反应来建立粒子反转的,例如氟化氢(HF)、氟化氘(DF)等化学激光器。化学激光器的主要优点是能把化学能直接转换成激光能,不需要外加电源或光源作为泵浦源,在缺乏电源的地方能发挥其特长。在某些化学反应中可获得很大的能量,因此可得到高功率的激光输出。

自由电子激光器不是利用原子或分子受激辐射,而是利用电子运动的动能转换为激光辐射的,因此它的辐射波长可以在很宽的范围内(从毫米波直到 x 光)连续调谐,而且转换效率高(可达50%)。

按工作方式分,激光器可分为连续工作和脉冲工作两大类。

按激光技术分，激光器可分为静态脉冲激光器（谐振腔的Q值不变）、调Q（谐振腔的Q值可调，如转镜调Q、电光晶体调Q、染料调Q、可饱和吸收晶体调Q、声光调Q等）激光器、锁模（主动锁模、被动锁模、对撞锁模等）激光器或称锁相激光器、倍频（激光波长成倍变化）激光器、可调谐（激光波长连续可调）激光器、单模（单纵模和单横模）和多模激光器等。

主要激光器的性能列入表1-1中。图1-1表示出了各类激光器的波长覆盖范围。

表 1-1 主要激光器的性能比较

激 光 器	运行方式	$\lambda(\text{nm})$	平均功率 W	峰值功率 KW	脉冲宽度	斜率效率%
红宝石	脉冲	694.3	1	$10\sim 10^4$	1ms~10ns	<0.1
Nd:YAG	连续	1064	150			1~3
Nd:YAG	脉冲	1064	400	10	1~5ms	1~3
Nd:YAG	调Q脉冲	1064	4	2×10^4	10~20ns	1~3
He-Ne	连续	632.8	$10^{-3}\sim 10^{-2}$			
Cu	脉冲	510.5	40	100	20~40ns	1
He-Cd	连续	325	0.1			
氩离子(Ar^+)	连续	514.5	10~150			<0.1
CO_2	连续	10.6 μm	$(1\sim 15)\times 10^3$			10~20
CO_2	脉冲	10.6 μm	10^3	10^4	0.1~0.5 μs	10
N_2	脉冲	337.1	0.1	10^3	10ns	<0.1
KrF	脉冲	248	100	5×10^3	10ns	1
若丹明 6G	脉冲	590	100	100	10 μs	0.5
HF 化学	连续	2.6~3.3 μm	10^4			
HF 化学	脉冲	2.6~3.3 μm		10^3		
GaAs 半导体	连续	840	10^{-2}			10

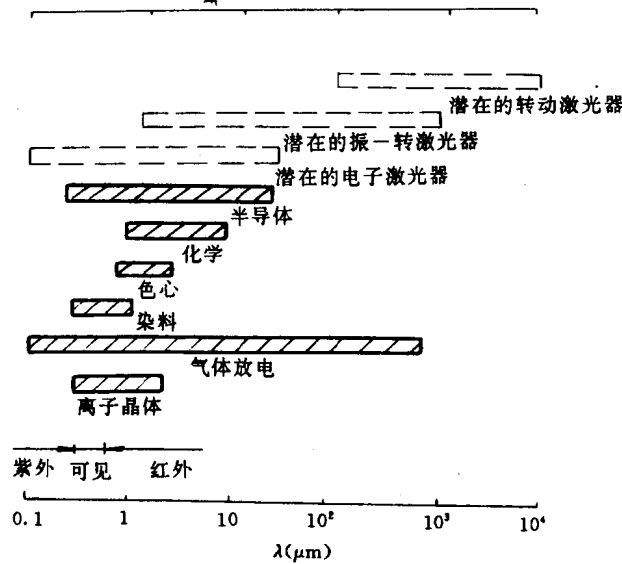


图 1-1 激光波长覆盖范围

§ 1-2 激光器的基本组成及泵浦方式

一、激光器的基本组成

尽管激光器种类繁多,结构各异,但其基本组成大都包括工作物质、谐振腔和泵浦系统三大部分。图 1-2 和图 1-3 分别为 He-Ne 激光器和固体激光器的结构简图。

工作物质是激光器的核心,在气体激光器中,产生激光的粒子在 He-Ne 激光器的毛细管中。在固体激光器中,产生激光的粒子是激活离子,如红宝石中的三价铬离子 Cr^{+3} , Nd^{+3} ; YAG 和钕玻璃中的三价钕离子 Nd^{+3} 等。固体工作物质通常加工成圆柱形,所以习惯称为激光棒。

谐振腔是激光器的重要部件,它不仅是形成激光振荡的必要条件,而且还对输出的模式、功率、光束散角等均有着很大影响。谐振腔由全反射镜和部分反射镜(或称输出反射镜)组成,激光由部分反射镜输出。反射镜多采用玻璃材料,表面镀介质膜形成必要的反射率。对于大能量大功率激光器,为防止反射镜被强光损坏,可采用金属反射镜,即在金属基底上镀金属反射层达到一定的反射率。中长红外波长的激光器输出镜要选用对该波长透射性能好的材料。根据实际情况可选用稳定腔、非稳腔或临界稳定腔。一般中小功率器件多用损耗小、阈值低的稳定腔或临界稳定腔,如 He-Ne 激光器多用平凹或共焦稳定腔。中小

型固体激光器多用平平腔或平凹稳定腔。非稳腔是随着高功率激光器的发展而发展起来的,它可以增大模体积,提高横模的鉴别能力,以实现高功率、单横模运转。

泵浦系统是为实现粒子数反转提供外界能量的系统。图 1-2 由高压电源通过毛细管中的气体放电构成泵浦系统。图 1-3 由高压充电电源、储能电容、脉冲氙灯、触发电路、聚光器构成泵浦系统。其工作过程是:电源通过氙灯放电产生光能,光能被聚光器会聚到工作物质

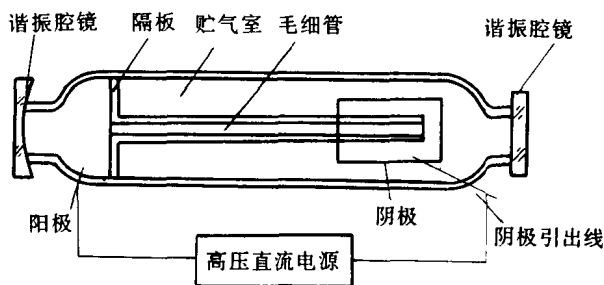


图 1-2 氦氖激光器的基本结构

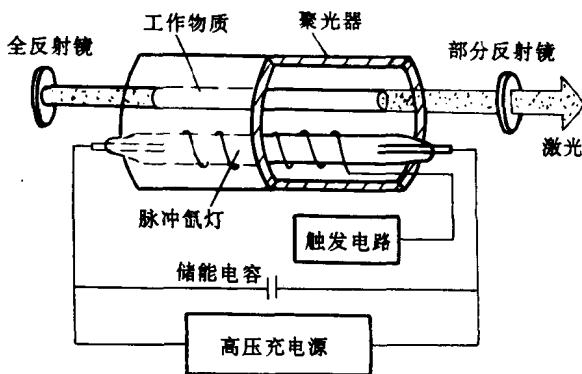


图 1-3 固体激光器的基本结构

上, 将工作物质中的粒子泵浦到上能级。

除了上述三大基本组成外, 不同用途的激光器, 还要加上不同的具有特殊用途的部件, 如调Q激光器要加Q开关, 倍频激光器要加倍频晶体, 锁模激光器要加锁模装置等等。大功率大能量的激光器还应有冷却系统, 以消除热效应带来的阈值升高、效率降低、光束质量变坏等不良影响。

二、激光器的激励方式

激光器的粒子数反转是由外界能量激励(或称激发, 或称泵浦)实现的, 其激励方式有多种, 主要的有:

1. 光激励

光激励是用光照射工作物质, 工作物质吸收光能后产生粒子数反转。光激励的光源可采用高效率高强度的发光灯、太阳能和激光。大多数固体激光器都是用连续或脉冲灯激励。用于太空中的激光器, 为减少从地面携带能源的麻烦, 可将太阳能集聚起来做为激励源。大多数工作物质都是谱线吸收, 为了提高泵浦效率, 可利用与工作物质吸收谱相对应的激光做为激励源。由于半导体激光器体积小, 用半导体激光激励是固体激光器小型化的发展方向。

2. 放电激励

在高电压下, 气体分子会发生电离导电, 人们把这种现象称为气体放电。在放电过程中, 气体分子(或原子、离子)与被电场加速的电子碰撞, 吸收电子能量后跃迁到高能级, 形成粒子数反转。气体放电是气体激光器常用的一种激励方法, 与光激励相比, 由于它减少了电-光转换环节, 激发效率可以提高。

可采用的气体放电形式有直流、交流、射频、脉冲等多种。在气体放电管两电极上加直流电压的放电为直流放电。根据放电电流的大小, 直流放电可分为辉光放电和弧光放电。辉光放电是高电压小电流(几毫安到几十毫安)放电, 弧光放电是低电压大电流(几十安培到几千安培)放电。He-Ne激光器和CO₂激光器是工作在辉光放电范围, 而氙离子激光器则是工作于弧光放电范围。满足辉光放电条件后, 放电管内充满均匀的辉光。从放电管侧面看辉光放电的整个空间, 可以看到明暗相间的八个区域, 如图1-4所示(八个区域的形成原因请参考有关气体放电的书籍)。其中

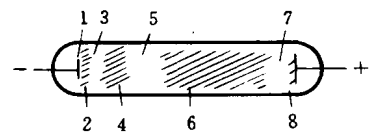


图1-4 正常辉光放电的光区

- | | |
|----------|---------|
| 1. 阿斯顿暗区 | 2. 阴极辉区 |
| 3. 阴极暗区 | 4. 负辉区 |
| 5. 法拉第暗区 | 6. 正柱区 |
| 7. 阳极暗区 | 8. 阳极辉区 |

比较重要的区域是负辉区和正柱区, 这两个区的电子密度高, 气体被碰撞激发的几率大, 因此采用辉光放电的气体激光器都利用这两个区。弧光放电空间分为三个区: 阴极区、放电光柱区、阳极区。放电光柱区是主要的发光区, 这里气温高, 电离程度高, 电流密度大。在放电管两极加交流电压的放电为交流放电, 其放电特性与直流放电没有根本区别, 所不同的是阳极和阴极交替改变。随着电压的周期性变化, 电流也周期性变化。当所加电压频率(射频)较高时, 放电情况与直流放电就不同了, 电子和离子从一个电极飞越到另一个电极的时

间远大于电源的变化周期, 电子不能作长距离运动, 电子只能在固定位置附近振荡。在振荡过程中与中性原子(分子)碰撞, 产生激发和电离, 以维持放电。高频放电时, 由于电子不断来回运动, 使电子飞越的路程增大, 从而使电子与气体粒子碰撞的几率增加, 电离能力大大加强。因此, 作为电子来源的阴极的重要性消失了, 此时放电可以用内电极, 也可用外电极(在放电管上绕两个金属环作电极), 甚至可以不用电极(将放电管置于高频振荡线圈之内)。

当放电管两个极上加脉冲电压时, 就产生脉冲放电。按放电电流密度的大小, 在管内或产生脉冲辉光放电或产生脉冲弧光放电。按脉冲时间长短又可分短脉冲放电和长脉冲放电。大功率高压激光器多采用短脉冲放电。用于激励固体激光器的脉冲氙灯就是利用脉冲放电工作的。

除气体放电外, 还可用电子枪产生的高速电子去泵浦工作物质, 使之跃迁到高能级, 称为电子束激励。

半导体激光器是靠注入的电流来泵浦的, 称之为“注入式”泵浦。

3. 热能激励

用高温加热方式使高能级上气体粒子数增多, 然后突然降低气体温度, 因高、低能级的热弛豫时间不同, 可使粒子数反转。气动 CO_2 激光器是热激发的典型例子, 如图 1-5 所示, 在高温(3000K 左右)室中, CO_2 的激光上能级 $00^{\circ}1$ 和激光下能级 $10^{\circ}0$ 上的粒子数都比室温时多得多, 但按玻尔兹曼分布, $10^{\circ}0$ 上的粒子数要比 $00^{\circ}1$ 上的粒子数多, 不能形成粒子数反转。当高温高压的 CO_2 气体通过狭窄的喷管喉头时, 因绝热膨胀, 气体温度骤然降为 300K 左右。由于 $00^{\circ}1$ 能级的弛豫时间比温度转变所用的时间长, 处于 $00^{\circ}1$ 态的粒子的温度来不及明显下降, 即这部分粒子数不会有明显变化。而 $10^{\circ}0$ 能级的弛豫时间与温度转变时间具有相同的数量级, 处于 $10^{\circ}0$ 态的粒子温度会急剧降低, 这部分粒子数就会急剧下降, 下降一段时间(例如到达图中 a 点)后, 便可实现粒子数反转。

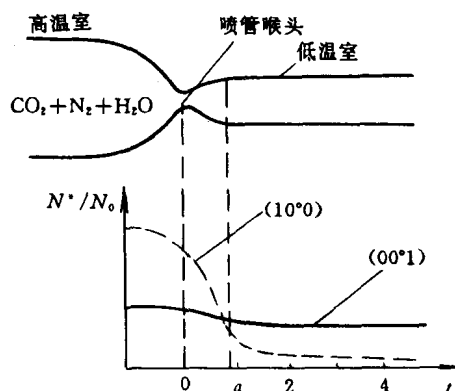


图 1-5 CO_2 上下能级粒子数的变化

4. 化学能激励

它是利用化学反应过程中释放的能量来激励粒子, 建立粒子数反转的。为产生化学反应, 一般还需采用一定的引发措施, 如采用光引发、电引发、化学引发等方式。

5. 核能激励

用核裂变反应放出的高能粒子、放射线或裂变碎片等来激励工作物质, 也可实现粒子数反转。用核能泵浦 CO 激光器, 效率可达 50%。

第二章 氦-氖气体激光器

氦-氖 (He-Ne) 激光器属原子激光器类,它是于 1961 年首先实现激光输出的气体激光器,能产生许多可见光与红外光的激光谱线。He-Ne 激光器多采用连续工作方式。其输出功率与放电毛细管长度有关,长度为 10cm 左右的管子,0.6328 μ m 单横模输出约 0.5mW; 20~30cm 的管子,输出约 2~6mW; 50cm 左右,约 8~10mW; 150~200cm 时,约 50mW。由于它输出的激光方向性好(发散角达 1mrad 以下)、单色性好($\Delta\nu$ 、可小于 20Hz)、输出功率和波长能控制得很稳定,又由于它具有寿命长、结构简单、造价低廉、使用方便、重量轻、体积小等优点,因此广泛用于精密计量、检测、准直、导向、全息照相、信息处理、以及医疗、光学实验等各个方面。近些年,黄光、绿光 He-Ne 激光器已经运转,调制光 He-Ne 激光器、磁起偏 He-Ne 激光器以及其它新型 He-Ne 激光器已有产品出售,这使 He-Ne 激光器的应用更加广泛。

§ 2-1 He-Ne 激光器的结构及工作原理

一、He-Ne 激光器的结构

He-Ne 激光器的结构形式很多,但都是由激光管和激光电源组成。激光管由放电管、电极和光学谐振腔组成,如图 1-2 所示。

放电管是氦-氖激光器的心脏,它是产生激光的地方。放电管通常由毛细管和贮气室构成。放电管中充入一定比例的氦(He)、氖(Ne)气体,当电极加上高电压后,毛细管中的气体开始放电使氖原子受激,产生粒子数反转。贮气室与毛细管相连,这里不发生气体放电,它的作用是补偿因慢漏气及管内元件放气或吸附气体造成 He、Ne 气体比例及总气压发生的变化,延长器件的寿命。放电管一般是用 GG17 玻璃制成。输出功率和波长要求稳定性好的器件可用热胀系数小的石英玻璃制作。

He-Ne 激光管的阳极一般用钨棒制成,阴极多用电子发射率高和溅射率小的铝及其合金制成。为了增加电子发射面积和减小阴极溅射,一般都把阴极做成圆筒状,然后用钨棒引到管外。

He-Ne 激光器由于增益低,谐振腔一般用平凹腔,平面镜为输出端,透过率约 1%~2%,凹面镜为全反射镜。

He-Ne 激光管的结构形式是多种多样的,按谐振腔与放电管的放置方式不同可分内腔式、外腔式和半内腔式。按阴极及贮气室位置的不同又可分为同轴式、旁轴式和单细管式,见图 2-1。

内腔式如图中(a)所示,将谐振腔的两反射镜调整好后,用胶固定在放电管的两端,其

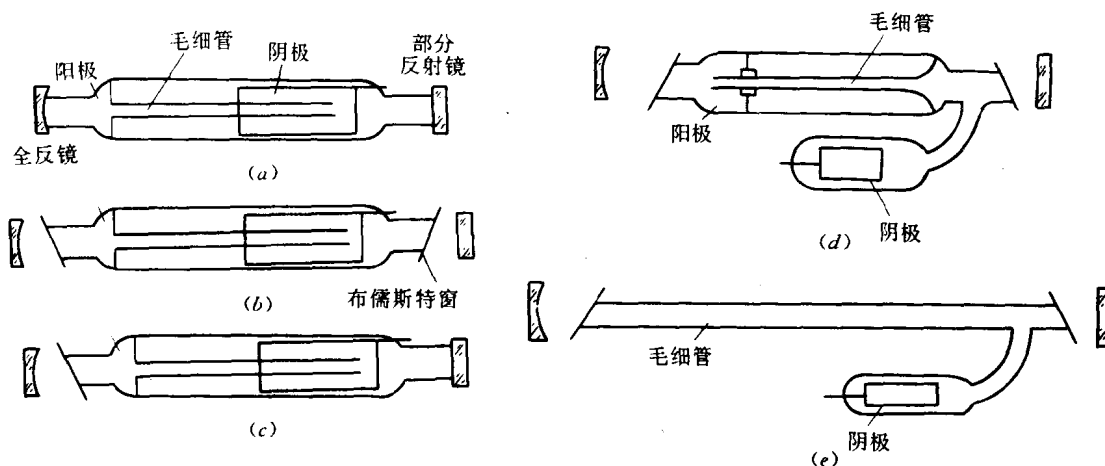


图 2-1 He-Ne 激光器的结构示意图

(a) 内腔式 (b) 外腔式 (c) 半内腔式 (d) 旁轴式 (e) 单毛细管式

优点是使用时不必进行调整, 非常方便。缺点是在工作过程中放电管受热变形时, 谐振腔反射镜会偏离相互平行位置, 造成器件损耗增加, 输出下降。激光管越长, 其热稳定性越差, 所以内腔式激光管的长度一般不超过一米。而且当谐振腔反射镜损坏后, 不易更换, 反射镜内表面污染后也无法清除。

外腔式如图中 (b) 所示, 这种激光器的谐振腔反射镜与放电管是分离的。反射镜上有调整机构, 可以随时进行调整。放电管的两端贴有布儒斯特窗片 (与毛细管轴线成布儒斯特角放置的平板玻璃), 它即可密封放电管, 又可减小光的损耗 (相对其他放置角度而言), 还可使激光得到线偏振的激光输出。谐振腔与放电管分离, 放电管的热变形对谐振腔影响较小, 加之谐振腔可以调整, 所以长期使用中能保持稳定输出。但由于反射镜与放电管相分离, 相对位置易改变, 需要经常调整, 使用不方便。

半外腔式如图中 (c) 所示, 谐振腔的一个反射镜贴到放电管上, 另一反射镜与放电管相分离。其优缺点介于内、外腔式之间。

同轴式如图中 (a) (b) (c) 所示, 阴极与毛细管同轴放置, 其结构紧凑、不易碎裂, 安装方便。但由于阴极放在放电管内, 阴极溅射物质易污染窗片, 使用寿命低, 同时由于阴极大量发射电子, 阴极区易发热, 使同轴式激光管功率的稳定性不如旁轴式。

旁轴式如图中 (d) 所示, 阴极放在放电管外的支管里, 一方面可增加储气量, 同时溅射物质不易污染窗片, 所以寿命比同轴式长, 功率稳定性也要好一些, 但体积大, 安装使用不方便, 易破碎。

单毛细管式如图 (e) 所示, 毛细管外没有单独的储气外套, 靠伸出的阴极部分贮气。它的制造工艺简单, 省材料, 毛细管易于固定, 适用于长毛细管和激光管外面有保护罩的激光器。

二、氦和氖原子的能级图

He-Ne 激光器的工作气体是 He 和 Ne, 其中产生激光跃迁的是 Ne 气。He 是辅助气体,

用以提高 Ne 原子的泵浦速率。图 2-2 为 He 和 Ne 的能级图。He 原子有两个电子，没激发时这两个原子都分布在 1S 壳层上，He 原子处于基态。当 He 原子受激发时，使其中一个电子从 1S 激发到 2S，He 原子成为激发态。He 原子有两个亚稳态能级，分别记为 2^3S_1 、 2^1S_0 。Ne 原子有 10 个电子，基态为 $1S_0$ （电子分布为 $1S^22S^22P^6$ ）。激发态为 1S、2S、3S、2P、3P（帕邢符号）等，它们对应的外层电子组态分别为 $2P^53S$ 、 $2P^54S$ 、 $2P^55S$ 、 $2P^53P$ 、 $2P^54P$ 。其中 1S、2S、3S 各由 4 个子能级组成（例如 3S 由 $3S_2$ 、 $3S_3$ 、 $3S_4$ 、 $3S_5$ 组成），2P 和 3P 各由 10 个子能级组成（例如 2P 由 $2P_1$ 、 $2P_2 \cdots 2P_{10}$ 组成）。

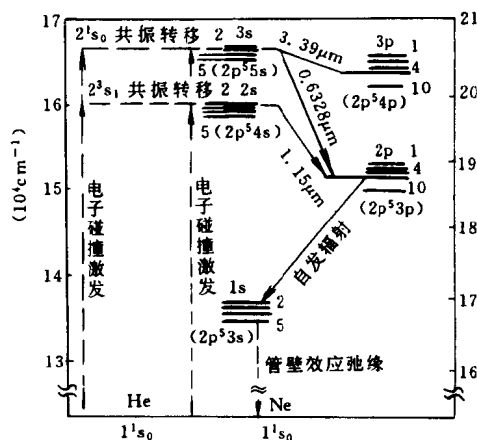


图 2-2 He-Ne 原子的部分能级图

根据能量跃迁选择定则，Ne 原子可以产生很多条谱线，其中最强的谱线有三条，即 $0.6328\mu\text{m}$ 、 $3.39\mu\text{m}$ 和 $1.15\mu\text{m}$ ，对应跃迁能级分别为 $3S_2 \rightarrow 2P_1$ 、 $3S_2 \rightarrow 3P_4$ 和 $2S_2 \rightarrow 2P_4$ 。

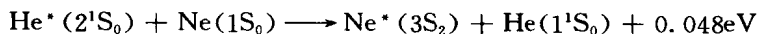
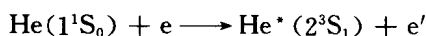
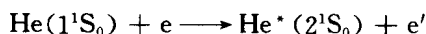
2P 和 3P 态，不能直接向基态跃迁，而向 1S 态跃迁很快。1S 态向基态的跃迁是被选择定则禁止的，不能自发地回到基态，但它与管壁碰撞时，可把能量交给管壁，自己回到基态。这就是为什么 He-Ne 激光器中要有一根内径较细的放电管的原因。

从能级图可见，He-Ne 激光器是典型的四能级系统。

三、He-Ne 激光器的激发过程

在 He-Ne 激光器中，实现粒子数反转的主要激发过程如下：

第一是共振转移。由能级图可见，He 原子的 2^1S_0 、 2^3S_1 态分别与 Ne 原子的 3S、2S 态靠得很近，二者很容易进行能量转移，并且转移几率很高，可达 95%，其转移过程如下：



式中， $\text{He}(1^1S_0)$ 表示 He 的 1^1S_0 能级； He^* 和 Ne^* 表示激发态的 He 和 Ne； e 表示碰撞前的电子， e' 表示碰撞后能量（或速度）变小的电子。

第二是电子直接碰撞激发。在气体放电过程中，基态 Ne 原子与具有一定动能的电子进行非弹性碰撞，直接被激发到 2S 和 3S 态，与共振转移相比，这种过程激发的速率要小得多。

第三是串级跃迁，Ne 与电子碰撞被激发到更高能态，然后再跃迁到 2S 和 3S 态，与前述两过程相比，此过程贡献最小。

四、He-Ne 激光器的最佳放电条件

设 Ne 的 $3S_2$ 和 $2P_4$ 能级上的粒子密度分别为 n_3 和 n_2 ，为了求粒子反转数 $\Delta n = n_3 - n_2$

(g_3/g_2), 先求 n_3 和 n_2 的变化规律。因为在只有两种粒子参与的一般能量转移过程中, 其反应速率与两种粒子数密度的乘积成正比, 所以 $\text{Ne}^* (3S_2)$ 能级上粒子数密度 n_3 的变化率方程可写为

$$\frac{dn_3}{dt} = Kn_1n_4 - Kn_0n_3 - \frac{n_3}{\tau_3} \quad (2-1)$$

式中 Kn_1n_4 表示 He 向 Ne 共振转移的激发速率; K 为转移速率常数; n_1 为 Ne 基态 (1^1S_0) 上的粒子数密度; n_4 为 $\text{He}^* (2^1S_0)$ 的粒子数密度; Kn_0n_3 表示 Ne 向 He 共振转移的激发速率; n_0 为 He 基态 (1^1S_0) 上的粒子数密度; n_3 为 Ne ($3S_2$) 的粒子数密度, 因 $\text{He}^* (2^1S_0)$ 与 $\text{Ne}^* (3S_2)$ 靠得很近, 故可近似认为以上两个相反方向的共振转移过程具有相同的速率常数 K ; n_3/τ_3 表示 $\text{Ne}^* (3S_2)$ 的粒子数密度 n_3 弛豫到其他能级的速率; τ_3 为其弛豫时间。

稳态时, $dn_3/dt=0$, 由 (2-1) 式可得

$$n_3 = \frac{Kn_1n_4}{Kn_0 + 1/\tau_3} \quad (2-2)$$

同理 $\text{He}^* (2^1S_0)$ 能级上的粒子数密度 n_4 的速率方程为

$$\frac{dn_4}{dt} = n_0n_eS_{04} - (n_4n_eS_4 + n_4A') \quad (2-3)$$

上式右端第一项表示电子碰撞激发的速率, n_0 为基态 He (1^1S_0) 的粒子密度, n_e 为电子密度, S_{04} 为基态 He (1^1S_0) 到 $\text{He}^* (2^1S_0)$ 的电子激发速率常数。第二项表示电子碰撞消激发的速率, 电子与激发态 $\text{He}^* (2^1S_0)$ 碰撞后, 后者可把能量交给电子, 使电子速度加快而自己回到基态。 $\text{He}^* (2^1S_0)$ 也可能吸收电子的能量, 使自身电离或者跃迁到其他能态, 这些都起到消激发态粒子数的作用。 S_4 为消激发速率常数。第三项表示因共振转移和逃逸出激活区而使 $\text{He}^* (2^1S_0)$ 减少的速率, A' 是衰减几率。

稳态后, $dn_4/dt=0$ 由 (2-3) 式可得

$$n_4 = n_0n_eS_{04}/(n_eS_4 + A') \quad (2-4)$$

将上式代入 (2-2) 式得

$$n_3 = \frac{Kn_1n_0n_eS_{04}}{(Kn_0 + 1/\tau_3)(n_eS_4 + A')} \quad (2-5)$$

Ne 的激光下能级 $2P_4$ 的粒子密度 n_2 也是由电子碰撞激励的, 其速率方程为

$$\frac{dn_2}{dt} = n_1n_eS_{02} - n_2n_eS_2 - n_2A \quad (2-6)$$

式中右端第一项表示电子将 Ne 原子由基态激励到 $\text{Ne}^* (2P_4)$ 的激发速率, n_1 为 Ne 基态的粒子数密度, n_e 为电子密度, S_{02} 为电子激发速率常数。第二项表示电子碰撞消激发的速率, S_2 为其消激发速率常数。第三项为 $2P_4 \rightarrow 1S$ 的自发辐射造成的衰减速率, A 为其自发辐射几率。

稳态后, $dn_2/dt=0$ 得

$$n_2 = n_1n_eS_{02}/(n_eS_2 + A) \quad (2-7)$$

因自发辐射几率 A 很大, 故分母中第一项可忽略, 于是上式变为

$$n_2 = n_1n_eS_{02}/A \quad (2-8)$$

根据 (2-5) 和 (2-8) 两式, 可以分析粒子反转数 Δn 与放电条件的关系如下:

1. Δn 与放电电流的关系

在充气压和充气比例一定的情况下, 电子密度与放电电流 i 成正比, 即 $n_e = K'i$, K' 为比

例系数。而 n_0 、 n_1 、 τ_3 、 A 等均与放电电流无关。于是 (2-5) 和 (2-8) 式又可表示为

$$n_3 = K_1 i / (K_2 i + A')$$

$$n_2 = K_3 i$$

式中

$$K_1 = K' K n_1 n_0 S_{04} / (K n_0 + 1/\tau_3)$$

$$K_2 = K' S_4$$

$$K_3 = K' n_1 S_{02} / A$$

由上面结果可以看出, n_2 随 i 成直线变化, 不出现饱和, 这是因为 $2P_4$ 上的粒子是电子直接激励基态氖原子得到的, 且 $2P_4$ 到 $1S$ 自发辐射极快; 还可看出, 当 i 较小时, $n_3 \approx K_1 i / A'$, 与 i 成线性变化关系。当 i 很大时, $n_3 \approx K_1 / K_2$ 与 i 关系不大, 呈现饱和现象。从物理意义上对饱和现象可这样解释: 放电电流增大时, 电子数目增多, 碰撞机会增加, 易产生消激发, 影响上能级粒子数积累。这个结论可由图 2-3 的实验曲线所验证。该曲线是通过测 $0.6328\mu\text{m}$ 和 $0.6096\mu\text{m}$ 的自发辐射强度随放电电流的变化得到的, 因为两谱线的强度能反映 n_3 和 n_2 的大小。

在图 2-3 中, 两条曲线之间的距离为粒子反转数密度, 在图的中间段粒子反转数最多。进一步增加放电电流时, 由于下能级增加的粒子数比上能级多, 反转粒子数就会下降。因此, 反转粒子数存在最佳放电电流条件。因增益正比于反转粒子数密度, 因而增益也存在最佳放电电流。

2. Δn 与 He、Ne 气压的关系

由于 $\text{Ne}2P_4$ 能级的原子数 n_2 通常比 $3S_2$ 能级的原子数 n_3 小得多, 故反转粒子数主要取决于 n_3 。

当 He、Ne 气压比一定时, 如果

总气压较低, n_0 和 n_1 将减少。由 (2-5) 式可见, n_3 也随着减少。总气压很高时, 虽然 n_0 和 n_1 可增加, 但电子与原子碰撞次数也增加, 使电子的动能减小, 电子温度降低, 电子就不能有效地把 He、Ne 激发到上能级去, 亦即使公式 (2-5) 中的 S_{04} 降低, 导致 n_3 下降。可见, 其中有一最佳总气压, 使反转粒子数最高。

当总气压一定时, He 和 Ne 的气压比也存在最佳值。由公式 (2-5) 可见, n_1 的影响比 n_0 大, 所以 Ne 气含量过少时, 则由于 n_1 减少, 使 n_3 也减少。但 Ne 含量过多时, 则因 Ne 比 He 易电离而导致电子能量和温度降低, 使 S_{04} 和 n_3 减小。由于 Ne 原子激光上能级的粒子数主要是由 He 亚稳态原子共振转移而得到的, 所以 He 原子的气压应高于 Ne 原子的气压, 才能有效地将原子从基态激发到高能态。

综上所述, 为得到最高的粒子反转数, 应采用最佳放电条件, 即采用最佳放电电流, 最佳总气压和最佳分压比。

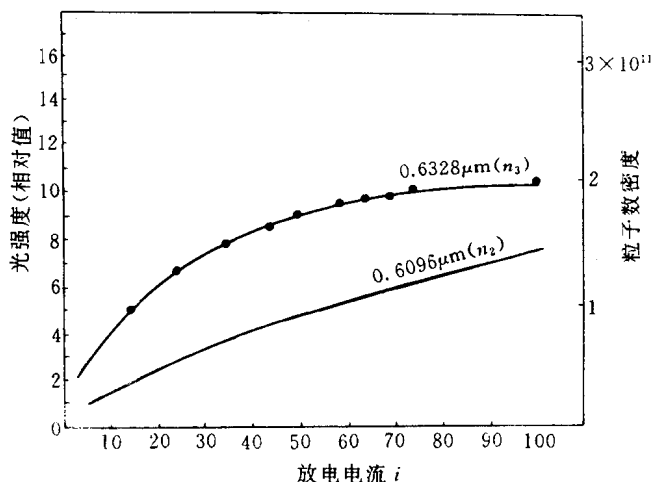


图 2-3 粒子数密度与放电电流的关系