

研究生教学用书

教育部学位管理与研究生教育司推荐

# 高等激光物理学

(第二版)

*Advanced Laser Physics*

*(Second Edition)*

李福利 编著

高等教育出版社

研究生教学用书

教育部学位管理与研究生教育司推荐

# 高等激光物理学

(第二版)

Advanced Laser Physics  
(Second Edition)

李福利 编著

高等教育出版社

## 内容提要

本书是在作者于中国科学技术大学、清华大学、中国科学院研究生院和首都师范大学讲课使用的教材基础上修订、补充而成的,全书以麦克斯韦-布洛赫方程为主线,系统地介绍了激光物理学的基础与前沿,除哈肯和拉姆激光理论外,还重点介绍了光学双稳态、光学混沌、光学孤立子、光学压缩态、量子信息、激光冷却与玻色-爱因斯坦凝聚、慢光速与超光速、光子晶体、阿秒激光、THz 辐射等。全书内容由浅入深,循序渐进,概念清晰,图像生动,具备量子力学基本知识的读者即可入门。

本书可作为光学、光电子学、物理电子学专业研究生教材,也可供信息技术、半导体、凝聚态物理的研究生、教师和科研人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

高等激光物理学/李福利编著. —2 版. —北京:高等教育出版社,2006. 7

ISBN 7-04-018402-8

I. 高… II. 李… III. 激光基础-高等学校-教材 IV. TN241

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 059296 号

策划编辑 王超 责任编辑 王超 封面设计 李卫青  
责任绘图 朱静 版式设计 史新薇 责任校对 王超  
责任印制 朱学忠

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010-58581000		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
印 刷	北京明月印务有限责任公司	畅想教育	<a href="http://www.widedu.com">http://www.widedu.com</a>
开 本	787×960 1/16	版 次	2006 年 7 月第 2 版
印 张	36.25	印 次	2006 年 7 月第 1 次印刷
字 数	610 000	定 价	53.00 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 18402-00

## 第二版序言

本书自1992年初版、1995年第二次印刷,至今已十多年了,它的核心框架经受了时间的考验。

本书原是1985—1996年作者在中国科学技术大学讲课使用的研究生教材。有些兄弟院校也采用了本教材。1996年作者从中国科学技术大学调到首都师范大学物理系,随后在清华大学、中国科学院研究生院和首都师范大学为研究生同步讲授此课程。

2004年,本书被评为教育部推荐研究生教材。借再版之机,作者引用近几年发表的一些文献,汇编了6章反映新进展、新前沿的内容。这就是新增加的第22章至27章的“量子信息科学”、“激光冷却与玻色-爱因斯坦凝聚”、“慢光速与超光速”、“光子晶体”、“飞秒激光与阿秒激光”、“THz辐射技术与应用”,以及第28章最后一节的“大脑压缩态与纠缠态”。

本书尽力介绍了与激光有关的多项诺贝尔奖。在第1章中,涉及了诺贝尔奖获得者汤斯、肖洛、布隆姆贝根、凯·西格班、巴索夫、普罗霍罗夫和戈劳伯的工作。第11涉及到伽博关于全息的工作。第1章和第17章涉及到布隆姆贝根的工作。特别是第23章详细介绍了朱棣文,科恩·塔诺季,菲利普斯获1997年诺贝尔奖的工作(激光冷却)和获2001年诺贝尔奖的工作(玻色-爱因斯坦凝聚)。第13章详细介绍了格劳伯获2005年诺贝尔奖的工作。第26章介绍了霍尔和亨施获2005年诺贝尔奖的工作。此外量子信息、慢光速与超光速、光子晶体、THz辐射、阿秒激光与阿秒物理也是引人瞩目的前沿。

本书作为教材,需因时制宜、因人制宜。在1985—1996年,作者在中国科学技术大学讲授此课用80学时,可把半经典理论和全量子理论讲完,有的学生能把全书习题做完。近几年来,作者讲授此课用60学时左右,则是主要讲完半经典理论,再介绍一些专题。这次新版,为教师和学生提供了更多的选择余地。但仍需把密度矩阵、麦克斯韦-布洛赫方程作为基本内容。在此基础上,可选择孤立子、混沌等作为专题,或选择量子理论、激光冷却、量子传态等作为专题。当然,有志于从事激光物理工作的硕士生或相近专业的博士生,还是应该了解和掌握全书的内容。

在教学方法方面,作者多年来把文科的“案例教学法”引入激光物理

教学,初见成效。我们把与激光有关的诺贝尔奖及最新前沿问题作为案例,介绍和剖析相关问题的背景、问题、难点和突破口。在讲解过程中,启发同学发表意见,引导同学设想自己处于当时情境,能否提出问题,找到突破口,我们思维方式的问题出在什么地方,我们创新能力的差距在什么地方。不仅是整个课程要精选几个案例,而且每堂课也尽量提出和分析案例。这样,把课程的核心内容与科学史、人文精神、创新能力、努力方向结合起来,对同学会有触动。对调动同学学习积极性,启发学生独立思考,培养学生创新能力颇有益处。

本书的修订和补充得到了高等教育出版社的关心和支持。我的学生周斌权、沙琳、王春秀、逯美红、任荣东、王新柯等曾给予协助。清华大学、中国科学院研究生院、首都师范大学的其他研究生也提供了一些有价值的参考资料。对于书中的错误或片面之处,请专家与同学指正。

我想借此机会特别强调,激光物理学是十分有趣与活跃的研究领域,恳切希望使用本书的同学和青年科学家们,大胆创新,勇攀高峰,为国争光。

最后,我愿将自己改写的几句打油诗献给读者:“日新日新又日新,今超昨日明超今。预支五百年新意,过了千年又觉陈。”

李福利

2005年7月于北京花园村

## 初版前言

本书是在作者为中国科学技术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的。

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。

拉姆学派的理论基础是密度矩阵和密度算符,哈肯学派的理论基础是郎之万方程,拉克斯-路易塞尔学派的理论基础是福克-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 个学派的理论等价性。读者将会发现,一旦掌握了麦克斯韦-布洛赫方程,便有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匪浅。

作者有机会与许多国际知名的激光物理学专家交流和讨论,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(Berto-

lotti)、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年于中国科学技术大学

## 全书主要符号表

$a$	消灭算符
$a^+$	产生算符
$\alpha_\mu$	量纲为 1 的原子电偶极矩
$A_{21}$	自发辐射系数
$A_\lambda$	光场正频分量的慢变振幅
$A_\lambda^*$	光场负频分量的慢变振幅
$B_{12}$	吸收系数
$B_{21}$	受激辐射系数
$\mathbf{B}$	布洛赫矢量
$\hat{b}_s$	“准光子”消灭算符
$\hat{b}_s^+$	“准光子”产生算符
$D$	反转粒子数
$D_c$	临界反转粒子数
$D_1$	信息维数
$D_2$	关联维数
$D(\alpha)$	平移算符
$D(\nu)$	模密度
$D_w$	波导色散
$D_m$	材料色散
$E_i$	入射光场
$E_t$	透射光场
$E_\lambda^{(+)}$	第 $\lambda$ 个模的光场的正频分量
$E_\lambda^{(-)}$	第 $\lambda$ 个模的光场的负频分量
$\mathbf{F}$	光与原子电偶极矩的作用力
$F_n$	Fano 因子
$g_{12}^{(1)}$	一阶关联函数
$g^{(1)}(\tau)$	二阶关联函数
$g_{\mu\lambda}$	第 $\lambda$ 个模的光场与第 $\mu$ 个原子的耦合常数
$g_L(\nu)$	洛伦兹线型



$g_G(\nu)$	高斯线型
$G$	相干函数
$K$	放大器的放大系数
$k'$	光腔损耗
$k_B$	玻耳兹曼常量
$n$	光子数
$n_g$	群速度折射率
$n_{cl}$	光纤包层的折射率
$n_{co}$	光纤芯层的折射率
$P$	电子偶极矩
$P_n$	极化强度
$P_\lambda^{(+)}$	第 $\lambda$ 个模的极化强度的正频分量
$P_\lambda^{(-)}$	第 $\lambda$ 个模的极化强度的负频分量
$\hat{S}(\zeta)$	压缩算符
$T_c$	临界温度
$t_s$	自发辐射寿命
$U$	光与原子电偶极矩的作用势
$v_g$	群速度
$v_p$	相速度
$\rho$	密度矩阵
$\rho_{aa}$	原子在上能级几率
$\rho_{bb}$	原子在下能级几率
$\rho_{ab}$	复数电偶极矩
$\rho(\nu)$	光能密度
$\rho_A$	约化算符
$\rho_{FA}$	场与原子的密度算符
$\Delta\nu_D$	多普勒线宽
$\nu_D$	静止原子的中心频率
$\gamma_{ab}$	电偶极矩 $\rho_{ab}$ 的衰减
$\gamma_{ph}$	解相衰减
$\gamma_\perp$	横向弛豫参数
$\gamma_\parallel$	纵向弛豫参数
$\Omega_\lambda$	腔的第 $\lambda$ 个模的角频率
$\Omega_c$	被动腔频率
$\Omega_R$	光学布洛赫量的旋转的角频率

---

$\omega_b$	拍频
$\omega_{CW}$	连续激光器的频率
$\omega_r$	重复频率
$\omega_0$	偏移频率
$\bar{\omega}_\mu$	第 $\mu$ 个原子跃迁的中心频率
$\bar{\Delta}$	失谐参数
$\theta_{ab}$	原子的电偶极矩的矩阵元
$\mu_0$	真空磁导率
$\epsilon_0$	真空介电常数
$\epsilon_r$	相对介电常数
$\mathbf{e}_a$	单位偏振矢量
$\epsilon_s(r)$	晶格介质的介电常数

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任 and 行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

**反盗版举报电话：**(010) 58581897/58581896/58581879

**传 真：**(010) 82086060

**E - mail：**dd@hep. com. cn

**通信地址：**北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

**邮 编：**100011

**购书请拨打电话：**(010) 58581118

# 目 录

全书主要符号表 .....	( I )
<b>第 1 章 激光器的基本概念 .....</b>	<b>( 1 )</b>
1.1 激光的特性 .....	( 1 )
1.2 受激辐射 .....	( 5 )
1.3 光的放大 .....	( 7 )
1.4 光的反馈 .....	( 11 )
1.5 光的振荡 .....	( 14 )
1.6 激光器的自组织 .....	( 15 )
习题与思考 .....	( 17 )
参考文献 .....	( 18 )
<b>第 2 章 激光器的速率方程理论 .....</b>	<b>( 19 )</b>
2.1 激光器的速率方程 .....	( 19 )
2.2 激光器的增益饱和 .....	( 20 )
2.3 激光器的瞬态特性 .....	( 22 )
2.4 调 Q 激光器的速率方程 .....	( 23 )
2.5 均匀加宽的激光器的多模振荡 .....	( 25 )
习题与思考 .....	( 27 )
参考文献 .....	( 27 )
<b>第 3 章 密度矩阵 .....</b>	<b>( 28 )</b>
3.1 激光的半经典理论概况与近似条件 .....	( 28 )
3.2 光与二能级原子的作用 .....	( 30 )
3.3 纯系综的密度矩阵 .....	( 32 )
3.4 混合系综的密度矩阵 .....	( 35 )
3.5 光学布洛赫方程 .....	( 37 )
3.6 慢变振幅近似与旋转波近似 .....	( 39 )
3.7 光学布洛赫方程的矢量模型 .....	( 42 )
3.8 光学布洛赫方程的定态解 .....	( 44 )
习题与思考 .....	( 46 )
参考文献 .....	( 46 )

<b>第 4 章 麦克斯韦-布洛赫方程</b> .....	(47)
4.1 麦克斯韦方程与场方程 .....	(47)
4.2 光学布洛赫方程的简明推导 .....	(48)
4.3 行波与二能级原子作用的 M-B 方程 .....	(54)
4.4 谐振腔中的 M-B 方程 .....	(57)
4.5 哈肯的激光方程 .....	(61)
4.6 单模、均匀加宽的行波激光方程 .....	(64)
4.7 归一化的宏观量的 M-B 方程 .....	(66)
4.8 激光器按照动力学的分类(A,B,C类激光器) .....	(67)
习题与思考 .....	(68)
参考文献 .....	(68)
<b>第 5 章 哈肯的半经典激光理论</b> .....	(69)
5.1 激光器 M-B 方程的稳定性和阈值 .....	(69)
5.2 M-B 方程的定态解 .....	(71)
5.3 单模激光器的瞬态特性 .....	(74)
5.4 非共振的单模激光器 .....	(78)
5.5 锁模激光器 .....	(80)
5.6 从半经典理论过渡到速率方程理论 .....	(82)
习题与思考 .....	(84)
参考文献 .....	(84)
<b>第 6 章 拉姆的半经典激光理论</b> .....	(85)
6.1 激光器的场方程 .....	(85)
6.2 增益介质的宏观极化强度的计算 .....	(87)
6.3 单模激光器 .....	(89)
6.4 多模激光器 .....	(93)
6.5 双模激光器 .....	(96)
习题与思考 .....	(99)
参考文献 .....	(99)
<b>第 7 章 气体激光器</b> .....	(101)
7.1 多普勒效应引起的非均匀加宽 .....	(101)
7.2 驻波产生的烧孔效应与拉姆凹陷 .....	(102)
7.3 拉姆的气体激光半经典理论 .....	(105)
7.4 气体激光器的三阶极化理论 .....	(109)
习题与思考 .....	(110)
参考文献 .....	(110)

<b>第 8 章 瞬态相干作用</b> .....	(111)
8.1 瞬态相干作用概念 .....	(111)
8.2 瞬态相干作用的麦克斯韦-布洛赫方程 .....	(112)
8.3 拉比振荡 .....	(113)
8.4 光学章动 .....	(116)
8.5 光子回声的机理 .....	(118)
8.6 光子回声的计算 .....	(120)
习题与思考 .....	(124)
参考文献 .....	(124)
<b>第 9 章 光学孤立子</b> .....	(125)
9.1 孤立子的概念 .....	(125)
9.2 自感透明的定性描述 .....	(126)
9.3 面积定理及其含义 .....	(127)
9.4 $2\pi$ 双曲正割脉冲 .....	(135)
9.5 自感透明的正弦-戈登方程 .....	(140)
9.6 光纤中孤立子的形成机理 .....	(141)
9.7 光纤中孤立子的非线性薛定谔方程 .....	(145)
9.8 光纤中孤立子的传输性质 .....	(149)
9.9 非线性薛定谔方程的修正 .....	(151)
9.10 光纤孤立子的增益补偿与孤立子放大器 .....	(152)
9.11 光纤中孤立子的相互作用 .....	(156)
9.12 孤立子激光器的实验与理论 .....	(157)
9.13 暗孤立子 .....	(160)
习题与思考 .....	(162)
参考文献 .....	(162)
<b>第 10 章 光学双稳态</b> .....	(164)
10.1 光学双稳态的原理 .....	(164)
10.2 光学双稳态的干涉仪理论 .....	(167)
10.3 光学双稳态的 M-B 方程 .....	(169)
10.4 吸收双稳态与色散双稳态 .....	(171)
10.5 光学双稳态的相变类比 .....	(174)
10.6 起伏或噪声对光学双稳态的影响 .....	(177)
10.7 光学双稳态实验 .....	(179)
习题与思考 .....	(181)
参考文献 .....	(181)

<b>第 11 章 位相复共轭光学</b> .....	(183)
11.1 位相复共轭光学的概念 .....	(183)
11.2 四波混频与实时全息 .....	(186)
11.3 二能级系统中四波混频的半经典理论 .....	(188)
11.4 透明的非线性晶体中的四波混频 .....	(190)
参考文献 .....	(192)
<b>第 12 章 光学混沌与分形</b> .....	(193)
12.1 混沌的基本概念 .....	(193)
12.2 倍周期分岔 .....	(194)
12.3 洛伦兹方程与奇异吸引子 .....	(195)
12.4 混沌的定量标志——分形与分维 .....	(200)
12.5 由一维时间序列计算奇异吸引子的关联维数 .....	(206)
12.6 单模均匀加宽激光器的哈肯-洛伦兹模型 .....	(210)
12.7 CO <sub>2</sub> 激光器的混沌实验 .....	(214)
12.8 非均匀加宽的单模行波激光器的混沌 .....	(218)
12.9 光学双稳态的混沌 .....	(220)
12.10 有延迟的光学双稳态的混沌 .....	(222)
习题与思考 .....	(224)
参考文献 .....	(224)
<b>第 13 章 辐射场的量子化</b> .....	(226)
13.1 辐射场的量子化 .....	(226)
13.2 光子的位相算符 .....	(233)
13.3 光子数态和位相态的性质 .....	(238)
13.4 相干态 .....	(241)
13.5 态矢量和算符按相干态展开 .....	(249)
13.6 量子化的相干函数 .....	(256)
习题与思考 .....	(253)
参考文献 .....	(260)
<b>第 14 章 光与物质作用的全量子理论</b> .....	(261)
14.1 泡利算符与相互作用哈密顿量 .....	(261)
14.2 二次量子化与相互作用哈密顿量 .....	(268)
14.3 全量子化的麦克斯韦-布洛赫方程 .....	(273)
14.4 自发辐射、受激辐射和光的吸收 .....	(275)
习题与思考 .....	(280)
参考文献 .....	(280)

<b>第 15 章 激光器的全量子理论</b> .....	(281)
15.1 激光器全量子理论模型与约化算符方法 .....	(281)
15.2 激光器全量子的四级微扰计算及功率特性 .....	(284)
15.3 激光器全量子理论的强信号理论 .....	(289)
15.4 激光的光子统计 .....	(293)
15.5 激光的线宽 .....	(300)
15.6 福克-普朗克方程 .....	(305)
习题与思考 .....	(311)
参考文献 .....	(311)
<b>第 16 章 哈肯的全量子激光理论</b> .....	(313)
16.1 布朗运动与经典的朗之万方程 .....	(313)
16.2 量子力学中的起伏与耗散 .....	(318)
16.3 激光器的量子化朗之万方程 .....	(323)
16.4 单模激光的朗之万方程的求解 .....	(326)
16.5 福克-普朗克方程与光子统计 .....	(329)
习题与思考 .....	(331)
参考文献 .....	(332)
<b>第 17 章 非线性光学的量子理论</b> .....	(333)
17.1 倍频 .....	(333)
17.2 参量振荡与腔内四波混频 .....	(335)
17.3 双光子激光器的半经典理论 .....	(340)
17.4 双光子激光器的全量子化方程 .....	(342)
17.5 双光子激光器的半经典解 .....	(342)
参考文献 .....	(344)
<b>第 18 章 超荧光与超辐射</b> .....	(345)
18.1 超荧光的概念与实验现象 .....	(345)
18.2 超荧光的半经典理论 .....	(349)
18.3 超荧光的全量子 M-B 方程理论 .....	(351)
18.4 平均场近似下的全量子 M-B 方程 .....	(354)
参考文献 .....	(356)
<b>第 19 章 共振荧光与光子反聚束</b> .....	(357)
19.1 光的反聚束、亚泊松分布、压缩态 .....	(357)
19.2 共振荧光的概念和实验 .....	(362)



19.3	共振荧光谱的理论 .....	(363)
19.4	单原子共振荧光的反聚束效应 .....	(368)
	参考文献 .....	(372)
<b>第 20 章</b>	<b>光学压缩态 .....</b>	<b>(373)</b>
20.1	光学压缩态的概念和定义 .....	(373)
20.2	起伏、均方差与关联函数 .....	(377)
20.3	双光子压缩态与准光子本征态 .....	(380)
20.4	用位移算符与压缩算符定义的压缩态 .....	(382)
20.5	光学压缩态的一般性质 .....	(385)
20.6	光学压缩态与光子反聚束及亚泊松分布 .....	(388)
20.7	多模压缩态与高阶压缩态 .....	(390)
20.8	四波混频产生光学压缩态的实验 .....	(392)
20.9	用光学参量振荡实现光学压缩态 .....	(394)
20.10	压缩态的检测与应用 .....	(397)
	习题与思考 .....	(399)
	参考文献 .....	(399)
<b>第 21 章</b>	<b>自由电子激光器 .....</b>	<b>(400)</b>
21.1	自由电子激光器的构造和特点 .....	(400)
21.2	自由电子激光器的自发辐射——同步辐射 .....	(404)
21.3	自由电子激光放大器的增益 .....	(407)
21.4	自由电子激光动力学的单电子理论 .....	(413)
21.5	有锥形磁摆动器的自由电子激光器 .....	(416)
21.6	自由电子激光器的全量子理论 .....	(418)
21.7	自由电子激光的压缩态 .....	(422)
	参考文献 .....	(424)
<b>第 22 章</b>	<b>量子信息科学 .....</b>	<b>(425)</b>
22.1	量子信息 .....	(425)
22.2	纠缠态 .....	(426)
22.3	量子计算 .....	(430)
22.4	量子网络及其应用 .....	(441)
22.5	纠缠态分析的实际方法 .....	(444)
22.6	用参量下转换产生偏振纠缠态的光子对 .....	(447)
22.7	量子态远程传输的原理 .....	(450)
22.8	量子态远程传输实验 .....	(453)
	习题与思考 .....	(459)