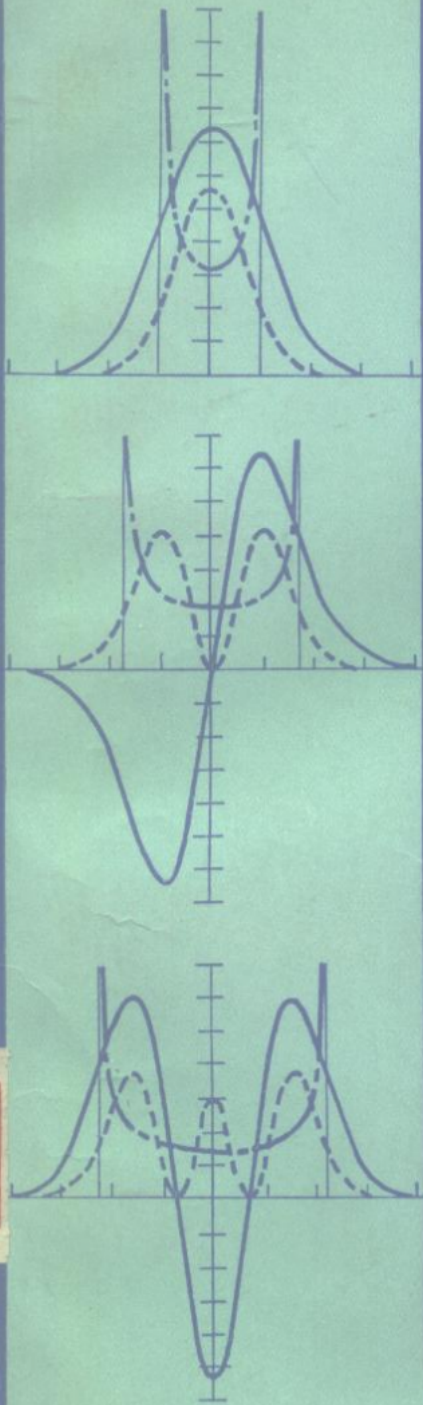




〔美〕 A·亚里夫 著

刘颂豪 吴存恺 王明常 译

量子电子学

上海科学技术出版社



数据加载失败，请稍后重试！

量子电子学

〔美〕 A. 亚里夫 著

刘颂豪

吴存恺 译

王明常

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书对量子电子学诸领域进行了较全面而系统的阐述。全书共十九章和四个附录。第1~5章是学习量子电子学必需具备的基础知识。第6、7章及第9~14章是关于激光的产生、放大、调制、噪声及传播理论。第8章及第15~19章是采用半经典理论处理激光与物质的相互作用,着重讨论各种非线性光学问题。全书结构严谨,基本概念清晰。每个理论单元之后均列举数值例子,每章之末还附有习题。

本书可作为高等院校激光专业的教科书,也可供从事激光工作的广大科技人员和高等院校的教师参考。

Quantum Electronics

Second Edition

A. Yariv

by John Wiley & Sons, Inc.

(1975 纽约版)

中 译 本 序

《量子电子学》中译本的出版,我深感荣幸。此书已出版多年,象量子电子学这样一个迅速发展的领域,当然又有许多新发展。今天假如我要修改这本书的话,将增加一些可能是读者正在研究的课题。这些课题是:

准分子激光器;

自由电子激光器;

折射率和增益导波的半导体激光器;

四元半导体激光器;

四波混频;

光学位相共轭。

预祝中国同事在激光研究工作中取得新的成就。

A. 亚里夫

1982年6月8日

译者序

量子电子学早在五十年代初就发展起来了。但当时只限于研究微波量子放大器及有关的各种磁共振现象和微波的量子过程。六十年代初激光器的问世赋予量子电子学以崭新的内容,从而成为光学和电子学相互渗透而形成的边缘学科,在近代科学技术中是最为活跃的领域之一。量子电子学主要涉及激光的产生与传播;激光的特性如相干性、统计性等以及激光辐射与物质的相互作用。量子电子学的发展已对物理学、化学、生物学和医学等学科起了重大的促进作用,从而派生出若干新的学科分支如非线性光学、激光光谱学、量子光学、激光化学、激光生物学等。可以预料,它将对国民经济建设和国防军事的发展带来深刻的影响。

在实现我国社会主义四个现代化的新长征中,高等院校有关专业的师生希望阅读这方面的参考书,而从事激光研究和应用的专业人员也迫切需要较系统、较全面地掌握量子电子学的理论基础。根据这一情况,我们翻译了A. 亚里夫《量子电子学》这本专著,以满足有关方面的需要。

本书根据第二版(1975年出版)译出。全书共有十九章和四个附录。其中第1~5章是学习量子电子学必需具备的基础知识。第6、7章及第9~14章是关于激光的产生、放大、调制、噪声及传播理论。第8章及第15~19章是采用半经典理论处理激光与物质的相互作用,着重讨论各种非线性光学问题。读者可根据自己的需要选读本书的有关章节。本书对量子电子学诸领域进行了较全

面而系统的阐述,全书结构严谨,基本概念清晰。在每个理论单元后面均列举数值例子,这不仅加深读者对理论的理解,而且使理论更能密切结合实际,为解决实际问题提供向导。每章均列出有关文献,供希望深入研究这一领域的读者参考。为适应教学需要,每章之末还附有习题,它不仅提供读者以练习的机会,而且对正文阐述也是一个很好的补充。但应指出,对于从事激光研究的工作者来说,只读本书还是不够的。因为本书没有涉及原子、分子和激光工作物质的能级结构,激光器的动力学过程和激光的特性。此外,本书第二版完成于1975年,因而量子电子学近年来的最新进展未能反映,实有美中不足之感。

作者 A. 亚里夫 1930 年生于以色列特拉维夫城。他于 1954 年、1956 年和 1958 年分别荣获加利福尼亚大学伯克利分校的电气工程学士、硕士和物理学博士学位。1959 年进入贝尔电话实验室,从事顺磁共振、半导体、激光器、集成光学、信息处理、量子噪声理论及非线性光学方面的研究。于 1964 年和 1966 年,他分别被提升为加利福尼亚工学院电气工程副教授和教授。A. 亚里夫是美国物理学会和美国光学学会会员,还是量子电子学杂志的副主编。作者在量子电子学领域中声望很高,造诣很深,已发表了近 150 多篇学术论文,撰写了两部专著——本书和“光电子学导论”(“Introduction to Optical Electronics”, Holt, Rinehart and Winston, New York, 1971)。

本书可作为高等院校激光专业的教科书,也可供从事激光工作的广大科技人员和高等院校的教师参考。

吴存恺同志翻译了第 1~6 章,第 8 章及第 15~17 章;王明常同志翻译了第 7、9、10、12、13 和第 19 章以及序言与附录,刘颂豪同志翻译了第 11、14 和第 18 章并校阅了全书。此外,复旦大学周雄豪先生对全文提出了不少宝贵的意见,谨此致谢。

限于水平,译文定有不少错误和不当之处,恳请读者批评指正。

译者

1982 年 3 月于嘉定

第二版作者序

本教科书介绍了量子电子学的研究和实验中所涉及的主要原理,其中包括激光振荡器的理论,范围很广的光学现象,以及因为有了激光所引起的强相干的光场才会存在的一些器件。

本书的重点几乎都是阐述基本原理,但也企图用一些根据实际情况的数字举例来使理论与实际联系起来。

这一版本大约有一半内容是新写的。另外,删去了第一版中有关微波现象和磁共振的一些课题。主要更动如下:

1. 增添了高斯光束在类透镜介质中的传播,光学谐振腔,光和物质相互作用的密度矩阵公式,激光振荡理论,激光的范德波尔(Van der Pol)噪声分析,染料激光器,振-转跃迁的放大,双异质结激光器,均匀加宽激光器中的锁模, Q 开关,饱和放大器和自发辐射的放大,声光相互作用,自感应透明,光子回波,自发参量荧光,分布反馈激光器,以及电介质波导中的模式耦合等内容。

2. 删去了有关微波激光器,磁学,磁共振和微波参量振荡器等章节。

3. 全书采用米-千克-秒(MKS)单位制。本书主要适用于物理系和应用物理系的研究生,而后一类学生通常还包括电机(或电气)工程系和材料科学系的学生。

本书原是为加利福尼亚工学院学生讲课用的讲义。这些学生应具备的基础知识是要选修一年严格的量子力学课程和一门电磁场理论课程。这两门课是大学高年级优等学生或通常是研究生第

一学年的课程。尽管本书包括了大部分必须预先具备的基础知识,但仍假设读者十分熟悉这两方面的内容。本书可作为一学年量子电子学课程的基础或者是一学期下列课程的基础:

1. 激光器: 本书第 5~13 章。
2. 非线性光学效应和受激散射现象: 本书第 14 章 (论述声光效应的那部分内容) 和第 15~18 章。
3. 光学的模式和传播现象: 本书第 5~7 章, 第 14 章和第 19 章。

第一种课程大量应用量子力学。在第二种课程中只在第 15 章需要用到量子力学,而在第三种课程中完全不用量子力学。在三种课程中都需要电磁场的基础知识。

本书主要是一本教科书,所以在取材上主要从教学上考虑而不是按照年代的先后来考虑的,因此有些同行的工作未能在本书中给予肯定或加以适当的描述,谨致歉意。

A. 亚里夫

目 录

中译本序	ix
译者序	xi
第二版作者序	xiii

1 量子力学的基本定理和假设	1
1.0 引言	1
1.1 薛定谔波动方程	1
1.2 与时间无关的薛定谔波动方程	8

2 与时间无关的薛定谔方程的某些解	20
2.0 引言	20
2.1 宇称	20
2.2 谐振子	21
2.3 在球对称势场中的薛定谔方程	29
2.4 角动量算符及其本征函数	33

3 量子力学公式的矩阵表示	36
3.0 引言	36
3.1 矩阵的某些基本性质	36
3.2 方阵的变换	37
3.3 矩阵的对角化	38
3.4 用作算符表象的矩阵	39

3.5	算符表象的变换	40
3.6	用矩阵方法推导算符的本征函数和本征值	41
3.7	海森堡运动方程	43
3.8	角动量算符的矩阵元	45
3.9	自旋角动量	48
3.10	角动量的迭加	49
3.11	与时间无关的微扰理论	51
3.12	与时间有关的微扰理论——与谱线加宽的关系	54
3.13	密度矩阵——引言	61
3.14	密度矩阵	61
3.15	系综平均	62
3.16	密度矩阵随时间的变化	63
4	晶格的振动及其量子化	66
4.0	引言	66
4.1	均匀直线运动	66
4.2	由同种原子构成的直线链的波的运动	67
4.3	由两种不同原子构成的线链	70
4.4	晶格求和	73
4.5	晶格振动声频支的量子化	75
4.6	晶格模的平均热激发	79
5	电磁场及其量子化	83
5.0	引言	83
5.1	在电磁场中功率的输运、储存和耗散	83
5.2	电磁波在各向异性晶体中的传播	86
5.3	折射率椭球	90
5.4	电磁波在单轴晶体中的传播	92
5.5	在谐振腔中电磁场简正模的展开	94
5.6	辐射场的量子化	97
5.7	模密度和黑体辐射	100
6	光束在均匀介质和类透镜介质中的传播	103

6.0	引言	103
6.1	透镜波导	103
6.2	相同透镜构成的波导	108
6.3	光线在反射镜间的传播	109
6.4	在类透镜介质中的光线	110
6.5	在二次型折射率变化的介质中的波动方程	113
6.6	在均匀介质中的高斯光束	115
6.7	在类透镜介质中的基模高斯光束—— $ABCD$ 定律	118
6.8	在透镜波导中的高斯光束	122
6.9	在均匀介质中的高斯光束高阶模	123
6.10	在二次型折射率变化的介质中的高斯光束高阶模	125
6.11	二次型增益变化的介质中的传播	127
6.12	椭圆高斯光束	128
7	光学谐振腔	136
7.0	引言	136
7.1	球面谐振腔	136
7.2	模式的稳定判据和谐振腔的自洽解	142
7.3	共振频率	145
7.4	光学谐振腔中的损耗	148
7.5	“非稳”光学谐振腔	150
8	辐射场与原子系统的相互作用	156
8.0	引言	156
8.1	原子极化率的密度矩阵推导	156
8.2	$\chi(\nu)$ 的意义	164
8.3	自发跃迁和感应跃迁	165
8.4	增益系数	169
8.5	感应跃迁和自发跃迁的爱因斯坦处理	170
8.6	均匀加宽和非均匀加宽	173
8.7	在均匀加宽和非均匀加宽系统中的增益饱和	175
9	激光振荡	183

9.0	引言	183
9.1	激光振荡条件	184
9.2	激光振荡——一般形式的推导	190
9.3	激光器的输出功率	193
10	几种特定的激光系统: 半导体激光器	204
10.0	引言	204
10.1	抽运和激光器效率	204
10.2	红宝石激光器	205
10.3	掺钕钇铝石榴石 ($\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$) 激光器	210
10.4	钕玻璃激光器	213
10.5	氦-氖 (He-Ne) 激光器	216
10.6	二氧化碳激光器	218
10.7	半导体激光器	226
10.8	有机染料激光器	244
11	激光器的 Q 开关和锁模	257
11.0	引言	257
11.1	Q 开关	257
11.2	非均匀加宽激光系统的锁模	265
11.3	均匀加宽激光系统中的锁模	275
11.4	激光器的弛豫振荡	282
11.5	被动锁模	287
12	激光介质中信号和自发辐射的放大	292
12.0	引言	292
12.1	放大的自发辐射的频谱	292
12.2	饱和状态	296
13	激光放大器和振荡器中的噪声	304

13.0	引言	304
13.1	激光放大器中的噪声	304
13.2	激光振荡器中的自发辐射噪声	311
13.3	激光器作为范德波尔(Van der Pol)振荡器	317
13.4	激光噪声的量子力学处理	330

14 光辐射的调制339

14.0	引言	339
14.1	电光效应	339
14.2	电光位相延迟	347
14.3	电光调幅	350
14.4	光的位相调制	353
14.5	横向电光调制器	354
14.6	高频调制	359
14.7	光束的电光偏转	363
14.8	光弹性效应	365
14.9	声波引起的光的布喇格衍射	367
14.10	声光偏转	376
14.11	天然双折射晶体的布喇格散射	378

15 辐射场与原子系统的相干相互作用383

15.0	引言	383
15.1	辐射场与二能级原子系统相互作用的矢量描述	383
15.2	超辐射	394
15.3	光子回波	396
15.4	自感应透明	399

16 非线性光学导论——二次谐波的产生420

16.0	引言	420
16.1	非线性光学极化率张量	421
16.2	非线性场的哈密顿	425

16.3	非线性光学系数的物理起源	427
16.4	非线性相互作用的电磁场公式化	432
16.5	光学二次谐波的产生	434
16.6	输入辐射抽空的二次谐波的产生	441
16.7	用高斯光束产生二次谐波	443
16.8	腔内二次谐波的产生	445
17	参量放大、参量振荡及参量荧光	451
17.0	引言	451
17.1	参量放大的基本方程	451
17.2	参量振荡	453
17.3	参量振荡器中的功率输出和抽运饱和	460
17.4	参量振荡器中的频率调谐	461
17.5	参量相互作用的量子力学处理	464
17.6	频率上转换	468
17.7	自发参量荧光	475
17.8	后向参量放大和振荡	480
18	受激喇曼散射和布里渊散射	486
18.0	引言	486
18.1	喇曼散射的量子力学描述	490
18.2	受激喇曼散射	494
18.3	喇曼振荡与不稳定性	498
18.4	受激喇曼散射的电磁理论处理	500
18.5	反斯托克斯散射	505
18.6	受激布里渊散射	507
18.7	光束的自聚焦	515
19	光学电介质波导中的传播、调制和振荡	527
19.0	引言	527
19.1	波导模	527

19.2	平面波导的模式特性	531
19.3	波导模之间的耦合	534
19.4	周期性波导	536
19.5	耦合模方程的解	540
19.6	分布反馈激光器	544
19.7	电介质波导中的电光调制和模式耦合	551
19.8	微扰波导的本征模——磁光耦合	555
19.9	漏泄型电介质波导	560
附 录		567
1.	克喇末-克朗尼格关系式	567
2.	一个黑体辐射模所具有的立体角	569
3.	线型分子振-转跃迁的自发辐射寿命	569
4.	非线性光学常数的量子力学推导	572
内容索引		579

1

量子力学的基本定理和假设

1.0 引言

本章将阐述量子力学的某些基本假设和定理。这些假设和定理具有普遍意义,而与所研究的具体系统无关。至于把这些结果应用于某些特殊问题,则是本书第2章要着重讨论的内容,而其余各章将在较小程度上讨论这个内容。

1.1 薛定谔波动方程

按照量子力学,粒子的状态可用波函数 $\psi(\mathbf{r}, t)$ 来描述,该波函数是下列薛定谔波动方程的解。

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}, t) \right] \psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (1.1-1)$$

$V(\mathbf{r}, t)$ 是粒子的势能函数, $\hbar = h/2\pi$, 其中 h 是普朗克普适常数。

把微分算符 $-i\hbar\nabla$ 与粒子的线动量 $\mathbf{p}$ 联系起来,即

$$\mathbf{p} \rightarrow -i\hbar\nabla \quad (1.1-2)$$

则(1.1-1)式左边的算符与粒子的动能和势能之和有关

$$E \rightarrow -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \quad (1.1-3)$$

波函数的统计解释

考虑数目很多具有相同势函数 $V(\mathbf{r}, t)$ 的独立空间,粒子在每