

激光原理

Laser Principle

田来科 白晋涛 田东涛

陕西科学技术出版社

内 容 简 介

本书从激光的经典理论和速率方程理论出发,系统地介绍和分析了激光的产生、形成、传播、变换和应用过程中,激光场和激光束分布的基本规律、特征和机理,对激光的半经典理论和量子理论以两个独立的章节进行了简洁的展示,并对激光器件、激光技术和应用最新前沿成果和动态进行了简要介绍和分析。本书着重于物理基本原理和概念的论述与分析,并结合一些应用实例和大量的插图,论述深入浅出,便于自学。各章、节及节下一级标题均以中英文对照的形式奉献给读者,为对着查阅和读取外文文献做一铺垫。

本书可作为高等院校物理类、电子类、通信类等学生,如光信息科学与技术、应用物理、材料物理、电子信息科学与技术及通讯类专业的本科生或研究生教材,也可供高等院校、研究所和相关领域从事光学、光电子学、电子及相关研究和应用技术的科技人员、医生和工程技术人员参考。

前 言

21 世纪,是知识大爆炸的世纪,是信息大膨胀的世纪,是现代高新技术飞速发展的世纪。把握时代脉搏,紧跟时代步伐,抓住机遇,迎接更大的挑战,追踪、探索最新科技前沿的动态,掌握最新的科学技术知识,是时代的要求,是人类社会向前发展的要求,也是能在激烈竞争社会中立足于不败之地的要求。现代信息技术、现代生物技术、纳米材料技术、航空航天技术和激光技术,则是 21 世纪世界各国在科技领域竞争的制高点。第一台激光器的诞生至今已 40 余年,激光科学与技术得到了迅猛地发展及在各个领域中得到了广泛的应用,形成了一系列新的交叉学科,如:信息光电子学、激光医学与光子生物学、激光加工技术、激光检测与计量技术、信息光学与技术、激光光谱学与分析技术、非线性光学、激光化学、超快光子学、量子光学、原子光学、分子光学、集成光学、傅立叶光学、激光分离同位素、激光可控核聚变、激光武器、激光冷却原子、激光光镊技术等不胜枚举。激光技术的发展和运用,已经创造了许多世界之最,例如:最高的功率——激光单个脉冲输出功率已达 $1.3 \times 10^{16} \text{W}$;最大的功率密度—— 10^{20}W/cm^2 ;可产生最高的温度——超过 10^8K ;最强的电场—— $8 \times 10^{13} \text{V/cm}$;最高的气压—— 3.3×10^{11} 大气压;最低的温度—— $2.0 \times 10^{-8} \text{K}$;最短的时间脉冲—— 10^{-16}s 20 世纪末,物质波激光器的诞生,是激光技术又一新的重大突破,也预示着在科学领域有可能发生新的革命性突破和进展。1997 年 10 月 17 日,美国用化学激光武器成功地摧毁了两颗过期的空间地球卫星、俄罗斯研究用激光发射卫星、美籍华人朱棣文等成功地用激光冷却原子而获得诺贝尔奖.....这一切,充分显示了激光这一高新科学技术诱人的魅力和绚丽灿烂的光辉前景。

展望未来,激光将会进一步给物理、化学、生命科学、纳米材料及光量子通信诸多的基础学科和现代技术领域提供了其他任何手段均无法提供的极端条件、手段和技术装置。2002 年 11 月在北京举行的一个大型激光技术与应用的展览会后,中央电视台 10 频道报道了许多著名科学家联名写信给教育部,鉴于激光技术在各个学科领域及高新技术中的普遍应用,呼吁并建议在全国所有工科院校也开设激光课程。当前,激光原理、激光器件与技术不但是光信息、应用物理、电子信息类专业的必修课,且在许多院校的材料科学、物理学等专业也成为其必须选修课,有一些高校已确定激光原理、激光器件与技术课程为面向全校的公共选修课程。综上所述,激光的未来发展充满着巨大的机遇、挑战与创新空间。

本书既考虑在校本科生课程学习的需要、又兼顾从事相关行业的科研和工程人员工作需求。它既可作为教师、学生专业课学习的教材,又可供研究和应用激光的研究人员、工程技术人员和激光医学的医务人员等使用。它从作者从事激光、光电子等课程教学和科研数十年的经验出发,紧密结合激光学科的最新科技成果和前沿动态,将激光的产生、形成、传输、控制和应用中所遵循的基本规律和原理,按照人们通常最易接受和理解的结构顺序奉献给读者。为适应 21 世纪的教学改革,书中章节均以中英文对照的方式呈现给读者。由于作者水平有限,书中难免还存在一些缺欠、疏漏和不足之处,恳望广大读者不吝赐教。

作 者

2004 年 3 月

本书使用主要符号一览表 List of Symbols in This Book

A	—— 矩阵元	f	—— 光学元件焦距
A	—— 光束横截面	f	—— 共焦腔的焦距 $f = \rho w_0^2 / ? = F$
A_{ij}	—— 从能级 i 向能级 j 的自发辐射跃迁系数	G	—— 增益系数
A	—— 矩阵元	g	—— 线型函数
a	—— 能级 a	H	—— 哈密顿量
a	—— 光学元件通光孔半径	H	—— 磁场强度
B	—— 矩阵元	h	—— 普朗克常数
$\overset{i}{B}$	—— 磁感应强度	h	—— 普朗克常数除以 2π , $h = h/2\pi$
B_{ij}	—— 从能级 i 向能级 j 的受激吸收系数	I	—— 电流强度
B_{ji}	—— 从能级 j 向能级 i 的受激辐射系数	$I_?$	—— 频率为 $?$ 的光强度
b	—— 矩阵元	I_s	—— 饱和光强度
b	—— 能级 b	i	—— 复数虚部标记
C	—— 矩阵元	J	—— 电流密度
c	—— 矩阵元	$\overset{i}{k}$	—— 波矢量
c	—— 真空中的光速	k	—— 玻尔兹曼常数
c	—— 能级 c	L	—— 腔长
D	—— 矩阵元	l	—— 工作物质长度
$\overset{i}{D}$	—— 电位移矢量	l	—— 圆形镜谐振腔激光振荡场的横模序数
D	—— 光学元件通光孔直径	M	—— 矩阵
d	—— 光学元件通光孔直径	M	—— 放大倍率
d	—— 矩阵元	$\overset{i}{M}$	—— 磁化强度
E	—— 能量	m	—— 方形镜谐振腔激光振荡场的横模序数
$\overset{i}{E}$	—— 电场强度	n	—— 方形镜谐振腔激光振荡场的横模序数
E	—— 电场振幅	n	—— 激光工作物质中某能态上所分布的粒子个数
E	—— 电场本征函数	$\overset{i}{P}$	—— 电极化强度
E_i	—— 粒子能量	p	—— 圆形镜谐振腔激光振荡场的横模序数
F	—— 瑞利长度又称准直长度 $F = \rho w_0^2 / ? = z_R$		

Q	—— 质量因子	F_{mn}	—— 相位函数
R	—— 光学元件曲率半径	$? F_{mn}$	—— 相位差
R	—— 光学元件反射率	$?$	—— 光束发散角
r	—— 光学元件曲率半径	a	—— 光在工作物质中传播单位长度时的损耗
r	—— 光学元件反射系数	d	—— 光在工作物质中传播一个单程时的损耗
\vec{S}	—— 玻印廷矢量	$?$	—— 复常数因子
S_{ji}	—— 无辐射跃迁系数	$?_{mn}$	—— 本征值
T	—— 光学元件透过率	$?$	—— 空间两点间的距离
t	—— 光学元件透射系数	$?$	—— 密度矩阵元
u	—— 光波电磁场的波函数	$??$	—— 频率间隔宽度
V	—— 体积	$? ?_F$	—— 荧光线宽
v	—— 介质中的光速	$? ?_q$	—— 相邻纵模频率间隔
v	—— 气体介质中的粒子速率	$? ?_m$	—— 相邻横模频率间隔
W	—— 介质中的光速	$? ?_n$	—— 相邻横模频率间隔
w	—— 光束半径	s	—— 电导率
x	—— 坐标量	s_m	—— 本征值
y	—— 坐标量	s_n	—— 本征值
z	—— 坐标量	s_{21}	—— 受激辐射截面
z_R	—— 瑞利距离 $z_R = \pi w_0^2 / \lambda = F$	s_{12}	—— 受激吸收截面
$?$	—— 电磁波频率	$G()$	—— 伽玛函数
$?_q$	—— 激光器振荡电磁波频率, 简称激光振荡频率		
$?$	—— 电磁波波长		
$?$	—— 电磁波圆频率 = $2\pi?$		
e	—— 介质中的介电常数		
e_0	—— 真空中的介电常数 $e_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$		
μ	—— 电磁波在介质中的磁导率		
μ_0	—— 电磁波在真空中的磁导率 $\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6} \text{H/m}$		
$?$	—— 介质折射率		
$?$	—— 波函数		
	—— 光子数密度		
F	—— 总光子数		

目 录

CONTENTS

第 1 章 激光概论	
Chapter 1 Laser Conspectus.....	(1)
1.1 学科梗概	
Skeleton of Laser Subject.....	(1)
1.2 激光发展简史	
Historical Perspective of Laser.....	(2)
1.3 激光器件	
Laser Device.....	(9)
1.4 波动方程	
Wave Equation.....	(15)
1.5 光的本质	
Nature of Light.....	(16)
1.6 模式、状态与简并度	
Modes, States and Degeneracy.....	(17)
1.7 激光特性与光谱	
Laser Characteristic and Spectra.....	(22)
1.8 激光技术	
Laser Technology.....	(26)
1.9 激光应用	
Laser Application.....	(28)
概念与习题	
Concepts & Problems.....	(31)
第 2 章 激光物质	
Chapter 2 Laser Materials.....	(33)
2.1 物质类型	
Types of Laser Material.....	(33)
2.2 物质辐射	
Materials-radiation.....	(37)
2.3 激光器构成思想	
Design Thought of Lasers.....	(42)
2.4 粒子数反转分布	
Population Inversion.....	(44)

2.5 线型与线宽	
Line Shape and Line Width.....	(46)
概念与习题	
Concepts & Problems.....	(57)
第3章 光学谐振腔	
Chapter 3 Optical Resonator.....	(59)
3.1 光线传输矩阵	
Ray-transmission Matrix.....	(59)
3.2 谐振腔稳定条件	
Stability Condition of Resonator.....	(64)
3.3 谐振腔的类型	
Types of Resonator.....	(67)
3.4 激光场轴向分布-纵模	
Longitudinal Distribution of Laser Fields – Longitudinal-mode.....	(69)
3.5 激光场横向分布-横模	
Transverse Distribution of Laser Fields – Transverse-mode.....	(73)
3.6 腔损耗与光子寿命	
Cavity Loss and Photon Lifetime.....	(76)
3.7 Q 值与腔线宽	
Value Q and Linewidth of Resonator.....	(78)
概念与习题	
Concepts & Problems.....	(79)
第4章 光与物质相互作用	
Chapter 4 Interactions between Light and Matter.....	(82)
4.1 泵浦与激活物质	
Pumping Process and Active Medium.....	(82)
4.2 激光振荡速率方程	
Laser Oscillation Rate Equation.....	(83)
4.3 激光物质的光增益	
Light Gain of Laser Material.....	(92)
4.4 激光物质的饱和增益	
Saturated Gain of Laser Material.....	(94)
概念与习题	
Concepts & Problems.....	(116)

第 5 章 激光器工作原理	
Chapter 5 Operating Principle of Laser.....	(119)
5.1 激光振荡的条件	
Laser Oscillation Condition.....	(119)
5.2 脉冲激光器	
Pulsed Laser.....	(122)
5.3 稳态激光器	
Stationary Laser.....	(128)
5.4 稳态激光器的输出	
Output of Stationary Laser.....	(131)
5.5 激光弛豫振荡	
Laser Relaxation-oscillation.....	(134)
5.6 激光线宽极限	
Laser Linewidth Limit.....	(135)
5.7 有源腔振荡频率—频率牵引与推斥效应	
Oscillating Frequency of Active Cavity - Frequency Pulling and Frequency Pushing Effects.....	(138)
概念与习题	
Concepts & Problems.....	(140)
第 6 章 光学谐振腔的衍射理论	
Chapter 6 Diffraction Theory of Optical Resonator.....	(142)
6.1 稳定腔场方程	
Field Equation of Stable Cavity.....	(142)
6.2 平行平面镜腔场的数值解	
Numerical Solution of Plane-parallel Cavity Field.....	(145)
6.3 方形镜球面共焦腔场	
Square Mirror-spherical Confocal Cavity Field.....	(152)
6.4 圆形镜球面共焦腔场	
Circle Mirror-spherical Confocal Cavity Field.....	(168)
6.5 一般稳定球面腔场	
General Stable Spherical Cavity Field.....	(172)
6.6 非稳定谐振腔	
Unstable Resonator.....	(182)
概念与习题	
Concepts & Problems.....	(198)

第 7 章 高斯光束	
Chapter 7 Gaussian Beams.....	(201)
7.1 高斯光束的特性	
Gaussian Beam Characteristic.....	(201)
7.2 光束质量 M^2 因子	
Beam Quality Factor M^2	(205)
7.3 q 参数及 $ABCD$ 定律	
q Parameter and $ABCD$ Law.....	(207)
7.4 高斯光束薄透镜的变换	
Transposition of Gaussian Beam Transmitting Through Thin Lens.....	(209)
7.5 高斯光束的聚焦	
Gaussian Beam Focusing.....	(215)
7.6 腔内光场的自在现分析	
Self-reproduce Analysis in Resonators Field.....	(222)
7.7 高斯光束的模匹配	
Mode-matching of Gaussian Beam.....	(227)
7.8 高斯光束的准直	
Gaussian Beam Alignment.....	(231)
7.9 高斯光束的测量	
Gaussian Beam Measurement.....	(234)
概念与习题	
Concepts & Problems.....	(237)
第 8 章 激光半经典理论	
Chapter 8 Semiclassical Theory of Laser.....	(240)
8.1 自洽场与量子电偶极子	
Self-consistent Field and Quantum-electric Dipole.....	(240)
8.2 Lamb 自洽场方程	
Lamb Self-consistent Field Equation.....	(242)
8.3 密度矩阵	
Density Matrix.....	(247)
8.4 激光介质的极化感应	
Polarized Induction of Laser Medium.....	(251)
8.5 激光半经典理论	
Semiclassical Theory of Laser.....	(256)
概念与习题	
Concepts & Problems.....	(268)

第 9 章 激光量子理论	
Chapter 9 Quantum Theory of Laser.....	(270)
9.1 量子跃迁理论	
Quantum Transition Theory.....	(270)
9.2 场量子化与产生湮灭算子	
Field Quantization and Creation Operator and Annihilation Operator.....	(272)
9.3 辐射跃迁几率	
Radiation Transition Probability.....	(275)
9.4 单模光子速率方程	
Single-mode Photon Rate Equations.....	(276)
9.5 阈值条件	
Threshold Condition.....	(277)
9.6 原子速率方程	
Atomic Rate Equations.....	(278)
9.7 光子速率方程	
Photon Rate Equations.....	(280)
9.8 激光器光子分布与涨落	
Photons Number Distribution and Fluctuation of Optical Field in Lasers...	(282)
概念与习题	
Concepts & Problems.....	(285)
参考文献	
References.....	(286)
附录 1 综合练习题.....	(288)
激光原理期末综合训练题.....	(297)
附录 2 激光中常用物理常数.....	(302)
附录 3 常见国际单位.....	(303)
附录 4 典型激光器的部分参数.....	(305)
附录 5 希腊字母表.....	(307)

第 1 章 激光概论

Laser Introduction

1.1 学科梗概

Skeleton of Laser Subject

Laser, 是 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (光的受激辐射放大) 的词头字母的缩写, 初期音译为莱塞, 后由著名科学家钱学森提出译为激光, 现又有人称其为镭射, 激光学科大体由四大块组成。

1.1.1 激光原理

Laser Principle

激光原理, 是在激光的产生、形成、输出、传播和应用过程中, 带有普遍性的、最基本的规律和道理。他可作为研究激光器件、技术及应用开发的规律及特性的理论基础之一。他从产生激光的装置——激光器的结构特点出发, 研究讨论激光的产生、形成、输出、传播和应用过程的规律特征和机理。

1.1.2 激光器件

Device of Laser

激光器件着重介绍激光的器件类型、结构特征、工作原理及输出特性。产生形成激光振荡的装置设备主要由三部分组成:

- 1) 工作物质: 激光器的核心, 激光产生和形成的物质基础和场所。
- 2) 激励系统: 激光产生和形成过程中提供能量, 使工作物质处于激活状态的条件保证。
- 3) 谐振腔: 激光产生和形成过程中提供光学反馈, 限制、选择光场分布的模式和影响激光输出光束特性的, 由两片或两片以上的反射镜组成的光学装置。

1.1.3 激光技术

Laser Techniques

为满足不同领域要求, 使激光器输出的性能指标得以改进而采用的装置设备技术。常见技术大体可分为两大类: 激光单元技术和激光应用技术。激光单元技术通常可分为 11 种: 激光调 Q 技术、锁模技术、稳频技术、选横模技术、选纵模技术、光放大技术、非线性光学技术 (二次非线性光学技术、光参量振荡技术、受激拉曼散射技术, 亦有译为受激喇曼散射技术)、激光调制技术、激光偏转技术、激光传输技术 (准直技术、周期性光学系

统的传输、模式匹配技术、非均匀介质中的传输、介质光波导传输)和激光检测技术等。而激光应用技术则常按照不同的应用领域进行划分,可分为:激光在农业领域的应用技术、激光在工业领域的应用技术、激光在军事和安全领域的应用技术、激光在科学领域的应用技术、激光在信息领域的应用技术、激光在医学和生命科学上的应用技术、激光在计量和检测领域的应用技术、激光在文化领域的应用技术、激光在商业领域的应用技术、激光在建筑领域的应用技术等。

1.1.4 激光应用

Laser Applications

激光的诞生导致了光学领域的巨大革命,同时对整个科技领域的进步和发展起到了助力器的作用,他已被广泛地应用到工业、农业、科学、医学、通信、国防、信息及商业等各个领域,带动和导致了许多新兴学科的诞生和发展。如信息光学、非线性光学、激光光谱学、光化学、光生物学、光物理学、激光医学、光通讯、光传感器、光计算机、光神经网络、光子学、光电子学、集成光学、导波光学、傅立叶光学、激光热核聚变及高速摄影等迅速兴起。美国于1997年10月17日用化学激光器成功地摧毁了过期的空间地球卫星,俄罗斯研究用激光发射卫星,美籍华人朱棣文等成功地用激光冷冻原子而获诺贝尔奖等,这一切,充分显示出激光这一高新科学技术的诱人魅力和绚丽灿烂的光辉前景。

激光的应用涉及从宇观、宏观、介观、微观直至渺观等所有科学领域中的前沿学科,激光的理论从经典、半经典、简化量子到全量子理论,充满了神秘的色彩、诱人的魅力和极大的挑战性,给科学探索的勇士们提供了犀利的武器和开拓了广阔的天地。

1.2 激光发展简史

Historical Perspective of Laser

1.2.1 激光发展大事年表

Memorabilia of Laser Development

表 1.2.1 中列出了激光发展过程中的几个阶段。

表 1.2.1 激光发展大事年表

时间	名称	人名(国别)
— 早期理论发展阶段		
17 世纪	光微粒学说	Sir I.Newton (英)
1678 年	光波动学说	C.Huygens (荷兰)
1825 年	光干涉衍射理论	A.I.Fresnel (法)
1858 年	电磁波试验测量	J.Weber (德)
1871 年	光电磁波统一, Maxwell 方程建立	I.C.Maxwell (英)
1888 年	电磁波也具干涉衍射实验证明	H.Herts (德)
1905 年	狭义相对论、光量子假说、光的波粒二相性	A.Einstein

续表

时间	名称	人名 (国别)
1917	自发辐射、受激辐射	A.Einstein (德)
1928	实验实现受激辐射	R.Ladenburg , H.Kopferman (德)
1936	红宝石光谱 R 线计算及光谱测量	Elephanbein (德)
1940	试验观察到粒子数反转	
二 微波量子放大器		
1950	再次验证粒子数反转	E.M.Pucell , R.V.Pound (美)
1951	独立提出受激辐射放大理论	V.A.Fabrikant , C.H.Townes , (美) J.Weber (德) N.G.Basov , A.M.Prohorov (苏联)
1954	计算和设计方案	C.H.Townes , I.P.Gorden , H.J.Zeiger (美)
1954	氮分子气体微波量子放大器诞生	C.H.Townes , I.P.Gorden , H.J.Zeiger (美)
1957	红宝石微波量子放大器诞生	H.J.Zeiger (美)
三 激光发展阶段		
1957. 9	第一次提出光频受激辐射放大	C.H.Townes (美)
1957.11.13	独立提出光频受激辐射放大构思 并提出证据公证	R.G.Gould (美)
1958.8	“ 红外和光子激光器 ” 在贝尔公司注册并在物理评论发表	C.H.Townes , A.L.Schawlow (美)
1958	“ 实现三能级粒子数反转和半导体激光器建议 ”	N.G.Basov , A.M.Prohorov (苏联)
1959.9	首届量子电子会议召开	组织人 Townes (伦敦)
1959.9	半导体量子机理电磁振荡器和放大建议	J.N.Popov , N.G.Basov (苏联)
1959.9	红宝石激光器建议	C.H.Townes , (美)
1959.9	He-Ne 气体连续波激光器建议	A.Javan (伊朗)

续表

时间	名称	人名 (国别)
1960.5.15	第一台红宝石激光器诞生	T.H.Maiman (美)
1960.7.7	休斯公司宣布激光器诞生	
1960.11	$U^{3+}:\text{CaF}_2$ 激光器运转	P.P.Sorkin (美)
1960.12	$\text{Sm}^{2+}:\text{CaF}_2$ 激光器	M.I.Stevenson (美)
1960.12.13	He-Ne 连续波激光器 632.8nm	A.Javan(伊朗)
1961	激光非线性效应和可调谐的实现	P.A.Franken , A.H.Hill 等 (美)
1961	玻璃激光器, 调 Q 激光器	E.Snitzer 等 (美)
1962	GaAs 半导体激光器	R.H.Hall (美)
1964	激光半经典理论建立	Lamb 等
1964	CO_2 、 Ar^+ 、 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器诞生	H.Patel (美)等
1964	化学激光器诞生	J.V.V.Kasper (美)
1965	LiNbO_3 光参量振荡器诞生, 用半经典理论预言了锁模效应存在	
1966	固体锁模激光器, 染料激光器	
1966	多波长染料激光器	F.P.Schäfer (德)
1970	电子束激励液氙分子激光器	J.J.Ewing (美)
1970	准分子激光器	
1975	第一台 CO_2 激光束放大器	J.Madey 等 (美)
1977	自由电子激光器	D.A.G.Deacon(美)
1970 年后	激光经典、半经典和量子理论基本形成	

1.2.2 中国激光发展大事年表

Laser Development Memorabilia of China

表 1.2.2 中国激光发展大事年表

时间	名称	人名
1959	微波量子放大器氰化钾分子振荡放大	黄武汉等
1960	红宝石微波量子放大器	黄武汉、林福成等
1961.9	红宝石激光器	王之江等
1962	钕玻璃激光工作物质	
1963.6	$U^{3+}:\text{CaF}_2$ 激光器	刘颂豪等
1963.7	He-Ne 激光器 632.8nm	邓锡铭等
1963.12	He-Ne 激光器 1.1526 μm	林俊琛

续表

时间	名称	人名
1963.12	调 Q 红宝石激光器	余文炎等
1963.12	钕玻璃激光器	干福熹, 蔡英时等
1964	Nd ³⁺ :CaWO ₃ 激光器	
1964	纯 Xe、He-Xe 激光器	
1964	Dy ²⁺ :CaE ₂ 连续红外激光器	
1964.8	半导体激光器	王乃弘, 庄蔚华等
1965	CO ₂ 分子激光器	王润文等
1965	Ar ⁺ 离子激光器	
1965	Kr 离子激光器	
1965	CH ₃ I 化学激光器	邓锡铭等
1966	YAG 激光器	屈乾华等
1967	无机液体激光器	
1971	GaAs-GaAlAs 双异质结激光器	
1971	TEACO ₂ 激光器	
1972	CO ₂ 气动激光器	
1973	DF、HF 气动化学激光器	
1973	N ₂ 分子激光器	
1974	I 原子激光器	中国科技大学化学系
1974	气体爆炸气动激光器	
1975	连续可调谐染料激光器	
1975	室温连续工作双异质结 GaAs 激光器	
1975	固体爆炸气动激光器	
1976	YAG 泵浦染料激光器	
1977	氟化氙准分子激光器	
1978	HCN 远红外激光器	
1978	XeBr、XeCl 准分子激光器	
1978	电子束泵浦 XeF 准分子激光器	
1978	Xe 灯泵浦染料激光器	
1978	五磷酸钕激光器	
1978	室温 CO 分子激光器	
1978	室温选支 CO 分子激光器	
1978	甲烷稳频激光器	
1979	16μCO ₂ 激光器	
1979	四磷酸钕铯激光器	

续表

时间	名称	人名
1980	连续调谐 11GHz 氨分子激光器	
1982-1985	连续调谐环形染料激光器	
1983	LiF 色心调 Q 锁模激光器	
1984	光引发氧碘化学激光器	
1984	碘稳频激光器	
1984	高功率 Nd ³⁺ :YAP 激光器	
1984-1985	单模半导体激光器	
1985	PnSnSc 半导体可调谐激光器	
1986	X 光预电离重复频准分子激光器	
1986	电子束泵浦 KrF 准分子激光器	
1987.6	10 ¹² W 高功率激光器系统	通过国家鉴定
1987	拉曼自由电子激光器	
1987	同时输出 6 种波长 He-Ne 激光器	
1987	仲氢受激拉曼激光器系统	
1988	单横模 Nd ³⁺ :YAP 连续激光器	
1988	BBO 非线性晶体激光器	
1988	硫双原子分子宽谱区可调谐激光器	
1988	准分子激光泵浦染料激光器	
1988	GaAs / GaAlAspnpn 负阻激光器	
1989	千兆瓦超短脉冲 YAG 激光器	
1984	大尺寸优质 Nd ³⁺ :磷酸盐玻璃	
1984	高钕浓度自激活 NAB 激光晶体	
1985	大尺寸非线性尿素晶体	
1986	BBO(β -BaB ₂ O ₄)非线性晶体 (1.06 μ m 倍频效率 85%)	福州物构所
1986	紫外 LAP 非线性晶体	
1986	高效率倍频 KTP 非线性晶体	山东大学
1987	“神光装置”系列化磷酸盐玻璃	
1987	LBO 非线性晶体	福州物构所
1987	紫外红外波段激光防护玻璃	
1988	大尺寸铁电 KN 非线性晶体	
1988	可实现 11 个波长激光振荡的 Er ³⁺ :YAG 晶体	
1988	优质激光偏振棱镜	
1989	紫外激光介质反射膜	

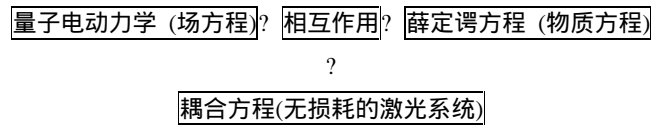
1.2.3 激光的理论框架

Theory Frame of Laser

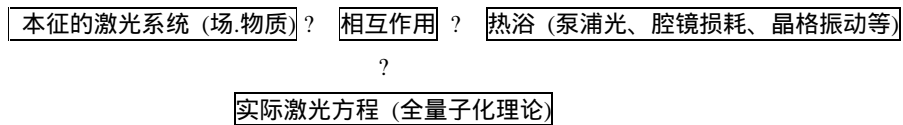
光与物质的共振相互作用，特别是这种相互作用中的共振受激辐射过程，是激光形成过程的物理基础。所以对激光过程的描述就涉及两个对象，一是光频电磁场；二是与光场之间发生相互作用的组成激光工作物质的粒子（原子、分子、离子等）体系。依据对此二者之间相互作用过程采用模型、描述方法不同激光理论可分为：

(1) 全量子理论

光的受激辐射和自发辐射过程都是典型的量子力学效应。因此，激光理论应是一个全量子化理论。又因为光场是一种电磁场，其基本方程应由量子电动力学导出。而辐射过程是由原子的电子（或离子）产生的。所以，需要研究量子化的光频电磁场与用量子力学描述的电子系统之间的相互作用。其理论框图可概括如下：



场方程与物质方程之间耦合，能描述光和物质的各种相互作用的过程，但他忽略了周围环境的效应。例如：光辐射场通过光学腔镜的部分逸出、工作物质中杂质的吸收、电子同晶格振动之间的相互作用，电子同泵浦光的作用等。而只有吸收泵浦能量等于损耗时，才能维持激光。所以，实际激光理论框图应为：



这种理论的实质是将光频电磁场与组成工作物质的原子体系作为一个统一的体系加以量子化描述，他是激光物理的理论基础。其特点是理论处理严谨，但教学过程繁杂，难以求解。

(2) 半经典理论

将光频电磁场视为满足 Maxwell 方程组的经典电磁场，而将工作物质原子之中的电子视为服从量子力学规律的微观粒子。激光场与原子的作用归结量子力学中的微扰。处于粒子数反转状态的工作物质，感生出来的宏观电极化强度就是激光辐射源。由此，借助波动方程可导出激光器腔内激光电场的振幅和频率所满足的方程——拉姆 (Lamb) 自洽场方程。当求解这些方程时，又必须知道宏观电极化强度的解析表示式。由于工作物质是由大量的，处于不同运动状态的粒子组成的，所以，在决定宏观电极化强度时，可采用量子统计中的密度矩阵的方法。

半经典理论是由 Lamb 从 1964 年开始研究的，所以又称 Lamb 理论。他能解释激光的增益饱和、频率牵引与推斥、多模耦合与模式竞争、位相锁定、增益曲线的烧孔效应、拉