

高等激光物理学

李福利 编著



中国科学技术大学出版社

7A1241
L 22

359776

高等激光物理学

李福利 编著



中国科学技术大学出版社

1992·合肥



(皖)新登字 08 号

高等激光物理学

李福利 编著

*

中国科学技术大学出版社出版

(安徽省合肥市金寨路96号, 邮政编码: 230026)

安徽省金寨县印刷厂印刷

安徽省新华书店发行

*

开本: 850×1168/32 印张: 17.625 字数: 456 千

1992年8月第1版 1992年8月第1次印刷

印数: 1—2500 册

ISBN 7-312-00312-5/O·102 定价: 5.60 元

内 容 提 要

本书以麦克斯韦——布洛赫方程和协同学思想为纲，系统地介绍激光物理学的基础与前沿。除哈肯和拉姆的激光理论外，重点研究光学双稳态，光学混沌和光学孤立于等前沿课题。在激光全量子理论中，还涉及光学压缩态、共振荧光和超荧光等新颖的量子光学现象。全书强调统一性、系统性、新颖性和协同性，重点章节又保持相对独立性和可读性。概念清楚，图象生动，由浅入深，循序渐进，具备量子力学基础知识的读者即可入门。

本书可作为光学、光电子学以及非线性科学领域的高年级大学生、研究生的教材，也可供有关专业及涉足交叉学科的教师和科研工作者参考。



前 言

本书在作者为中国科技大学研究生和中国科学院代培生讲授的激光教材基础上修订而成。

本书定稿之际,正值激光器发明 30 周年。30 年来,激光科学技术日新月异,突飞猛进,已成为 20 世纪最富成果的领域之一。

激光物理学的基本任务是研究激光及其与物质作用的基本规律。激光物理学的 3 个层次的理论分别是速率方程理论、半经典理论和全量子理论。激光物理学的 3 个学派是拉姆学派、哈肯学派和拉克斯-路易塞尔学派。

激光的速率方程理论研究激光的光强以及粒子数分布的变化。激光半经典理论研究激光的基本动力学方程及其应用,包括激光器的基本特性、光学孤立子、光学双稳态和光学混沌等。激光的全量子理论研究激光的量子统计、激光线宽以及光场的非经典效应包括光学压缩态等。

拉姆学派的基础是密度矩阵和密度算符,哈肯学派的基础是郎之万方程,拉克斯-路易塞尔学派的基础是福克-普朗克方程。它们都取得了巨大成功。当然,它们在本质上是等价的。

本书以麦克斯韦-布洛赫方程为主线,贯穿协同学思想,比较统一地处理了激光及其与物质作用的基本问题。该理论体系可以清晰地揭示激光速率方程、半经典理论与全量子理论之间的关系,以及 3 个学派的理论的等价性。读者将会发现,一旦掌握了麦克斯韦-布洛赫方程,便可望在激光物理学的领域初试锋芒,驰骋纵横。

希望本书将以其统一性、系统性、新颖性、协同性和可读性引

起读者的兴趣与共鸣。

全书采用 MKS 单位制。每章都附有习题。

由于激光物理学发展快、领域广，而作者的研究和教学经验极其有限，书中不当与错误之处，尚希激光界前辈与朋友们惠予指正。

作者深切感谢中国科学院物理所、上海光机所、安徽光机所许多专家和同行的关心和支持。在与兄弟院校专家学者的交流中也获益非浅。

作者有机会与许多国际知名的激光物理专家交流和讨论，并参考了他们的工作。应特别向哈肯(Haken)、阿拉克(Arecchi)、洛敦(Loudon)、斯卡利(Scully)、埃里根(Elgin)、陆加特(Lugiato)、伯特洛蒂(Bertolotti)、艾伯里(Eberly)和沃耳斯(Walls)等致谢。

本书部分内容得到国家科委和国家自然科学基金会的支持。

李福利

1992年1月于中国科学技术大学

目 次

1 激光器的概念	(1)
1.1 激光的特性.....	(1)
1.2 受激辐射.....	(6)
1.3 光的放大.....	(9)
1.4 光的反馈.....	(13)
1.5 光的振荡.....	(17)
1.6 激光器的自组织.....	(19)
2 激光器的速率方程理论	(24)
2.1 激光器的速率方程.....	(24)
2.2 激光器的增益饱和.....	(26)
2.3 激光器的瞬态特性.....	(27)
2.4 调 Q 激光器的速率方程	(29)
2.5 均匀加宽的激光器的多模振荡	(31)
3 密度矩阵	(36)
3.1 激光的半经典理论概况与近似条件.....	(36)
3.2 光与二能级原子的作用	(39)
3.3 纯系综的密度矩阵.....	(42)
3.4 混合系综的密度矩阵.....	(45)
3.5 光学布洛赫方程	(47)
3.6 慢变振幅近似与旋转波近似.....	(50)
3.7 光学布洛赫方程的矢量形式.....	(53)

3.8 光学布洛赫方程的定态解·····	(57)
4 麦克斯韦-布洛赫方程 ·····	(60)
4.1 麦克斯韦方程与场方程·····	(60)
4.2 光学布洛赫方程的简明推导·····	(62)
4.3 行波与二能级原子作用的 M-B 方程 ·····	(69)
4.4 谐振腔中的 M-B 方程 ·····	(73)
4.5 哈肯的激光方程·····	(78)
4.6 单模、均匀加宽的行波激光方程·····	(81)
4.7 归一化的宏观量的 M-B 方程 ·····	(84)
4.8 激光器按照动力学的分类(A,B,C 类激光器) ·····	(85)
5 哈肯的半经典激光理论 ·····	(88)
5.1 激光器 M-B 方程的稳定性和阈值 ·····	(88)
5.2 M-B 方程的定态解·····	(91)
5.3 单模激光器的瞬态特性·····	(94)
5.4 非共振的单模激光器·····	(100)
5.5 锁模激光器·····	(103)
5.6 从半经典理论过渡到速率方程理论·····	(105)
6 拉姆的半经典激光理论 ·····	(109)
6.1 激光器的场方程·····	(109)
6.2 增益介质的宏观极化强度的计算·····	(111)
6.3 单模激光器·····	(114)
6.4 多模激光器·····	(119)
6.5 双模激光器·····	(123)
7 气体激光器 ·····	(128)
7.1 多普勒效应引起的非均匀加宽·····	(128)

7.2	驻波产生的烧孔效应与拉姆凹陷	(130)
7.3	拉姆的气体激光半经典理论	(133)
7.4	气体激光器的三阶极化理论	(137)
8	瞬态相干作用	(141)
8.1	瞬态相干作用概念	(141)
8.2	瞬态相干作用的麦克斯韦-布洛赫方程	(143)
8.3	拉比振荡	(144)
8.4	光学章动	(147)
8.5	光子回声的机理	(149)
8.6	光子回声的计算	(153)
9	光学孤立子	(158)
9.1	孤立子的概念	(158)
9.2	自感透明的定性描述	(160)
9.3	面积定理及其含义	(161)
9.4	2π 双曲正割脉冲	(171)
9.5	自感透明的正弦——戈登方程	(178)
9.6	光纤中孤立子的形成机理	(179)
9.7	光纤中孤立子的非线性薛定格方程	(183)
9.8	光纤中孤立子的传输性质	(188)
9.9	非线性薛定格方程的修正	(191)
9.10	光纤孤立子的增益补偿与孤立子放大器	(193)
9.11	光纤中孤立子的相互作用	(197)
9.12	孤立子激光器的实验与理论	(198)
9.13	暗孤立子	(203)
10	光学双稳态	(208)
10.1	光学双稳态的原理	(208)

10.2	光学双稳态的干涉仪理论	(212)
10.3	光学双稳态的M-B方程	(215)
10.4	吸收双稳态与色散双稳态	(218)
10.5	光学双稳态的相变类比	(221)
10.6	起伏或噪音对光学双稳态的影响	(225)
10.7	光学双稳态实验	(227)
11	位相复共轭光学	(232)
11.1	位相复共轭光学的概念	(232)
11.2	四波混频与实时全息	(235)
11.3	二能级系统中四波混频的半经典理论	(238)
11.4	透明的非线性晶体中的四波混频	(241)
12	光学混沌与分形	(244)
12.1	混沌的基本概念	(244)
12.2	倍周期分岔	(245)
12.3	洛仑兹方程与奇异吸引子	(247)
12.4	混沌的定量标志——分形与分维	(254)
12.5	由一维时间序列计算奇异吸引子的关联维数	(261)
12.6	单模均匀加宽激光器的哈肯——洛仑兹模型	(266)
12.7	CO ₂ 激光器的混沌实验	(270)
12.8	非均匀加宽的单模行波激光器的混沌	(276)
12.9	光学双稳态的混沌	(279)
12.10	有延迟的光学双稳态的混沌	(281)
13	辐射场的量子化	(285)
13.1	辐射场的量子化	(285)
13.2	光子的位相算符	(294)
13.3	光子数态和位相态的性质	(300)

13.4	相干态	(304)
13.5	态矢量和算符按相干态展开	(313)
13.6	量子化的相干函数	(322)
14	光与物质作用的全量子理论	(328)
14.1	泡利算符与相互作用哈密顿量	(328)
14.2	二次量子化与相互作用哈密顿量	(337)
14.3	全量子化的麦克斯韦-布洛赫方程	(343)
14.4	自发辐射、受激辐射和光的吸收	(346)
15	激光器的全量子理论	(353)
15.1	激光器全量子理论模型与约化算符方法	(353)
15.2	激光器全量子的四级微扰计算及功率特性	(357)
15.3	激光器全量子理论的强信号理论	(364)
15.4	激光的光子统计	(368)
15.5	激光的线宽	(378)
15.6	福克-普朗克方程	(384)
16	哈肯的全量子激光理论	(394)
16.1	布朗运动与经典的郎之万方程	(394)
16.2	量子力学中的起伏与耗散	(400)
16.3	激光器的量子化郎之万方程	(407)
16.4	单模激光的郎之万方程的求解	(411)
16.5	福克-普朗克方程与光子统计	(415)
17	非线性光学的量子理论	(419)
17.1	倍频	(419)
17.2	参量振荡与腔内四波混频	(422)
17.3	双光子激光器的半经典理论	(428)

17.4	双光子激光器的全量子化方程	(430)
17.5	双光子激光器的半经典解	(431)
18	超荧光与超辐射	(434)
18.1	超荧光的概念与实验现象	(434)
18.2	超荧光的半经典理论	(439)
18.3	超荧光的全量子M-B 方程理论	(441)
18.4	平均场近似下的全量子M-B 方程	(445)
19	共振荧光与光子反聚束	(449)
19.1	光的反聚束、亚泊松分布、压缩态	(449)
19.2	共振荧光的概念和实验	(455)
19.3	共振荧光谱的理论	(457)
19.4	单原子共振荧光的反聚束效应	(463)
20	光学压缩态	(469)
20.1	光学压缩态的概念和定义	(469)
20.2	起伏、均方差与关联函数	(474)
20.3	双光子压缩态与准光子本征态	(478)
20.4	用位移算符与压缩算符定义的压缩态	(480)
20.5	光学压缩态的一般性质	(484)
20.6	光学压缩态与光子反聚束及亚泊松分布	(488)
20.7	多模压缩态与高阶压缩态	(491)
20.8	四波混频产生光学压缩态的实验	(493)
20.9	用光学参量振荡实现光学压缩态	(496)
20.10	压缩态的检测与应用	(499)
21	自由电子激光器	(503)
21.1	自由电子激光器的构造和特点	(503)

21.2	自由电子激光器的自发辐射—同步辐射·····	(508)
21.3	自由电子激光放大器的增益·····	(512)
21.4	自由电子激光动力学的单电子理论·····	(519)
21.5	有锥形磁摆动器的自由电子激光器·····	(523)
21.6	自由电子激光器的全量子理论·····	(526)
21.7	自由电子激光的压缩态·····	(531)
22	激光与协同学·····	(534)
22.1	从激光理论到协同学·····	(534)
22.2	协同学的原理·····	(536)
22.3	激光器的二级相变类比与信息的自组织·····	(540)
22.4	光学双稳态与一级相变·····	(543)
22.5	经络的自组织理论·····	(544)
22.6	激光与大脑·····	(546)

1 激光器的基本概念

本章首先由关联函数和光子统计说明激光特性, 然后介绍受激辐射原理以及光的放大、反馈和振荡, 最后用自组织概念说明激光器的振荡过程。

1.1 激光的特性

本节介绍激光器作为光频振荡器的构造特点, 然后说明激光与普通光的区别。

1.1.1 激光器的构造

激光器即 Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), 原意是利用受激辐射实现光的放大。然而, 实际上的激光器, 一般不是放大器, 而是振荡器, 即利用受激辐射实现光的振荡, 或产生相干光。

1954 年初首先实现了微波的受激放大, 即 Maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)。

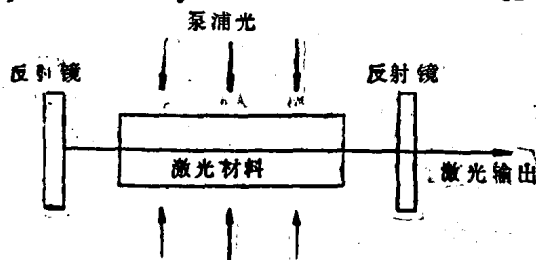


图 1.1 固体激光器示意图

1958 年, 肖洛和唐斯将其原理推广到光学波段。1960 年, 梅曼制

成世界上第一个激光器——红宝石激光器。图 1.1 即为固体激光器的示意图。

众所周知,个性寓于共性之中,一般的振荡器总是包括能源、放大器、正反馈、谐振器和输出等部分。振荡器都是由噪音起振,而且起振条件(自激条件)都是

$$\beta K = 1, \quad (1.1)$$

其中 K 是放大器的放大系数, β 是正反馈系数。与此相似,作为光学波段的振荡器,也由以上几部分组成。在图 1.1 中,泵浦源即能源,工作物质相当于放大器,二个反射镜 M_1 和 M_2 构成谐振腔,同时起正反馈作用。同样,激光器也是由噪音起振,起振条件也是 $\beta K = 1$ 。

然而激光器也有其特殊性。它是利用受激辐射原理实现光的放大,采用光学谐振腔,由自发辐射(噪音)起振。本章将介绍光的放大、正反馈和振荡的概念。

1.1.2 激光的特性

激光是具有奇妙特性的光。人们用不同的物理语言描述激光特性以及它与普通光(热光源)的区别,例如激光有好的单色性、方向性、有很高的光子简并度,有特殊的光子统计特性等。

激光的单色性对应于时间相干性,方向性对应于空间相干性。

光子简并度是指一个模内的光子数(1.2节),激光的光子简并度比普通光源的光子简并度高许多数量级。

有时还用单色亮度说明激光特性,即单位时间、单色谱线宽度、单位立体角内通过单位面积的光能。激光的单色亮度比太阳高许多数量级。

1.1.3 光场的表示与关联函数

利用指数公式容易导出光场的复数形式。

$$E(r, t) = E_0 \sin(kr - \omega t)$$

$$= \left(\frac{i}{2}E_0\right)\exp(ikr - i\omega t) + \left(-\frac{i}{2}E_0\right)\exp(-ikr + i\omega t) \\ = \mathcal{E}(ae^{-i\omega t + ikr} + a^+ e^{i\omega t - ikr}), \quad (1.2)$$

$$\mathcal{E} \equiv i\sqrt{\frac{\hbar\omega}{2\varepsilon_0 v}}. \quad (1.3)$$

其中 $(i/2)E_0 = \mathcal{E}a$ 。光场中随 $e^{-i\omega t}$ 变化的部分称为正频部分，随 $e^{i\omega t}$ 变化的部分为负频部分，通常分别记为 $E^{(+)}(r, t)$ 和 $E^{(-)}(r, t)$ ，

$$E(r, t) = E^{(+)}(r, t) + E^{(-)}(r, t), \quad (1.4)$$

在式(1.2)和(1.4)中， $a^+ = a^*$ ， $E^{(+)} = E^{(-)*}$ 。

若把式(1.2)中的 a 和 a^+ 理解为复数，它就是经典光场。若 a 和 a^+ 为算符，且满足如下的对易关系

$$[a, a^+] = aa^+ - a^+a = 1, \quad (1.5)$$

它就是量子化的光场。光子数算符 $\hat{n} = a^+a$ ， $\mathcal{E}$ 即代表一个光子的光场〈详见第13章〉。

光场的相干性由相干函数表示

$$G(1, 2) = \langle E^{(-)}(r_1, t_1)E^{(+)}(r_2, t_2) \rangle, \quad (1.6)$$

若 $t_1 = t_2$ ，上式表示时间相干性；若 $r_1 = r_2$ ，则代表时间相干性。式中的 $\langle \dots \rangle$ 在经典光场中表示对时间求平均；在量子理论中是量子力学平均。

类似地把一阶关联函数 $g_{12}^{(1)}$ 定义为

$$g_{12}^{(1)} = \frac{\langle E^{(-)}(r_1, t_1)E^{(+)}(r_2, t_2) \rangle}{(\langle E^{(-)}(r_1, t_1)E^{(+)}(r_1, t_1)E^{(-)}(r_2, t_2)E^{(+)}(r_2, t_2) \rangle)^{1/2}}. \quad (1.7)$$

当 $r_1 = r_2$ 时的关联函数称为自关联函数，

$$g^{(1)}(\tau) = \frac{\langle E^{(-)}(t)E^{(+)}(t+\tau) \rangle}{\langle E^{(-)}(t)E^{(+)}(t) \rangle}, \quad (1.8)$$

同样可定义二阶关联函数和二阶的自关联函数。二阶自关联函数（以后也简称二阶关联函数）

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle E^{(-)}(t)E^{(-)}(t+\tau)E^{(+)}(t+\tau)E^{(+)}(t) \rangle}{\langle E^{(-)}(t)E^{(+)}(t+\tau) \rangle^2} \quad (1.9)$$

二阶关联函数可以反映光场的根本性质。图 1.2 表示激光与普通光的二阶关联函数的区别。激光的 $g^{(2)}(\tau) \approx 1$ ，而普通光（热光源）的 $g^{(2)}(\tau)$ 随 τ 迅速地从 2 衰减到 1。以后我们还会看到混沌

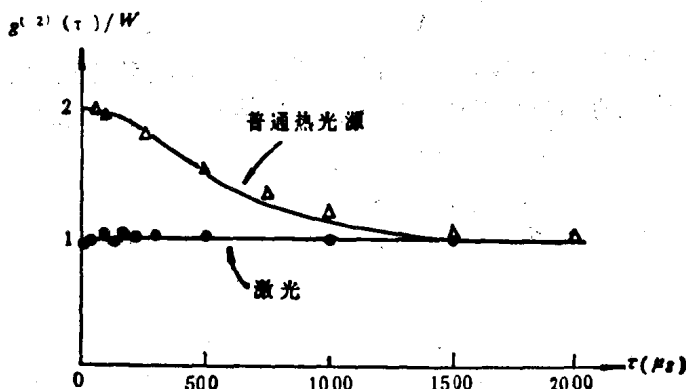


图 1.2 激光与普通光的二阶关联函数

激光与反聚束的光的 $g^{(2)}(\tau)$ 也各有特征。

理想的激光近似为单色光 ($e^{-i\omega t}$)，读者可以证明单色光的 $g^{(2)}(\tau) = 1$ 。

1.1.4 激光的光子统计特性

由热力学和统计物理可以知道，普通的光源的光子是玻色分布的。

$$P_n = (1 - e^{-x})e^{-nx}. \quad (1.10)$$

其中 n 是光子数目， $x = \hbar\omega/(kT)$ 。容易计算

$$\begin{aligned} \langle n \rangle &= \sum_n n P_n = (1 - e^{-x}) \sum_n n e^{-nx} \\ &= -(1 - e^{-x}) \frac{d}{dx} \sum_n e^{-nx}, \end{aligned} \quad (1.11)$$

利用级数公式，进一步得到

$$\langle n \rangle = \frac{1}{e^x - 1} = \bar{n}, \quad (1.12)$$