

普通高等教育
兵工类规划教材

量子光学导论

沈柯 编著

北京理工大学出版社

量子光学导论

沈 柯 编著

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书研究量子光学中的原子合作发光、共振荧光、光学双稳态、光学混沌、光学孤子、光学压缩态、原子状态相干和无粒子数反转光放大以及量子光学的基本理论。

本书在讨论量子光学中的基本现象时,注重实验事实和物理概念的阐述,并结合具体现象建立相应的基础理论和基本方程。内容由浅入深。

本书适用于光学专业、物理电子学与光电子学专业以及与应用物理有关的专业研究生的量子光学课程的教学;同时可作为应用物理、应用光学、光电子技术等专业本科生专业课教材和高等学校教师及科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

量子光学导论/沈柯编著. -北京:北京理工大学出版社,1995

ISBN 7-81045-035-2

I. 量… I. 沈… III. 量子光学-高等学校-教材

IV. 0431

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 13223 号

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路 7 号)

(邮政编码 100081)

各地新华书店经营

北京地质印刷厂印刷

*

850×1168 毫米 32 开本 10 印张 255 千字

1995 年 9 月第一版 1995 年 9 月第一次印刷

ISBN 7-81045-035-2/O·3

印数:1-1200 册 定价:7.00 元

※图书印装有误,可随时与我社退换※

出版说明

遵照国务院国发[1978]23号文件精神,中国兵器工业总公司承担全国高等学校兵工类专业教材的规划、编审、出版的组织工作。自1983年兵总教材编审室成立以来,在广大教师的积极支持和努力下;在国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的积极配合下,已完成两轮兵工类专业教材的规划、编审、出版任务。共出版教材211种。这批教材出版对解决兵工专业教材有无问题、稳定教学秩序、促进教学改革、提高教学质量都起到了积极作用。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设需要,特别是国防现代化培养人才的需要,反映国防科技的先进水平,达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求,我们以提高教材质量为主线,完善编审制度、建立质量标准、明确岗位责任,制订了由主审人审查、责任编委复审和教编室审定等5个文件。并根据兵工类专业的特点,成立了十个专业教学指导委员会,以更好地编制兵工类专业教材建设规划,加强对教材的评审和研究工作。

为贯彻国家教委提出的“抓好重点教材,全面提高质量,适当发展品种,力争系统配套,完善管理制度,加强组织领导”的“八五”教材建设方针,兵总教材编审室在总结前两轮教材编审出版工作的基础上,于1991年制订了1991~1995年兵工类专业教材编写出版规划。共列入教材220种。这些教材都是从学校使用两遍以上、实践证明是比较好的讲义中遴选的,专业教学指导委员会从兵工专业教材建设的整体考虑对编写大纲进行了审查,认为符合兵

工专业培养人才要求,符合国家出版方针。这批教材的出版必将为兵工专业教材的系列配套,为教学质量的提高、培养国防现代化人才,为促进兵工类专业科学技术的发展,都将起到积极的作用。

本教材由北京理工大学魏光辉教授主审,经中国兵器工业总公司夜视及激技术专业教学指导委员会复查,兵总教材编审室审定。

限于水平和经验,这批教材的编审出版难免有缺点和不足之处,希望使用本教材的单位和广大读者批评指正。

中国兵器工业总公司教材编审室

1994年9月

前 言

量子光学是光学学科新兴的前沿领域,本书所讨论的原子合作发光、共振荧光、光学双稳态、光学混沌、光学孤子、光学压缩态、原子状态相干和无粒子数反转光放大以及量子光学的基本理论,近年来发展相当迅速。由于这些量子光学现象,将有可能成为新的高技术的生长点,因而受到人们的广泛重视。

作者自 1982 年起为研究生讲授量子光学课程,在讲课讲稿基础上于 1987 年编印了“量子光学导论”讲义,随着量子光学的迅速发展,经不断充实,编写成本书。本书适用于光学专业,物理电子学与光电子学专业以及与应用物理有关的专业研究生的量子光学课程的教学;也可以作为应用光学、应用物理、光电子技术等专业本科生专业课教材以及高等学校教师和科研人员的参考书。

魏光辉教授主审本书,有百忙中提出许多宝贵意见;兵器工业教材编审室为本书的出版作了许多工作,在此向他们表示感谢。

欢迎对书中不妥之处提出指正。

作 者

1994 年 10 月于长春

目 录

绪论

第一章 光场中的二能级原子

- § 1-1 引言 (3)
- § 1-2 原子与光场相互作用的经典理论 (4)
- § 1-3 光场中二能级原子的波函数 (8)
- § 1-4 光场中二能级原子的密度矩阵方程 (13)
- § 1-5 麦克斯韦-布洛赫方程 (16)
- § 1-6 光场中二能级原子的布洛赫方程 (20)
- § 1-7 光场的量子化 (32)
- § 1-8 二能级原子与光场相互作用的哈密顿算符 (37)
- 参考文献 (40)

第二章 原子合作发光

- § 2-1 原子群的合作自发辐射 (41)
- § 2-2 狄克超辐射 (45)
- § 2-3 超荧光 (56)
- § 2-4 超荧光的单摆方程 (65)
- § 2-5 双色超荧光 (78)
- 参考文献 (82)

第三章 共振荧光

- § 3-1 共振荧光 (83)
- § 3-2 共振荧光的基本方程和对动力学斯塔克效应的讨论 (86)
- § 3-3 共振荧光的光子反聚束效应 (91)
- 参考文献 (94)

第四章 光学双稳态

- § 4-1 光学双稳态 (95)

| | | |
|----------------------|------------------------------------|-------|
| § 4-2 | 光学双稳态的理论分析 | (103) |
| § 4-3 | 光学双稳态的池田(Ikeda)方程 | (130) |
| | 参考文献 | (135) |
| 第五章 光学混沌 | | |
| § 5-1 | 引言 | (136) |
| § 5-2 | 关于混沌的若干基本概念 | (138) |
| § 5-3 | 光学双稳态系统的不稳定性 | (153) |
| § 5-4 | 光学双稳态混沌 | (159) |
| § 5-5 | 激光器的不稳定性 | (171) |
| § 5-6 | 激光混沌 | (178) |
| § 5-7 | 非线性光学现象的混沌 | (186) |
| § 5-8 | 倍周期分岔光学系统在分岔状态下对弱信号的 放大作用 | (190) |
| | 参考文献 | (194) |
| 第六章 光学压缩态 | | |
| § 6-1 | 引言 | (196) |
| § 6-2 | 光的相干态 | (197) |
| § 6-3 | 最小测不准态 | (203) |
| § 6-4 | 光子的泊松分布律 | (207) |
| § 6-5 | 光学压缩态 | (209) |
| § 6-6 | 光学压缩态的产生 | (218) |
| | 参考文献 | (228) |
| 第七章 光学孤子 | | |
| § 7-1 | 引言 | (229) |
| § 7-2 | 光学自感透明 | (231) |
| § 7-3 | 光纤压缩光脉冲和形成光学孤子 | (236) |
| § 7-4 | 光纤孤子的非线性薛定谔方程 | (241) |
| § 7-5 | 光纤中光学孤子的性质 | (247) |
| § 7-6 | 孤子激光器 | (251) |
| | 参考文献 | (255) |
| 第八章 无粒子数反转光放大 | | |
| § 8-1 | 引言 | (257) |

| | | |
|------------------|-------------------------------------|-------|
| § 8-2 | 反冲型无粒子数反转光放大原理 | (260) |
| § 8-3 | 具有两个相邻高能级原子系统的无粒子数反转光 放大原理 | (262) |
| § 8-4 | 具有两个相邻低能级原子系统的无粒子数反转光 放大原理 | (269) |
| § 8-5 | 缀饰态激光器原理 | (272) |
| § 8-6 | 在原子状态相干介质中光的放大和传播理论分析 | (275) |
| § 8-7 | 无粒子数反转光放大实验 | (292) |
| | 参考文献 | (295) |
| 第九章 全量子理论 | | |
| § 9-1 | 引言 | (297) |
| § 9-2 | 无损耗和无起伏的系统 | (298) |
| § 9-3 | 朗之万方程 | (300) |
| § 9-4 | 福克-普朗克方程 | (304) |
| § 9-5 | 密度矩阵方程 | (307) |
| | 参考文献 | (310) |

绪 论

早期的量子光学现象,诸如黑体辐射、光电效应、康普顿-吴有训散射、喇曼散射、光的强度起伏等等,对于人们认识光的量子属性和光与物质之间相互作用的规律等方面,起过重要作用。

进入 20 世纪 50 年代以后,人们对原子自发辐射机制进行了深入的探索,结果先后发现了两类原子合作发光现象,这就是熟知的狄克(R. H. Dicke)超辐射和超荧光,它们的光强度与发光的原子数平方成正比,因此引起人们的重视。由于共振荧光谱线出现交流斯塔克(AC STARK)效应以及共振荧光的光子统计性质所表现出的特点,引起研究共振荧光的兴趣。光学双稳态的发现,推动研究各类光学双稳态系统,迄今对光学双稳态的研究已相当深入,有趣的是光学双稳态回线的下支,来自原子合作效应。随着对自然界中各类现象的混沌的研究的展开,关于光学领域里的混沌问题的研究相当广泛,从激光器,光学双稳态系统到各类非线性光学现象,对它们的不稳定性和混沌的研究,进展甚快。孤立波现象在自然中是较普遍的,在光波段,对光学孤子的产生和性质的研究,因与光通讯工程技术有着密切联系,而引起重视。光学混沌和光学孤子属于光学系统的非线性动力学问题。关于光学压缩态以及与光子聚束,光子反聚束效应相联系的光子统计分布规律,目前正在进行大量的实验研究和理论研究。近年来开展的原状态相干和无粒子数反转光放大的问题研究,已成为量子光学的重要领域。以上所列举的狄克超辐射、超荧光、共振荧光、光学双稳态、光学混沌、光学孤子、光学压缩态、光子统计分布律、原子状态相干和无粒子数反转光放大等,大致构成了现今较比公认的量子光学的研究内

容。国内也有称此为近代量子光学的,这大概是为了区分早期的量子光学效应。

本书以上述诸现象作为内容,系统地研究它们各自所遵循的基本规律和基本方程组,并同已有的实验事实紧密联系,阐述它们的特性。由于还在不断出现新的实验,因此本书侧重于基础方面的讨论。

从原则上看,上述诸现象主要涉及到原子的各类发光机制问题,不同的发光机制发出的光子的统计性质问题,光场的状态及其控制问题,光与物质相互作用中的非线性动力学问题以及原子状态相干的介质的光学特性问题。从理论上来看,已经建立起来了一套描写这些现象的半经典理论和全量子理论。从实验上来看,激光的出现,为研究大量的量子光学现象,提供了强有力的手段。

量子光学现象有着广阔的应用前景,例如:光学双稳态系统可能应用于光计算技术和光学计算机,光学混沌可能应用于信息科学技术,超荧光的研究,对于在一些波段上相干辐射的产生,提供一条可能的途径,光学压缩态的研究,在测量技术等方面将产生重大影响,光学孤子的研究,对光通讯的发展,将起重要推动作用,原子状态相干和无粒子数反转光放大问题的研究,将有助于解决激光科学技术中的一些问题,等等,可以看出,本书所研究的对象,将成为一些新的高技术的生长点。

第一章 光场中的二能级原子

本章讨论量子光学中常用的一些物理概念。首先从经典观点讨论光场与二能级原子相互作用的规律。然后建立在光场中的二能级原子的波函数方程和密度矩阵方程以及麦克斯韦-布洛赫方程,在引入赝自旋算符描写二能级原子的电偶极矩算符之后,建立光场中二能级原子的光学布洛赫方程,并举例说明它的应用,这些半经典方程在量子光学中有着广泛的应用。最后讨论二能级原子与光场相互作用的全量子理论基础。

§ 1-1 引言

研究量子光学现象,一般总是归结为研究光场与原子相互作用问题。在很多场合下,可以看作是二能级原子与光场的相互作用,实验表明,这种处理往往是正确的。

我们首先从经典的观点来讨论,即认为原子是最简单的带电系统——电偶极子,认为光场是经典电磁场,在经典电磁学和经典力学范围内研究它们之间的相互作用规律,将会看到,这种方法简单、直观,在一系列情形下,能够给出与实验相符合的结果。

半经典理论认为原子的运动服从量子力学规律,而光场则是经典的电磁场,它的运动服从经典电动力学规律。将会看到,研究二能级原子在光场中的运动,由于引入赝自旋算符描写二能级原子的电偶极矩算符,为一系列量子光学现象的理论处理,带来很大的方便,同时得到具有深刻物理意义的结果。引用赝自旋算符讨论二能级原子与光场相互作用问题,最后可以建立光学布洛赫方程。

同样,如用波函数或者密度矩阵描写二能级原子的运动状态,同时认为光场为经典电磁场,则可得到麦克斯韦-布洛赫方程。实践表明,这些方程在半经典理论中是经常用到的基本方程。

量子光学中的全量子理论,认为二能级原子服从量子力学规律,使用上升和下降算符描写二能级原子的电偶极矩算符;而光场是经过量子化的电磁场,按这种观点建立的简斯-库明斯(Janes-Cummings)模型有着相当深刻的物理内容,且有待发掘。

本章将系统讨论上述量子光学中的经典理论、半经典理论和量子理论中的基本概念,为研究以后各章具体的量子光学现象和有关理论,奠定一定的基础。

关于二能级原子的处理方法和有关的概念,容易推广到多能级原子体系,因此这章讨论的内容,对于研究多能级原子与光场相互作用问题,也是相当基本的。

§ 1-2 原子与光场相互作用的经典理论

我们首先从经典观点出发,讨论一个二能级原子与光场相互作用时,特别是在共振作用时所服从的方程组。

从经典观点研究光场与物质的相互作用过程,首先是把光场视为服从经典电动力学规律的电磁场,它的运动服从麦克斯韦方程组;把原子体系看作为线性电偶极子或者非线性电偶极子。因此,光与原子的相互作用,归结为光的电磁场与原子的电偶极子之间的相互作用。这种经典的处理方法,有其成功之处,例如关于光的色散、吸收、散射等现象,都给出了与量子力学处理方法相一致的结果,所以在研究一些光学问题时,包括激光、非线性光学、量子光学中的一些问题,仍被人们所采用。

我们把一个二能级原子看作为经典的线性电偶极子,二能级原子在能量状态之间跃迁辐射光或吸收光的频率与线性电偶极子

的固有振荡频率 ω_0 相应。首先讨论在没有光场作用, 线性电偶极子作衰减振荡情形。设线性电偶极子沿 z 轴作振动运动, 根据经典电动力学, 它的运动方程为

$$m\ddot{z} = -kz + F_s \quad (1-2-1)$$

式中 m 为电偶极子的质量, k 为弹性恢复系数, F_s 为线性电偶极子的自作用力

$$F_s = \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \ddot{\ddot{z}} \quad (1-2-2)$$

式中 e 为电子电荷, ϵ_0 为真空中的介电系数, c 为真空中光速。如取简谐振动近似, 则有

$$\ddot{z} \simeq -\omega_0^2 z \quad (1-2-3)$$

式中的 ω_0 为

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1-2-4)$$

如令

$$\gamma = \frac{e^2 \omega_0^2}{6\pi\epsilon_0 m c^3} \quad (1-2-5)$$

则(1-2-1)式为

$$\ddot{z} + \omega_0^2 z + \gamma \dot{z} = 0 \quad (1-2-6)$$

容易求出上式的解为

$$z = z_0 e^{-\frac{\gamma}{2}t} e^{-i\omega_0 t} \quad (1-2-7)$$

式中 z_0 是 $t=0$ 时刻线性电偶极子的坐标。(1-2-7)式表明线性电偶极子在作衰减振荡, 衰减速率为 $\gamma/2$, 衰减时间为 $2/\gamma$ 。作衰减振荡时的能量变化为

$$W = \frac{1}{2} m \dot{z}^2 + \frac{1}{2} \omega_0^2 z^2$$

将(1-2-7)式代入, 得到

$$W = W_0 e^{-\gamma t} \quad (1-2-8)$$

式中 W_0 为 $t=0$ 时线性电偶极子的能量, 其衰减速率为 γ , 寿命时

间为

$$\tau = \frac{1}{\gamma} \quad (1-2-9)$$

对于可见光,由(1-2-5)式得到 $1/\gamma \sim 0.1 \times 10^{-6} \text{s}$, 所以, $\gamma \ll \omega_0$, 表明原子在缓慢地损耗能量,这是处理光与原子相互作用问题时,取缓变近似的根据。

现在讨论有光场与线性电偶极子相互作用情形。设光场的频率 ω 非常接近于电偶极子的固有振荡频率 ω_0 , 即研究共振作用情形。设光的电场为

$$E(\mathbf{r}, t) = 2E_a \cos \omega t \quad (1-2-10)$$

在光的电场作用下,电偶极子的运动方程为

$$\ddot{z} + \omega_0^2 z + \gamma \dot{z} = \frac{e}{m} E(\mathbf{r}, t) \quad (1-2-11)$$

可以将上式简化为两个一阶微分方程,为此设

$$z = z_0 [\xi(t) \cos \omega t - \eta(t) \sin \omega t] \quad (1-2-12)$$

将(1-2-12)式代入(1-2-11)式,当 $\omega \approx \omega_0$ 时,原子能量的变化是缓慢的,可取 $\xi(t)$ 和 $\eta(t)$ 的缓变近似:

$$\begin{aligned} \ddot{\xi} &\ll \omega^2 |\xi|, & \dot{\xi} &\ll \omega |\xi| \\ \ddot{\eta} &\ll \omega^2 |\eta|, & \dot{\eta} &\ll \omega |\eta| \end{aligned} \quad (1-2-13)$$

由(1-2-12)式得到

$$\begin{aligned} \dot{z} &= z_0 \dot{\xi}(t) \cos \omega t - z_0 \dot{\xi}(t) \omega \sin \omega t - z_0 \dot{\eta}(t) \sin \omega t \\ &\quad - z_0 \eta(t) \omega \cos \omega t \end{aligned} \quad (1-2-14)$$

$$\begin{aligned} \ddot{z} &= z_0 \ddot{\xi}(t) \cos \omega t - z_0 \dot{\xi}(t) \omega \sin \omega t - z_0 \dot{\xi}(t) \omega \sin \omega t \\ &\quad - z_0 \dot{\xi}(t) \omega^2 \cos \omega t - z_0 \ddot{\eta}(t) \sin \omega t - z_0 \dot{\eta}(t) \omega \cos \omega t \\ &\quad - z_0 \dot{\eta}(t) \omega \cos \omega t + z_0 \eta(t) \omega^2 \sin \omega t \end{aligned} \quad (1-2-15)$$

将它们代入(1-2-11)式后,首先取等式两端 $\cos \omega t$ 项的系数使之相等,得到

$$z_0 \ddot{\xi}(t) - z_0 \dot{\xi}(t) \omega^2 - z_0 \dot{\eta}(t) \omega - z_0 \eta(t) \omega + \omega_0^2 z_0 \xi(t)$$

$$+ \gamma z_0 \dot{\xi}(t) - \gamma z_0 \eta(t) \omega = 2 \frac{e}{m} E_a \quad (1-2-16)$$

根据(1-2-13)式,取缓变近似后得到关于 $\eta(t)$ 的方程为:

$$\dot{\eta}(t) = -\frac{\gamma}{2} \eta(t) + \frac{\gamma}{2\omega} \dot{\xi} + \frac{1}{2\omega} (\omega_0^2 - \omega^2) \xi - \frac{e}{m\omega z_0} E_a \quad (1-2-17)$$

现在用 T 代替上式中关于振幅的总衰减时间 $2/\gamma$, 又考虑到 $\omega_0^2 - \omega^2 = (\omega_0 - \omega)(\omega_0 + \omega) \simeq 2\omega(\omega_0 - \omega)$; 因为 $\gamma/2\omega \ll 1$, 忽略 $\gamma \dot{\xi}(t)/2\omega$ 项, 则上式变为

$$\dot{\eta}(t) = \xi(t) \delta - \frac{\eta(t)}{T} - \alpha_a E_a \quad (1-2-18)$$

式中
$$\delta = \omega_0 - \omega \quad (1-2-19)$$

$$\alpha_a = \frac{e}{m\omega z_0} \quad (1-2-20)$$

同理, 将(1-2-14)和(1-2-15)式代入(1-2-12)式, 比较等式两端 $\sin \omega t$ 项的系数, 得到

$$\begin{aligned} & -z_0 \dot{\xi}(t) \omega - z_0 \dot{\xi}(t) \omega - z_0 \ddot{\eta}(t) + z_0 \eta(t) \omega^2 \\ & - \omega_0^2 z_0 \eta(t) - \gamma z_0 \dot{\xi}(t) \omega - \gamma z_0 \dot{\eta}(t) = 0 \end{aligned} \quad (1-2-21)$$

取缓变近似后得到

$$\dot{\xi}(t) = -\frac{1}{2\omega} (\omega_0^2 - \omega^2) \eta(t) - \frac{\gamma}{2} \dot{\xi}(t) - \frac{\gamma}{2\omega} \dot{\eta}(t) \quad (1-2-22)$$

采用与上面相同的处理, 最后得到 $\xi(t)$ 的方程为

$$\dot{\xi}(t) = -\frac{1}{T} \xi(t) - \eta(t) \delta \quad (1-2-23)$$

总结以上, 我们得到

$$\begin{aligned} \dot{\xi}(t) &= -\frac{1}{T} \xi(t) - \eta(t) \delta \\ \dot{\eta}(t) &= -\frac{1}{T} \eta(t) + \xi(t) \delta - \alpha_a E_a \end{aligned} \quad (1-2-24)$$

方程组(1-2-24)式是从经典观点得到的光与原子共振作用时, 原子的运动方程, 它是讨论共振光学现象的经典理论基础。在

本章后面的讨论中将会看到,从量子力学观点研究光场与二能级原子相互作用时,也将得到与这两个方程相类似的方程组。

当光的电场振幅 E_0 为常数时,方程组(1-2-24)式有非常简单的解。这时的问题称为经典拉比(Rabi)问题,这是因为拉比首先在量子力学那里求解了这类问题,并将其用于磁共振现象研究中。

借助(1-2-24)式和关于光的电场的传播方程,同样可以研究描写光脉冲传播的面积定理以及光脉冲的传播规律。这方面问题将在第七章讨论。同样,借助(1-2-24)式也可以讨论光学自由感应衰减等现象。

最后我们来讨论 $\xi(t)$ 和 $\eta(t)$ 的物理意义。设所讨论的介质由 N 个二能级原子组成,则它在光场作用下形成的宏观电极化强度,由每个原子的电偶极矩决定。考虑到(1-2-12)式和光谱线的线型函数 $g(\delta')$,按定义,介质的宏观电极化强度 $P(t)$ 为

$$P(t) = N_e z_0 \int \text{Re}\{[\xi(\delta', t) + i\eta(\delta', t)]e^{i\omega t}\} g(\delta') d\delta' \quad (1-2-25)$$

可以看出, $\xi(t)$ 决定介质宏观电极化强度的实数部分, $\eta(t)$ 决定虚数部分。因此, $\xi(t)$ 表示色散, $\eta(t)$ 表示吸收(放大)。

§ 1-3 光场中二能级原子的波函数方程

现在讨论光与二能级原子相互作用的半经典理论基础。这里认为光场是经典电磁场,它的运动服从麦克斯韦方程组;认为二能级原子的运动服从量子力学规律,即服从薛定谔方程。光场对原子的作用,归结为对原子状态的微扰作用。在这一节将按这种模型,建立单个二能级原子的波函数方程。

现在首先讨论二能级原子模型问题。人们已经知道,在光场与原子相互作用的许多问题中,可以只考虑原子的两个能级,这当然