

Ю. В. 巴伊鲍罗金
苏 Л. З. 克里克松诺夫 主编
О. Н. 李特文科

激光 技术 手册



JIGUANG
JISHU SHOUCHE

Ю.В.巴伊鲍罗金
〔苏〕 И.З.克里克松诺夫 主编
O.H.李特文年科

激 光 技 术 手 册

尚惠春 王罗禹 王绍水 译
魏光辉 校



机 械 工 业 出 版 社

本手册扼要地阐述了激光技术的基本原理，激光器中的物理现象，计算以及在科学技术各个领域中的应用；介绍了激光辐射的量子力学和量子理论的基本概念；着重介绍了各种类型的激光器和激光放大器基本参数的测量方法、激光辐射的调制和接收方法、激光的发生和扫描系统；介绍了激光在通信系统、光学定位、陀螺、电视、电影、探伤等方面的大量资料。

本手册可供从事激光器设计和激光应用方面的工程技术人员使用，对有关专业的大学师生也有参考价值。

СПРАВОЧНИК ПО ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКЕ

Под Редакцией Ю.В.Байбородина, Л.З.Криксунова,

О.Н.Литвиненко

КИЕВ «ТЕХНИКА» 1978

* * *

激光技术手册

Ю.В.巴伊鲍罗金

[苏] Л.З.克里克松诺夫 主编

О.Н.李特文年科

尚惠春 王罗禹 王绍水 译

魏光辉 校

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787 × 1092¹/₃₂ · 印张 15⁵/₄ · 字数 344 千字
1986年10月北京第一版·1986年10月北京第一次印刷
印数 0,001—3,750 · 定价 3.25 元

*

统一书号, 15033 · 5900

译者的话

光学是一门很古老的科学。19世纪末、20世纪初，人们认为光学理论已比较完善，光学技术的应用已比较广泛，光学仪器的精度也相当高了，似乎在光学领域再没有更多的新课题值得研究的了。但是，科学技术的发展是不会停止的，1917年爱因斯坦又提出了在自然界中存在两种发光方式：一种是自发辐射，一种是受激辐射。前者是指激发态的原子自发地向低能级跃迁而发出光辐射的过程，而受激辐射则需要某种外界条件的激发下，才能产生光辐射的过程，这就是激光器产生的依据。30年代在普朗克量子论的基础上出现了量子力学，40年代末形成了量子电子学。量子电子学作为物理学的又一新领域，主要是研究电磁辐射与各种物质的分子、原子间的相互作用。在这些理论的基础上当时研制成了许多光电器件和装置。1951年提出了利用受激辐射原理，使某些工作物质激发而产生放大或发射电磁波的量子放大器的概念，1954年制成了这种量子放大器，称为“脉塞”。这一切都为激光的问世提供了理论基础和技术条件。

1958年有人提出在光学辐射场中受激辐射应用的可能性。1960年6月美国人梅曼研制成了世界上第一台红宝石激光器，因此他获得了№3353115的专利权。这一发明又反过来推动了量子电子学的蓬勃发展，梅曼的激光器为现代各种激光器奠定了基础。

激光的出现为人类带来了一种崭新的强光源，使光学领域的面貌焕然一新。在短短的26年来，根据不同的需要研制出了很多种类的激光器。根据工作物质的不同，有固体激

光器、半导体激光器、气体激光器、液体激光器等等。从所产生的激光波长看，从最长波长的远红外激光器到最短波长的远紫外激光器在技术先进的国家里都已商品化了。X射线激光器也已研制成功， γ 射线激光器正处于探索之中。

激光具有亮度高、单色性好、方向性强，特别是相干性好的优点，因而广泛应用于各个领域，如激光加工、激光通信、全息照相、激光核聚变、激光分离同位素、信息处理、医疗、育种以及激光武器等。激光技术已经成为当代先进科学技术之一。

激光的出现使光学理论的研究也产生了新的飞跃。激光出现后的第二年，美国人弗兰肯用激光束照射晶体时，发现输出光的频率比原来入射光的频率增加了一倍。这种现象用原来的线性光学理论是无法解释的，从此逐渐形成了一门新的光学分支——非线性光学。许多边缘科学，如光化学、光物理学、光电子学、光信息学、光生物学等等也都由于激光的应用而更新和完善起来，因而使激光技术的应用也更加广泛，从事激光技术工作的队伍也越来越庞大了。

在激光技术领域工作的同志很需要有一本较为系统，又简单明了，既有原理，又有应用和具体数据的激光技术方面的工具书。我们认为《激光技术手册》在一定程度上可以说是这么一本书。本手册是苏联许多从事激光技术工作的专家根据各自的特长集体写成的。在翻译过程中，我们对发现的原书错误均作了更正。但由于水平有限，译文难免有不当之处，诚恳地希望读者批评指正。

最后，对在翻译本手册过程中从各方面给予帮助的同志表示感谢！

译者

序 言

激光的出现对科学技术各领域的发展产生了巨大的影响。激光作为一种完全新型的光源，已经从物理学的研究对象变成了使科学技术前进的重要工具。由于近年来的研究成果，制造了多种不同用途的激光器。虽然现在对激光技术在科学研究、工业生产和信息储存与传递系统方面的作用作出估价还为时过早，但是已经可以看到它在这些方面所展现的巨大前景。

在激光技术发展中所取得的成就使激光技术早已家喻户晓，这一点特别表现在不断出版的各种科技文献中。对激光技术已有分专题写的大量的科学论文、专著和综述性文章，以及已经发表过的一些科普性小册子、杂志和报刊上的评论等等。关于激光技术的图书目录就有几万种。但是在这些已出版的大量书刊中，还没有一本专为广大工程技术人员使用的书籍。在苏联的出版物中，只有1969年出版的《小百科全书》中的“量子电子学”部分是这样的书籍。

本手册的作者试图把激光技术及其与应用有关材料收集在一本书中予以出版。对手册中所涉及到的问题不可能都有全面的论述，这是因为激光技术今天还处于发展阶段。此外，由于篇幅所限，本书未能包括诸如激光在医学、生物学、气象学等应用技术领域中的内容。

本手册共20章，包括四个主要方面，即：阐述激光作用原理的理论问题；各种类型激光器的构造、特性和参数；为

VI

说明激光装置及其应用所必不可缺少的辅助材料；激光技术的实际应用。手册中的各章节分别由下列作者写成：Л. М. 安德鲁什柯写第四章，Ю. В. 巴伊鲍罗金写第五、十、十六、十七章，С. В. 布洛欣写第十一章，В. А. 沃尔科夫写第七、十八、十九章，С. М. 盖拉西莫夫写第三章中的第1~4节，И. И. 扎依采夫写第五章中的第1节，Л. З. 克里克松诺夫写序言和第十二、十四、十五章，Е. Г. 列夫琴科写第九章，О. Н. 李特文年科写第一章和第二十章，С. Е. 马尔克夫写第二章，В. Д. 巴甫利克写第六章和第三章的第5节，Ю. К. 列布林写第十三章，Н. Н. 雅斯特列布写第八章和第十章的第3节。

目 录

译者的话

序言

第一章 量子力学基本原理	1
1. 量子系统的描述方法, 状态函数物理量的可能值	1
2. 薛定谔方程, 贯穿势垒区的粒子	7
3. 对易算符和非对易算符, 测不准关系	16
4. 角动量, 量子数	20
5. 粒子数按能级分布的规律	23
6. 微扰理论	26
7. 量子系统与电磁波的相互作用	27
8. 爱因斯坦系数, 自发跃迁	30
9. 粒子数反转, 负温度	32
10. 辐射的线型和线宽	33
参考文献	35
第二章 光的相干性	36
1. 光的干涉和相干性	36
2. 部分相干性	39
3. 准单色光的干涉	43
4. 互相干波动方程	51
5. 相干性的测量	52
参考文献	54
第三章 激光工作物质	55
1. 固体激光工作物质	55
2. 液体激光工作物质	63

3. 半导体激光工作物质	64
4. 气体激光工作物质	66
5. 建立粒子数反转的方法	67
参考文献	75
第四章 开式光学谐振腔	76
1. 概述	76
2. 平面谐振腔	81
3. 二次相位修正谐振腔	88
4. 光导纤维	94
参考文献	98
第五章 固体激光器	99
1. 分类	99
2. 物理过程和基本特性	100
3. 激光辐射的光谱成分	106
4. 能量、功率和效率	110
5. 固体脉冲激光器的基本特性及结构参数的图解算法	115
6. 工作物质的非稳定热场和导热性	123
7. 固体脉冲激光器的重复频率	125
8. 工作物质的冷却方法	130
9. 冷却介质的热学性能和光谱特性	132
10. 冷却系统和恒温系统的结构举例	135
11. 泵浦功率的阈值	144
12. 气体放电式泵浦灯的参数	145
13. 储能电容	154
14. 脉冲激光器的小型泵浦电源	156
参考文献	158
第六章 半导体激光器	159
1. 概述	159
2. 同质结注入式激光器	164
3. 异质结注入式激光器	169

4. 电子束泵浦激光器和直接电激励激光器	173
5. 光泵浦激光器	175
参考文献	176
第七章 气体激光器、化学激光器和液体激光器	177
1. 气体激光器的概述	177
2. 中性原子激光器	179
3. 离子激光器	183
4. 分子激光器	186
5. 气动激光器	189
6. TEA 激光器	191
7. 化学激光器	195
8. 液体激光器	197
参考文献	203
第八章 激光放大器	204
1. 作用原理、分类和基本特性	204
2. 谐振式激光放大器	205
3. 非再生行波激光放大器	210
4. 激光放大器对激光辐射相干性的影响	213
5. 激光放大器的噪声	214
6. 激光放大器参数的测量方法和原理	217
参考文献	221
第九章 非线性光学	223
1. 非线性光学效应和非线性极化	223
2. 光学检波和谐波振荡	224
3. 光参量振荡	232
4. 受激散射	239
5. 光的自聚焦	244
参考文献	246
第十章 激光的调制	247

1. 激光调制的物理原理、分类对激光调制器的基本技术要求	247
2. 腔外电光调制器	249
3. 声光调制器	258
4. 磁光调制器	260
5. 内腔调制器	262
6. 棱镜开关	263
7. 电光开关	266
8. 被动染料Q开关	269
9. 金属爆裂膜调Q开关	272
参考文献	274
第十一章 形成激光的方法、光路和元件	275
1. 激光的时间和空间特性	275
2. 激光器光路中的元件	280
3. 光学天线	285
4. 选模方法及其原理图	287
5. 色散腔调频	296
参考文献	298
第十二章 激光参数的测量	299
1. 能量参数的测量	299
2. 激光波长的测量	313
3. 脉宽和激光束参数的测量	315
参考文献	317
第十三章 激光扫描系统	318
1. 扫描系统的分类和参量	318
2. 光机偏转器	319
3. 电光晶体连续扫描偏转器	320
4. 不连续数字式偏振偏转器	324
5. 声光偏转器	326

6. 压电偏转器	330
参考文献	334
第十四章 激光在大气中的传输	335
1. 大气层的吸收和散射	335
2. 激光在大气中的传播	339
3. 大气湍流对激光传播的影响	340
4. 强激光在大气中的传输	343
参考文献	346
第十五章 激光辐射探测器	347
1. 分类、基本参数和特性	347
2. 外光电效应激光辐射探测器	350
3. 光敏电阻	361
4. $P-n$ 结激光辐射探测器	368
参考文献	377
第十六章 光学定位	379
1. 激光测距仪的设计原理	379
2. 测距方程, 工程计算曲线图	382
3. 脉冲测距仪	384
4. 相位测距仪	388
5. 运动物体的自动跟踪系统	392
6. 测距仪的精度估算	393
参考文献	394
第十七章 激光陀螺	395
1. 激光陀螺的特点	395
2. 作用原理, 基本特性和分类	395
3. 激光陀螺的组成	402
4. 激光干涉混频器的光学原理图	405
5. 频率分离法, 初始频率装定	406
6. 温度对环形激光器结构的影响	414

Ⅱ

7. 信息测量的“节拍”	415
8. 激光陀螺信息的测量变换器原理图	416
9. 基本参数的近似计算方法	423
10. 激光陀螺的实际精度和可能精度的比较方法	426
参考文献	431
第十八章 激光通信系统	432
1. 激光通信系统的特点及其技术前景	432
2. 发射装置	435
3. 接收装置	438
4. 激光通信系统的应用	443
参考文献	448
第十九章 激光在工业生产和科学研究中的应用	449
1. 激光加工	449
2. 激光用于工艺过程的检验	458
3. 激光在大地测量和建筑工程中的应用	463
4. 激光在科研中的应用	466
参考文献	471
第二十章 相干光信息处理系统	472
1. 光信号在自由空间的变换	472
2. 相干光学系统的元件	477
3. 光信息传输线的理论, 光学滤波器	482
4. 光学匹配滤波	487
参考文献	490

第一章 量子力学基本原理

1. 量子系统的描述方法，状态 函数物理量的可能值

量子电子学出现在二十世纪五十年代中期，目前还正在蓬勃地发展。这一学科领域的对象是研究相干电磁波的产生、放大与变换的量子过程以及随之出现的各种应用〔5〕。整个电磁波谱可以分成下列波段范围。

超长波	大于 10000 米
长波	1000~10000 米
中波	100~1000 米
短波	10~100 米
超短波：	小于 10 米
米波	1~10 米
分米波	1~10 分米
厘米波	1~10 厘米
毫米波	1~10 毫米
亚毫米波	0.4~1 毫米
红外线	0.76 微米~0.4 毫米
可见光：	0.4~0.76 微米
红	0.62~0.76 微米
橙	0.59~0.62 微米
黄	0.56~0.59 微米

绿	0.50~0.56 微米
青	0.48~0.50 微米
蓝	0.45~0.48 微米
紫	0.4~0.45 微米
紫外线	5~400 毫微米
x 射线	0.001~5 毫微米
γ 射线	小于 0.004 毫微米

现有的量子器件可以在无线电波段，以及可见光区、紫外波段产生相干电磁辐射。因此量子器件使得利用极短波长的电磁波来传递信息成为可能。随着波长的减小信息通带展宽，因而可以传递更多的信息。在厘米波波段可以同时传递的电视不大于 100 路或电话不多于十万路，在可见光波段电视的传播量则可增加到一千万路，而传递电话的数量可达到十亿路^[7]。

量子电子学这一新学科之所以能够产生，是由于人们对电磁波与物质相互作用的深刻了解。电磁波与物质中运动着的带电粒子相互作用，我们无法直接观察这种微观世界，只可以通过微观粒子运动所产生的宏观效应来判断。描写这些微观粒子运动规律的科学叫做量子力学。象所有其它学科一样，有其赖以成立的基本假定。根据这些基本原理所导出的结果已多次被实验证实。从而证明了这些原理的正确性。下面我们就来研究量子力学的这些基本假定^[4, 6]；

(1) 物理体系的全部信息都包含在状态函数之中。状态函数也叫做波函数，用字母 Ψ 表示。所谓物理体系就是指一对电子、核子、光子等的运动状态以及对它们不同组合的状态的研究。由研究物理体系而获得一组实数，即坐标、动量和能量的大小等等。量子力学认为上述物理量（微观粒子

的坐标、动量和能量),即物理体系的状态可以用波函数 Ψ 表达,我们的任务是由波函数 Ψ 求出这些物理量的大小。假设波函数与组成物理体系的粒子的坐标、动量和时间有关。对一个粒子来说, $\Psi = \Psi(x, y, z; p_x, p_y, p_z; t)$,式中 x, y, z 为粒子的笛卡尔坐标; p_x, p_y, p_z 为动量的相应分量; t 为时间。

波函数 Ψ 应当满足以下条件:函数 Ψ 在一定区间内应当是连续的、单值的,其平方是可积分的。根据下面将要叙述的原则可以由波函数 Ψ 求解它所表达的物理量。

(2) 每一个物理量(如能量、动量等等)都与一定的厄密算符相对应。可以把算符理解为对某一函数施加的数学运算符号。或者说,算符就是把一个函数变换成另一个函数的运算符号。用字母 O 表示算符。微商算符 $O = d/dx$ 是最简单的算符,它使每个被微函数与它的导数相对应。算符 $O = \sqrt{\quad}$ 表示开平方运算。微商算符属于线性算符,开平方算符为非线性算符。

在量子力学中,每一个物理量都与一个线性算符相对应,因此,下面我们只研究这类算符。满足等式 $^{[2]}O(C_1f_1 + C_2f_2) = C_1Of_1 + C_2Of_2$,式中 C_1 和 C_2 是任意常数; f_1 和 f_2 是任意函数,称为线性算符。不难证明, $O = d/dx$ 是线性算符,而 $O = \sqrt{\quad}$ 是非线性算符。下列算符也属于线性算符:

$$O = \int \dots dx \quad O = d^2/dx^2 = (d/dx)^2$$

$$O = \Delta \text{ (拉普拉斯)} \quad O = \nabla^2 = \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

坐标算符,动量算符和能量算符 $^{[4, 6]}$ 在量子力学中是基本算符。坐标算符 x 就是坐标 x 本身。这个算符是线性

的，因为 $x(C_1 f_1 + C_2 f_2) = C_1 x f_1 + C_2 x f_2$ 。动量算符 \vec{p} (动量 $\vec{p} = m\vec{v}$) 是矢量。用 p_x 、 p_y 、 p_z 表示动量在坐标轴上的投影。这些矢量对应于下列算符，动量在 x 轴上的投影对应于算符 $j\hbar \frac{\partial}{\partial x}$ ，在 y 轴上的投影对应于 $j\hbar \frac{\partial}{\partial y}$ ，在 z 轴上的投影对应于 $j\hbar \frac{\partial}{\partial z}$ ，式中 $j = \sqrt{-1}$ ， $\hbar = 1.05 \times 10^{-34}$ 焦·秒——普朗克常数。

常常用同一个字母来表示算符和一个物理量，例如，动量在 x 轴上的投影的算符可表示为： $p_x = -j\hbar \frac{\partial}{\partial x}$ 。在有些情况下，这样做可能引起误解，因此，常在表示算符的字母上方打上一个“^”号，如 $\hat{p}_x = -j\hbar \frac{\partial}{\partial x}$ 。总动量算符 \hat{p} 象动量本身一样还是矢量。用字母 \bar{k}_x 、 \bar{k}_y 、 \bar{k}_z 表示沿 x 、 y 、 z 轴的单位矢量，则 $\vec{p} = \bar{k}_x p_x + \bar{k}_y p_y + \bar{k}_z p_z$ 。由此可得动量算符的表达式为：

$$\hat{p} = -j\hbar \left(\bar{k}_x \frac{\partial}{\partial x} + \bar{k}_y \frac{\partial}{\partial y} + \bar{k}_z \frac{\partial}{\partial z} \right) = -j\hbar \nabla$$

能量算符 $E = j\hbar \frac{\partial}{\partial t}$

由于线性算符对于量子力学特别重要，所以我们要详细地研究一下这些算符的性质。设有一线性算符为 O ，若函数 Ψ_n 在算符 O 作用下，使 $O\Psi_n$ 等于 Ψ_n 乘以常数 λ_n ，即 $O\Psi_n = \lambda_n \Psi_n$ ，则称 Ψ_n 是算符 O 的本征函数，而 λ_n 是与本征函数相对应的本征值。通常可以有几个（在量子力学中有无数多个）本征函数和本征函数值，如果一个本征值对应一个以上的本征函数，则称此种本征值是简并的。许多本征值的组合