



The Series of Advanced Physics of Peking University

北京大学物理学丛书 · 理论物理专辑

非线性光学物理

叶佩弦 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



The Series of Advanced Physics of Peking University

北京大学物理学丛书·理论物理专辑

非线性光学物理

叶佩弦 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

非线性光学物理/叶佩弦著. —北京: 北京大学出版社, 2007. 7
(北京大学物理学丛书)

ISBN 978-7-301-12445-1

I. 非… II. 叶… III. 非线性光学—研究生—教材
IV. 0437

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 087026 号

书 名: 非线性光学物理

著作责任者: 叶佩弦 著

责任编辑: 孙 琰

标准书号: ISBN 978-7-301-12445-1/O · 0724

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752038

出版部 62754962

印 刷 者: 涿州市星河印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

850 毫米×1168 毫米 大 32 开本 12.375 印张 319 千字

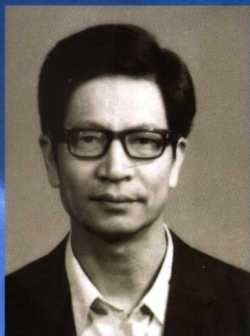
2007 年 7 月第 1 版 2007 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 25.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: (010)62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn



叶佩弦，中国科学院物理研究所研究员、博士生导师。1934年生于广东，1956年毕业于东北人民大学物理系。长期从事非线性光学与激光光谱学的科研和教学工作，在国内外发表研究论文200余篇，主编《非线性光学》（中国科学技术出版社，1999）。曾获国家科技进步奖二等奖（1991）、国家自然科学基金三等奖（1995）、中国科学院自然科学奖一等奖（1991）、第二届饶毓泰物理奖（1990~1991）、北京市科学技术奖二等奖（2002）等。1982年在美国加利福尼亚大学伯克利分校做访问学者；1990~1991年在美国纽约市立大学超快激光与光谱研究所及加拿大Laval大学物理系做访问教授；1998~2002年多次应邀作为客座教授在台湾“中央大学”光电科学研究所讲学。被聘为Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials期刊的国际编委。

《北京大学物理学丛书》

第二届编委会名单

主 任：高崇寿

副 主 任：（按姓氏笔画排，下同）

	刘 寄 星	陈 晓 林	周 月 梅	夏 建 白
	聂 玉 昕	阎 守 胜	黄 涛	
编 委：	冯 世 平	田 光 善	孙 昌 璞	朱 星
	朱 邦 芬	宋 菲 君	肖 佐	邹 振 隆
	林 宗 涵	欧 阳 钟 灿	俞 允 强	胡 岗
	闻 海 虎	顾 卫 宇	韩 汝 珊	解 思 深

前 言

物理学是自然科学的基础,是探讨物质结构和运动基本规律的前沿学科。几十年来,在生产技术发展的要求和推动下,人们对物理现象和物理学规律的探索研究不断取得新的突破。物理学的各分支学科有着突飞猛进的发展,丰富了人们对物质世界物理运动基本规律的认识和掌握,促进了许多和物理学紧密相关的交叉学科和技术学科的进步。物理学的发展是许多新兴学科、交叉学科和新技术学科产生、成长和发展的基础和前导。

为适应现代化建设的需要,为推动国内物理学的研究、提高物理教学水平,我们决定推出《北京大学物理学丛书》,请在物理学前沿进行科学研究和教学工作的著名物理学家和教授对现代物理学各分支领域的前沿发展做系统、全面的介绍,为广大物理学工作者和物理系的学生进一步开展物理学各分支领域的探索研究和学习,开展与物理学紧密相关的交叉学科和技术学科的研究和学习提供研究参考书、教学参考书和教材。

本丛书分两个层次。第一个层次是物理系本科生的基础课教材,这一教材系列,将几十年来几代教师,特别是在北京大学教师的教学实践和教学经验积累的基础上,力求深入浅出、删繁就简,以适于全国大多数院校的物理系使用。它既吸收以往经典的物理教材的精华,尽可能系统地、完整地、准确地讲解有关的物理学基本知识、基本概念、基本规律、基本方法;同时又注入科技发展的新观点和方法,介绍物理学的现代发展,使学生不仅能掌握物理学的基础知识,还能了解本学科的前沿课题和研究动向,提高学生的科学素质。第二个层次是研究生教材、研究生教学参考书和专题学术著作。这一系列将集中于一些发展迅速、已有开拓性进展、国际

上活跃的学科方向和专题,介绍该学科方向的基本内容,力求充分反映该学科方向国内外前沿最新进展和研究成果。学术专著首先着眼于物理学的各分支学科,然后再扩展到与物理学紧密相关的交叉学科。

愿这套丛书的出版既能使国内著名物理学家和教授有机会将他们的累累硕果奉献给广大读者,又能对物理的教学和科学研究起到促进和推动作用。

《北京大学物理学丛书》编辑委员会

1997年3月

理论物理专辑前言

彭桓武先生在他的专著《理论物理基础》(彭桓武、徐锡申著,北京大学出版社,1998年)序中对理论物理作了精辟的阐述:

随着人们通过多次观察和实验等科学实践,对物质世界中在一定条件下一定现象之出现,获得大量可靠的感性认识,得到数据和经验规律。然后经过反复综合整理改造,形成概念,并用判断和推理的方法给以合乎逻辑的描述或解释,这样达到某种理性认识。如能以此为据对新现象有所预见且为而后的科学实验所证实,则表明这理性认识正确可靠。对越来越多方面的物质现象得到的越来越普遍的正确可靠的理性认识,便构成发展着的理论物理。

理论物理的发源可以从伽利略和牛顿对地面上物体坠落和天空中行星绕日等现象的统一解释算起。这奠定了牛顿力学,并从此动力学观点流行。这种观点和方法,结合对气体的物理实验和化学实验的多个经验规律,产生并逐渐澄清原子和分子的概念,阐明了热的分子运动本质,又结合电磁现象的观察和大量实验所总结的一系列经验规律,特别是法拉第的有关磁力线和电力线的形象思维,帮助麦克斯韦形成电磁场的概念和其动力学理论。不仅利用运动把电现象与磁现象联结起来,并且从理论上预见到电磁波动现象,光的现象即归结为电磁波动的现象。这预见为而后的实验证实,并为无线电通讯奠定基础。法拉第电解定律表明分子原子内部有带有一定的基本电荷的电子。有鉴于此,洛伦兹对物质中的电磁现象,提出电子论,引入带有电子运动的分子和微观电磁场的概念,后者的局部的多分子的统计平均即是麦克斯韦的宏观电磁场,这样解释了物质对光的折射率随光波长的变化的色散现象。但对电子和其运动规律的较清楚的认识,则尚待从更多的

近代物理实验和其伴随的 20 世纪才发现的相对论和量子论。在这两个理论中,对时间和空间,粒子和波,概念上比以前有所深入,有些人称之为革命,实际上不过是,随着认识到更深一层次,原来认为割裂的或对立的却是统一的或同一的,而回过头来看,原来的认识,在一定范围内仍是对的或可靠的到一定的近似程度而已。

理论物理是有用的。作为工程设计原理的早已成熟的那部分理论物理更不必谈。在开展理论、实验与工程技术相结合的工作时,理论工作先行一步常可以减少实验和工程的工作量。

为了促进我国的理论物理研究,国家自然科学基金委员会“理论物理专款”学术领导小组决定资助出版这套《北京大学物理学丛书·理论物理专辑》。希望从事理论物理研究的科学工作者介绍国际理论物理前沿和自己的研究工作,吸引更多的年轻人投入并献身于理论物理学的研究,为营造重视基础研究、安心基础研究的大环境,为发展我国理论物理学的研究及其在国际上占有一席之地作出贡献。有关申请出版资助的情况,请参阅国家自然科学基金委员会网站中有关“理论物理专款”的通告。本专辑的出版得到了北京大学出版社的大力支持,特此感谢。

国家自然科学基金委员会
“理论物理专款”学术领导小组

2005 年 10 月 20 日

作者前言

激光的发明是 20 世纪物理学最重大成就之一,而非线性光学作为学科的出现和发展,则是激光对物理学科发展的重要贡献。经过几十年长盛不衰的研究与开发,非线性光学涵盖的研究领域已经非常之广,与其他学科、领域的相互联系和渗透也非常密切,这包括光谱学、原子分子物理、凝聚态物理、等离子体物理、表面物理以及有机和高分子化学、分子生物学、材料科学,等等。非线性光学在许多高技术领域也得到广泛应用,例如激光技术、信息处理与存储技术、光通讯和光电子技术、集成光学与光电子学,等等。

非线性光学由一系列基本的非线性光学效应所支撑。一方面,这些效应广泛存在于光与许多不同形态物质的相互作用中,反映了光与各种物质相互作用时,存在一种共性。非线性光学的任务之一就是去认识和设法描述这些共性。只有掌握了这些共性,才能自由游弋于各种不同物质和各种不同学科领域之中。另一方面,这些效应在各种不同物质中又表现出不同的特性,这反映了光与不同物质相互作用时的特殊物理机制。非线性光学的另一任务就是去发现和解释这些特性,从而获得对过程的物理本质的深入认识。总之,无论从学习或研究的角度,都要分别从共性和个性两方面去把握非线性光学,以达到宏观与微观的统一。这是作者对这本书的写作理念之一。

作者一直认为,中国需要理论物理学家,但更缺乏真正优秀的实验物理学家。这样的物理学家,不仅具有良好的实验技能和方法,而且具有深厚的理论功底。他对物理理论的系统掌握和深刻理解,不仅仅停留在合理的逻辑推理上,还要建立起清晰的、用物理语言表达的概念和图像,可以随时用这些概念和图像对自己的

研究对象进行观察、分析和思考,并能从理论高度提出新的实验课题,从而做到有所发现、有所创新。作者希望并一直致力使这样优秀的实验物理学家能多多出现在祖国的大地。作者希望通过写这本书在这方面作出一点贡献。这是作者写作本书的另一理念。

现代非线性光学包含物理、材料、应用等多个方面,本书仅限于讨论其中的物理方面,故取名“非线性光学物理”。

目前已有不少非线性光学方面的专著或教程,其中最基本和最权威的当推诺贝尔奖得主 N. Bloembergen 的 Nonlinear Optics^①,而内容最丰富的首推 Y. R. Shen(沈元壤)的 The Principles of Nonlinear Optics^②。近年来国内也出版过一些很不错的书。可以说,本书一方面是作者对前人的著作学习、消化和吸收之后,用上述两个理念进行整理和补充的结果;另一方面,本书也概括了非线性光学物理研究的一些新进展,尤其是作者多年来从事的一些研究领域中的进展,尽管这些总结远不是全面的。

本书是在作者的“讲稿”基础上充实和整理的,该讲稿曾于 1998 年和 2000 年在台湾“中央大学”光电研究所作过系统讲授;2002 年在教育部委托中国科技大学组织的针对研究生的暑期物理班上讲授过一次;2003 年又在中国科技大学物理系研究生班讲过一次。但是,即使局限在非线性光学的物理方面,本书的概括也不一定是全面的,特别是对那些作者在研究工作中从未涉足或虽经学习但领会不深的领域,并无着墨,以免浪费读者的时间,因为他们不难找到更合适的读物。

本书共分十二章:第一章是总论。第二章将建立起非线性光学的宏观架构,亦即对非线性极化的产生、表示方式及其特性作统一的宏观描述,并导出用以讨论在介质中光波之间相互作用的所

① Bloembergen N. Nonlinear optics. 4th ed. Singapore: World Scientific, 1996.

② Shen Y R. The principles of nonlinear optics. New York: Wiley, 1984. [美]沈元壤. 非线性光学原理. 顾士杰译. 北京: 科学出版社, 1987.

谓耦合波方程。第三章是以分立能级体系为对象,讨论如何获得以电子过程为机制的非线性极化率的微观表示。这两章是了解以后各章的基础。接下来的两章将讨论二阶变频和参量效应。其中,第四章着重在传统晶体;第五章除介绍非线性系数测量外,着重在光学超晶格和光感生光学非线性的讨论。介绍三阶非线性光学过程用了三章篇幅。其中,第六章讨论三次谐波与四波混频;第八章讨论光感生折射率变化及与之有关的效应,包括光克尔(Kerr)效应、光感生偏振态变化、自聚焦与自相位调制、光感生光栅及光学双稳行为等;而第七章则介绍在四波混频共振增强基础上发展起来的四波混频光谱术。受激光散射本来范围很广,但本书只用了第九章一章介绍最典型的两种,即受激拉曼(Raman)和受激布里渊(Brillouin)散射,而对前者也只着重讨论各种理论处理方法。光折变非线性光学在20世纪90年代以来成为非线性光学的研究热点,第十章和第十一章将介绍这方面的发展。其中,第十章着重讨论光折变效应的微观过程和机制;第十一章则着重讨论其特有的各种非线性光学效应。最后,在第十二章介绍相干瞬态光学效应,并且在瞬态四波混频理论框架下讨论相干瞬态光学效应与四波混频的统一;在此基础上还介绍了用非相干光进行相干瞬态过程研究的进展。

限于作者的水平和经历,本书定会有不足甚至错误之处,请读者不吝赐教,提出批评和指正。

最后,我要向在写作本书过程中从不同方面给过我许多宝贵帮助的王鹏业研究员、窦硕星研究员和尹华伟研究员致以由衷的感谢。同时,也深深感谢国家自然科学基金委员会给予本书出版的项目资助。在编辑本书过程中,得到北京大学出版社顾卫宇和孙琰两位编辑的大力帮助和真诚合作,在此也一并致谢。

叶佩弦

2006年1月31日

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 光场中的非简谐振子	(1)
§ 1.2 非线性光学梗概	(4)
§ 1.3 非线性光学发展的历史回顾	(12)
§ 1.4 非线性介质中的波动方程	(17)
参考文献	(18)
第二章 非线性光学的宏观架构	(20)
§ 2.1 引言	(20)
§ 2.2 介质对光场的非线性响应	(20)
§ 2.3 非线性极化的宏观表示	(24)
§ 2.4 非线性极化率张量的对称性	(28)
§ 2.5 关于非线性极化率表示的一些说明	(32)
§ 2.6 非线性介质的耦合波方程	(37)
§ 2.7 振幅随时间变化的非线性传播方程	(42)
参考文献	(44)
第三章 非线性极化率的微观表示	(45)
§ 3.1 计算极化率的密度矩阵法	(45)
§ 3.2 光场感生(非线性)极化的物理图像	(55)
§ 3.3 双费恩曼图法	(66)
§ 3.4 非线性极化率的共振增强	(72)
§ 3.5 局域场修正因子	(75)
参考文献	(77)

第四章 光学二次谐波与参量变频(一)	(78)
§ 4.1 光在各向异性介质中的传播特性	(78)
§ 4.2 晶体中的有效非线性系数	(82)
§ 4.3 光学二次谐波产生	(87)
§ 4.4 光学和频	(91)
§ 4.5 非线性光学中的相位匹配	(95)
§ 4.6 光学参量放大与振荡	(99)
§ 4.7 光学参量振荡的频率调谐	(103)
参考文献	(109)
第五章 光学二次谐波与参量变频(二)	(111)
§ 5.1 Maker 条纹与非线性系数测量	(111)
§ 5.2 表面(界面)对二阶非线性光学效应的影响 ...	(114)
§ 5.3 准相位匹配与光学超晶格	(125)
§ 5.4 光场感生的二阶光学非线性	(128)
参考文献	(135)
第六章 三次谐波与四波混频	(137)
§ 6.1 气体和原子蒸汽中的三次谐波	(137)
§ 6.2 四波混频与可调谐红外及紫外相干光产生 ...	(142)
§ 6.3 光学相位共轭	(146)
§ 6.4 简并与近简并四波混频	(149)
§ 6.5 简并四波混频的等效光栅衍射分析法	(155)
§ 6.6 三阶非线性的分子重新取向机制	(158)
§ 6.7 四波混频与物质研究	(164)
参考文献	(168)
第七章 四波混频光谱术	(170)
§ 7.1 CARS 与偏振 CARS 光谱术	(170)
§ 7.2 激发态的相干拉曼光谱术	(178)
§ 7.3 简并四波混频的共振行为	(181)
§ 7.4 拉曼增强的近简并四波混频	(188)

§ 7.5 瞬态四波混频与弛豫参数测量	(192)
参考文献	(198)
第八章 光感生折射率变化及其相关效应	(200)
§ 8.1 光感生折射率改变	(200)
§ 8.2 光克尔效应与 RIKES	(204)
§ 8.3 光感生的偏振态变化	(209)
§ 8.4 光束自聚焦	(212)
§ 8.5 自相位调制	(222)
§ 8.6 Z 扫描技术的物理原理	(226)
§ 8.7 光感生折射率光栅与两波耦合产生的条件 ..	(229)
§ 8.8 光学双稳	(234)
§ 8.9 表面波与光波导中的光学双稳	(237)
参考文献	(243)
第九章 受激光散射	(246)
§ 9.1 受激拉曼散射的宏观极化理论	(246)
§ 9.2 受激拉曼散射的参量理论	(253)
§ 9.3 受激反斯托克斯拉曼散射的产生	(259)
§ 9.4 振动模的受激拉曼散射	(263)
§ 9.5 受激布里渊散射	(267)
§ 9.6 背向受激布里渊散射的相位共轭特征	(269)
参考文献	(272)
第十章 光折变非线性光学(一)	(274)
§ 10.1 光折变效应及其物理图象	(274)
§ 10.2 光折变的能带输运模型	(276)
§ 10.3 空间电荷场	(279)
§ 10.4 线性电光效应与三维光折变光栅	(282)
§ 10.5 光生伏打效应及其对光折变的影响	(286)
参考文献	(295)
第十一章 光折变非线性光学(二)	(296)
§ 11.1 光折变两波耦合	(296)

§ 11.2	光折变四波混频与光折变全息术	(306)
§ 11.3	光感生光散射	(313)
§ 11.4	光折变自泵浦与互泵浦相位共轭	(317)
参考文献		(332)
第十二章	相干瞬态光学效应	(334)
§ 12.1	光共振与光学矢量模型	(334)
§ 12.2	几种典型的相干瞬态光学效应	(339)
§ 12.3	瞬态四波混频与相干瞬态光学效应 理论上的统一	(344)
§ 12.4	非相干光时延四波混频(二能级情形)	(349)
§ 12.5	非相干光时延四波混频(吸收带情形)	(360)
参考文献		(367)
索引		(370)

第一章 绪 论

§ 1.1 光场中的非简谐振子

简谐振子是描述原子中电子运动的一个经典模型. 简谐振子在外力 f 作用下的运动方程是

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \Gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{f}{m}, \quad (1.1)$$

其中 m 为质量, $-m\omega_0^2 x$ 为回复力, Γ 为振动的衰减系数. 当 $f=0$ 时, 电子沿 x 轴以频率 ω_0 围绕原点作周期振动 ($\Gamma \neq 0$ 时振动是衰减的).

在频率为 ω 、振幅为 A 的光波电场(简称光场)

$$E = A \cos \omega t = \frac{1}{2} A (e^{-i\omega t} + e^{i\omega t}) \quad (1.2)$$

作用下, 电子受力为

$$f = \frac{q}{2} A (e^{-i\omega t} + e^{i\omega t}), \quad (1.3)$$

其中 q 为电子的电量. 此时方程(1.1)的解为

$$x = x(\omega) + \text{c. c.}, \quad (1.4)$$

其中“c. c.”表示求复共轭运算,

$$x(\omega) = \frac{1}{2} \frac{q}{m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\Gamma} A e^{-i\omega t}. \quad (1.5)$$

这说明电子将围绕原点以光波频率 ω 作受迫简谐振动, 其振幅正比于光场振幅. 当 $\omega = \omega_0$ 时发生共振, 振幅最大.

设单位体积的原子数为 N , 则原子体系在光场作用下产生的极化强度(亦即单位体积中的电偶极矩)为 $P = Nqx$. 考虑到