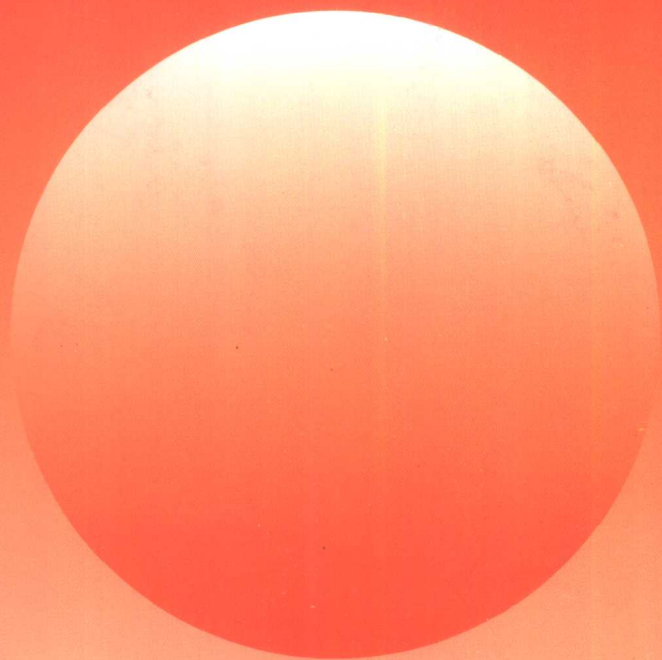


● 研 究 生 用 书 ●

GASEOUS
ELECTRONICS

华中理工大学出版社



丘军林

气体电子学

气体电子学

丘军林

华中理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

气体电子学/丘军林

武汉:华中理工大学出版社, 1999年10月

ISBN 7-5609-2028-4

I. 气…

II. 丘…

III. 气体电子学

IV. TN01

气体电子学

丘军林

责任编辑:傅岚亭

责任校对:熊九龄

封面设计:刘 卉

监 印:张正林

出版发行:华中理工大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87542624

经销:新华书店湖北发行所

录排:华中理工大学出版社照排室

印刷:武汉市青联彩印厂

开本:850×1168 1/32

印张:5.875

插页:2

字数:130 000

版次:1999年10月第1版

印次:1999年10月第1次印刷

印数:1—1 000

ISBN 7-5609-2028-4/TN·52

定价:8.50元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行科调换)

内 容 提 要

本书共 11 章,主要内容有:激光物质的原子物理基础、气体放电基本特性、带电粒子的产生、带电粒子在气体中的运动、带电粒子的转化与消失、汤森放电理论与气体击穿、辉光放电、空心阴极放电、电弧放电及脉冲放电、高频放电及微波放电、等离子体诊断等。

本书的特点是将量子光学和气体电子学这两门学科知识有机地结合在一起,内容比较系统和全面,可使读者对气体放电基本物理过程有比较完整的概念。本书可作为“物理电子学与光电子学”专业研究生的教材,可供从事气体放电与气体激光器研究和应用的科技人员参考。

ABSTRACT

This book consist of eleven chapters, which deals with questions concerning basis of atomic physics of Laser material, basic properties of gas discharge, occurrence of charged particles, movement of charged particles in gas, transfer and disappearance of charged particles, Tomson discharge theory and gas breakdown, glow discharges, hole cathode discharges, arc discharges and pulsed discharges, high frequency discharges and microwave discharges, diagnostics of plasmas.

The characteristic of this book is to combine the Quantum Optic with Gas Electronics organically, the contents of this book is systematically and completely. By this book, readers can understand the physical process of gas discharge better.

This book can be used as teaching material of the course for the graduate students in Physical Electronic and Photoelectrics, and can provide reference for the researchers and engineers who are engaged in researches and application of gas discharge and gas Lasers.

写在“研究生用书”出版 10 周年

在今天,面对科技的迅速发展,知识经济的已见端倪,国际竞争也日趋激烈,显然,国家之间的竞争是国家综合实力的竞争,国家综合实力的竞争关键是经济实力的竞争,而经济实力的竞争关键又在于科技(特别是高科技)的竞争,科技(特别是高科技)的竞争归根结底是人才(特别是高层次人才)的竞争,而人才(特别是高层次人才)的竞争基础又在于教育。“百年大计,教育为本;国家兴亡,人才为基。”十六个字、四句话,确是极其深刻的论断。目前,国际形势清楚表明:我们国家的强大与民族的繁荣,主要立足于自己,以“自力更生”为主;把希望寄托于他人,只是一种不切实际的幻想。这里,我们决不是要再搞“闭关锁国”,搞“自我封闭”,因为那是没有出路的;我们强调的是要“自信,自尊,自立,自强”,要“自力更生”为主,走自己发展的道路。

显然,知识经济最关键的是人才,是高层次人才的培养,而作为高层次人才培养的研究生教育就在一个国家的方方面面的工作中,占有十分重要的战略地位。可以说,没有研究生教育,就没有威伟雄壮的科技局面,就没有国家的强大实力,就没有国家在国际上的位置,就会挨打,就会受压,就会被淘汰,还说什么知识经济与国家强大?!

“工欲善其事,必先利其器。”教学用书是教学的重要

基本工具与条件。这是所有从事教育的专家所熟知的事实。所以,正如许多专家所知,也正是原来的《“研究生用书”总序》中所指出,研究生教材建设是保证与提高研究生教学质量的重要环节,是一项具有战略性的基本建设。没有研究生的质量,就没有研究生教育的一切。

我校从 1978 年招收研究生以来,即着力从事于研究生教材与教学用书的建设。积十多年建设与实践的经验,我校从 1989 年起,正式分批出版“研究生用书”。第一任研究生院院长陈珏教授就为之写了《“研究生用书”总序》,表达了我校编写这套用书的指导思想与具体要求,“要力求‘研究生用书’具备科学性、系统性、先进性”。后三任研究生院长,也就是各任校长黄树槐教授、我本人和周济教授完全赞同这一指导思想与具体要求,从多方面对这套用书加以关心与支持。

我是十分支持出版“研究生用书”的。早在 1988 年我在为列入这套书中的第一本,即《机械工程测试·信息·信号分析》写“代序”时就提出:一个研究生应该博览群书,博采百家,思路开阔,有所创见。但这不等于他在一切方面均能如此,有所不为才能有所为。如果一个研究生的主要兴趣与工作不在“这一特定方面”,他也可以选择一本有关的书作为了解与学习这方面专业知识的参考;如果一个研究生的主要兴趣在“这一特定方面”,他更应选择一本有关的书作为主要学习用书,寻觅主要学习线索,并缘此展开,博览群书。这就是我赞成为研究生编写系列教学用书的原因。

目前,这套书自第一本于 1990 年问世以来,已经渡

过了10个春秋,出版了8批共49种,初步形成规模,逐渐为更多读者所认可。在已出版的书中,有15种分获国家级、部省级图书奖,有16种一再重印,久销不衰。采用此套书的一些兄弟院校教师纷纷来信,赞誉此书为研究生培养与学科建设作出了贡献,解决了他们的“燃眉之急”。我们感谢这些赞誉与鼓励,并将这些作为对我们的鞭策与鼓励,“衷心藏之,何日忘之?!”

现在,正是江南春天,“最是一年春好处”。华工园内,红梅怒放,迎春盛开,柳枝油绿,梧叶含苞,松柏青翠,樟桂换新,如同我们的国家正在迅猛发展、欣欣向荣一样,一派盎然生机。尽管春天还有乍寒时候,我们国家在前进中还有种种困难与险阻,来自国内与来自国外的阻挠与干扰,有的还很严峻;但是,潮流是不可阻挡的,春意会越来越浓,国家发展会越来越好。我们教师所编的、所著的、所编著的这套教学用书,也会在解决前进中的种种问题中继续发展。然而,我们十分明白,这套书尽管饱含了我们教师的辛勤的长期的教学与科研工作的劳动结晶,作为教学用书百花园中的一丛鲜花正在怒放,然而总会有这种或那种的不妥、错误与不足,我衷心希望在这美好的春日,广大的专家与读者,不吝拨冗相助,对这套教学用书提出批评建议,予以指教启迪,为这丛鲜花除害灭病,抗风防寒,以进一步提高质量,提高水平,更上一层楼,我们不胜感激。我们深知,“一个篱笆三个桩”,没有专家的指导与支持,没有读者的关心与帮助,也就没有这套教学用书的今天。我衷心祝愿在我们学校第三次大发展的今天,在百年之交与千年之交的时候,这套教学用书会以更

雄健的步伐,走向更美好的未来。

诗云:“嚶其鸣矣,求其友声。”这是我们的心声。

中国科学院院士

华中理工大学学术委员会主任

杨叔子

于华工园内

1999年5月15日

前 言

1993 年由于“物理电子学及光电子学”专业教学计划进行了调整,将原来的《气体电子学》及《气体放电与气体激光》两门课程合并为《气体电子学与气体激光》课程,学时数为 60。根据《气体电子学与气体激光》课程教学大纲,从 1994 年开始对硕士研究生进行讲授,通过几年来的教学实践,对课程内容进行了不断修改和充实,特别是对《气体电子学》部分重新进行了编写,作为华中理工大学研究生院推荐教材,由华中理工大学出版社出版。《气体激光》部分的教材,仍可使用作者编写的 1995 年华中理工大学出版社出版的《气体放电与气体激光》一书。

《气体电子学》主要研究带电粒子在电磁场中的产生、运动、转化与消失的规律,研究各种放电形式的物理过程和特性。全书共 11 章,主要内容有:激光物质的原子物理基础、气体放电基本特性、带电粒子的产生、带电粒子的运动、带电粒子的转化与消失、汤森放电理论与气体击穿、辉光放电、空心阴极放电、电弧放电及脉冲放电、高频放电及微波放电、等离子体诊断等。每一章后面皆附有思考题供读者讨论、复习与思考。

本教材由华中理工大学丘军林教授编写,北京理工大学辛建国教授负责审查教学大纲并担任教材的主审,在此作者对辛建国教授提出的宝贵修改意见表示诚挚的感谢。作者在编写过程中参阅了一些编著者的著作和论文,在此表示衷心的感谢。

本教材能顺利出版,主要得到华中理工大学研究生院及激光技术国家重点实验室的大力支持,在此作者表示衷心的感谢。

丘军林

1999 年 5 月

FOREWORD

In 1993, was revised the related courses of majoring in Physical Electronics and Photoelectronics. Two courses on *Gaseous Electronics* and *Gas Discharge and Gas Laser* have merged into one course on *Gaseous Electronics and Gas Laser*. The class hours is 60. Since 1994, I have been giving lectures on *Gaseous Electronics and Gas Laser* to the graduate students.

This book is compiled based on the lecture manuscripts and will be recommended by the Graduate College of Huazhong University of Science and Technology as a textbook, and will published by Huazhong University of Science and Technology Press. Readers who study *Gas Laser* can choose the book *Gas Discharge and Gas Laser*, which was published by Huazhong University of Science and Technology Press in 1995.

Gaseous Electronics deals with occurrence, movement, transfer and disappearance of charged particles in electromagnetic field, the physical process and properties of various discharges. This book consist of eleven chapters, which deals with questions concerning basis of atomic physics of Laser material, basic properties of gas discharge, occurrence of charged particles, movement of charged particles, transfer and disappearance of charged particles, Tomson discharge theory and gas breakdown, glow discharges, hole cathode discharge, arc discharged and pulsed discharges, high frequency discharges and microwave discharges, and diagnostics of plasmas. Problems and exercises

are attached to the end of each chapter, readers can discuss and think deeply.

This textbook is written by Prof. Qiu Junlin of Huazhong University of Science and Technology, Prof. Xin Jianguo of Beijing University of Science and Technology examined, and also gave some useful comments, some books and literature were referred in the compiled process. I am especially thankful to all of them.

I wish to acknowledge Graduate College Students of Huazhong University of Science and Technology and National Laboratory of Laser Technology for their kind support.

Qiu Junlin

1999. 5

目 录

第一章 激光物质的原子物理基础

1.1 引言	(1)
1.2 单电子系统及量子数	(1)
1.3 多电子系统及电子组态	(8)
1.4 L - S 耦合	(9)
1.5 原子能级	(11)
1.6 分子能级	(16)
思考题	(27)

第二章 气体放电基本特性

2.1 气体放电的基本粒子	(28)
2.2 粒子间的相互作用	(29)
2.3 电子的基本特性	(30)
2.4 朗之万(Langevin)方程	(36)
2.5 迁移率、电导率和介电常数	(37)
2.6 能量平衡、电子温度和能量的关系	(40)
思考题	(42)

第三章 带电粒子的产生

3.1 引言	(43)
3.2 弹性碰撞与非弹性碰撞	(44)
3.3 第二类非弹性碰撞	(47)
3.4 平均自由行程与碰撞截面	(49)

3.5 光致电离	(51)
3.6 热电离	(53)
3.7 负离子的产生——附着效应	(54)
3.8 分布函数与玻耳兹曼(Boltzmann)方程	(55)
思考题	(60)

第四章 带电粒子在气体中的运动

4.1 引言	(61)
4.2 带电粒子在气体中的热运动	(62)
4.3 带电粒子在气体中的迁移运动	(62)
4.4 带电粒子在磁场中的运动	(65)
4.5 带电粒子在气体中的扩散运动	(67)
思考题	(71)

第五章 带电粒子的转化与消失

5.1 引言	(72)
5.2 带电粒子的转荷过程	(72)
5.3 扩散	(74)
5.4 复合	(75)
思考题	(80)

第六章 汤森放电理论与气体击穿

6.1 气体放电的伏安特性	(81)
6.2 汤森放电理论	(83)
6.3 气体击穿与巴邢定律	(87)
6.4 自持放电的理论分析	(89)
思考题	(90)

第七章 辉光放电

7.1 正常辉光放电的基本特性	(91)
7.2 辉光放电的不均匀性——电泳现象及效应	(94)
7.3 大体积辉光放电的不稳定性	(96)
7.4 大体积辉光放电中的预电离	(104)
思考题	(107)

第八章 空心阴极放电

8.1 空心阴极效应	(108)
8.2 阻塞放电	(111)
8.3 阴极溅射	(112)
8.4 气体吸附	(114)
8.5 空心阴极放电粒子数方程式	(116)
思考题	(119)

第九章 电弧放电及脉冲放电

9.1 引言	(120)
9.2 非自持热阴极电弧放电	(121)
9.3 电弧放电的等离子体特性	(123)
9.4 电弧放电的伏安特性	(127)
9.5 具有磁场约束的电弧放电	(128)
9.6 脉冲放电	(129)
思考题	(132)

第十章 高频放电及微波放电

10.1 引言	(133)
10.2 高频放电的特点	(134)
10.3 高频放电击穿理论	(135)

10.4 介质电极的高频放电	(140)
10.5 高频电源和电极间的阻抗匹配	(143)
10.6 微波特点及其传输	(145)
10.7 微波放电特性	(155)
思考题	(159)

第十一章 等离子体诊断

11.1 引言	(160)
11.2 朗缪尔探针法	(160)
11.3 光谱法	(165)
思考题	(166)

附 录

附录一 常用物理常数	(167)
附录二 一些气体的平均自由行程 $\bar{\lambda}_g$ 、平均速度 $\bar{u}$ 和碰撞频率 $\bar{\nu}_c$	(168)
附录三 电磁波谱	(169)

参考文献	(170)
------------	-------

第一章 激光物质的原子物理基础

1.1 引言

在讨论气体放电与气体激光时,要涉及到许多原子物理的基础知识,例如能级,高能态,亚稳态,基态,能级符号,量子数,光谱以及电子、离子、原子、分子及其相互作用等基本概念。对于学习过原子物理及光谱学的读者来说,本章是简单的总结和复习;而对于未具备这方面知识基础的读者来说,则是极其必要的。

本章主要从单电子系统和量子数的概念出发,讨论在不同耦合形式中自由电子和束缚原子的多重态光谱,并给出一个简单的分子光谱的结构,原子或分子的跃迁及其选择定则。

1.2 单电子系统及量子数

1.2.1 玻尔原子模型

对于原子结构及线状光谱的分类来说,氢原子具有最简单的形式。按照玻尔原子模型,氢原子是由一个带正电荷的原子核和一个绕核转动的电子组成。

氢原子从紫外到红外光谱范围的频率谱线 ν_{mn} 可以用下面的经验公式来表示:

$$\nu_{mn} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (1-1)$$

式中, m 和 n 是电子的整数倍的转动次数; R 是一个常数, 称为里德伯(Rydberg)常数。因此不同的线列是由不同的 m 、 n 值来决定的。

电子系统的玻尔理论可以用氢的光谱或类似氢的离子光谱来描述。对于处在有正核库仑场的环形轨道中的电子运动, 提出了下面三点要求:

- (1) 它只允许处在具有不连续的能量值 W_n 的循环轨道上;
- (2) 这些轨道的特征是: 动量矩的数值是 $\hbar = h/(2\pi)$ 的整数倍(h 是普朗克常数);
- (3) 在这一圆形轨道上的运动要发生辐射损失, 轨道之间的跃迁是通过放射或吸收一个具有频率为 ν_{mn} 的光子实现的, 当 $W_m > W_n$ 时有

$$h\nu_{mn} = W_m - W_n \quad (1-2)$$

这一理论也是以具有点状核和相应电子的二维圆盘状原子模型为基础的。但是对球形系统状况的原子基本状态来说, 它不仅和经验公式不一致, 而且也量子力学计算结果不一致, 特别是对于处理多电子系统就不再适用了。然而, 由于它有很好的直观性, 因此在考虑轨道动量矩关系和讨论量子力学参数时, 还总是引用玻尔原子模型。

1.2.2 主量子数(n)、能级图

在计算单电子系统中轨道上的电子能量时, 玻尔理论和量子力学还是符合的。

$$(W_B)_n = -hR/n^2 \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (1-3)$$

式中, n 是电子的转动次数, 或者是主量子数。里德伯常数 R 可以由下式给出