



“十二五”国家重点图书出版规划项目
湖北省学术出版基金资助项目
世界光电经典译丛
丛书主编 叶朝辉

 Springer

极端非线性光学

EXTREME NONLINEAR OPTICS

【德】Martin Wegener 

王超 康轶凡 



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



“十二五”国家重点图书出版规划项目
湖北省学术出版基金资助项目
世界光电经典译丛
丛书主编 叶朝辉

极端非线性光学



【德】Martin Wegener 著
王超 康轶凡 译



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

Translation from English language edition:

Extreme Nonlinear Optics

by Martin Wegener

Copyright © 2005 Springer Berlin Heidelberg

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

湖北省版权局著作权合同登记 图字:17-2015-087 号

图书在版编目(CIP)数据

极端非线性光学/(德)韦格纳著;王超,康轶凡译. —武汉:华中科技大学出版社,2014.1
(世界光电经典译丛/叶朝辉主编)
ISBN 978-7-5609-6963-3

I. ①极… II. ①韦… ②王… ③康… III. 非线性-光学-研究 IV. ①O437

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 017822 号

极端非线性光学

(德)Martin Wegener 著
王超 康轶凡 译

策划编辑:徐晓琦

责任编辑:王晓东

封面设计:范翠璇

责任校对:马燕红

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321913

录 排:武汉楚海文化传播有限公司

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:15.25 插页:2

字 数:257千字

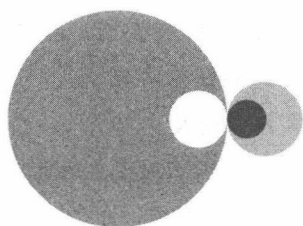
版 次:2015年7月第1版第1次印刷

定 价:58.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

謹以此书献给卡琳、葆琳和亨利埃特。



专家序

伴随着 20 世纪 60 年代激光技术的问世,非线性光学即成为一门新兴分支学科并随着激光技术的革新而得以迅速发展。迄今,啁啾脉冲放大等激光技术的日臻成熟已使得产生载波-包络相位锁定、脉宽为几个光载波周期的超短超强近红外光脉冲成为可能(如脉冲宽度已接近一个光载波周期、聚焦峰值光强已达 10^{22} W/cm^2),光学也随之从传统非线性光学-微扰非线性光学机制阶段而进入了非微扰非线性光学-极端非线性光学机制阶段。在此深层次光学领域,光场相位(phase)成为影响甚至决定光与物质相互作用物理过程走向和结果的重要参数,诸多新颖的甚至在传统非线性光学机制下不可能发生的物理效应和物理现象,如具备结构反演对称特性的材料中的倍频效应与惰性气体中的高阶谐波产生效应(此效应能够产生脉宽在阿秒量级的单极紫外电磁脉冲或脉冲群)等,将成为该领域司空见惯的研究对象。可以预见,极端非线性光学将是一个崭新的、广阔的光学新天地!

原著《Extreme Nonlinear Optics》内容丰富,论述言简意赅,在内容编排及相关原理阐述方面遵循循序渐进的科学规律,以非线性光学学科自身发展的连续性为主线,采用“内容与研究方法并重”的原则,使读者在清楚把握已有学科发展脉络的同时,能够明晰传统非线性光学到极端非线性光学,以及极端非线性光学自身的发展过程中,其每个阶段之间在科学理念及精髓上的传承及超越,以消除读者在阅读此书时所可能出现的突兀感,从而最终从整体上把握极端非线性光学领域当前研究发展水平。正因此,原著具有极高的参考价值。

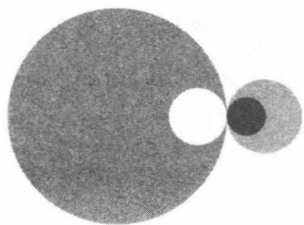
更为重要的是,随着人类对自然界尤其是微观世界探究的深入,多学科交叉及学科融合的局面将呈现出更为丰富多样、令人叹为观止的新现象,同时也孕育着改变甚至递进人类认识深度的生机。我国国内在对此相关研究的认知方面必定有着迫切的需求,无论是了解层次,还是探究层次。正是在这种需求的驱动下,王超博士发起并负责翻译了这本《极端非线性光学》。

王超博士有良好的物理学基础,为我所重点培养的青年科技人员。他于2008年10月至2010年10月在美国堪萨斯州立大学物理系留学访问,参与了强光物质相互作用高阶谐波产生极紫外阿秒光脉冲相关理论及实验研究,在该领域积累了一定的研究基础。他本人有志于翻译《极端非线性光学》以飨读者,我深感欣慰。本书译文语言精炼,其力图保持原著特色的严谨态度已流露于字里行间。译者及华中科技大学出版社通力合作出版这样一本书,实属难能可贵,惟愿此书能成为国内从事强场物理光学、光与物质相互作用等相关方面研究人员的有益参考。

是为序。



瞬态光学与光子技术国家重点实验室主任
中国科学院西安光学精密机械研究所所长



译者序

2008年10月至2010年10月,我在美国堪萨斯州大学物理系留学访问,参与的课题是高阶谐波(high-harmonic generation, HHG)产生极紫外阿秒光脉冲相关理论及实验研究。期间,为全面了解此研究的前沿及相关并行领域的全景式发展脉络,我研读了大量的文献,并有幸得到了相关国际知名学者的指点,《Extreme Nonlinear Optics》正是他们向我推荐的一本书。时至今日,此书已研读5遍之多,每次都有新的、让人激动的收获。随着理解的深入,我才知晓:极端非线性光学是一个广阔的光学新天地!被誉为将在21世纪引领科技界“阿秒革命”的阿秒脉冲,其有效产生途径——高阶谐波产生过程,亦仅仅是强场极端非线性光学这个鸿篇巨制中的一页而已。

2011年,我发表了两篇有关阿秒光脉冲产生方面的中文期刊文章,有幸得到了国内相关研究者的关注,彼此之间亦进行了密切的交流,这其中我亦受益匪浅。但更触动我的是,原来国内在对此相关研究的认知方面亦有着迫切的需求。于是我利用闲暇时间搜索了强场光学方面的中文书籍,但收获甚少,仅有一些讲义层次的介绍资料。因此我便产生了将该书翻译成中文的想法。

在施普林格亚洲有限公司北京代表处的联络下,华中科技大学出版社同意购买外文版权并资助出版中译本,这使得我构思的书籍翻译工作迈出了坚实的一步,直至如今成文付梓。期间,华中科技大学出版社的徐晓琦编辑就本书的出版定位花费了相当的心思,这使得本书从一开始就颇具经典教科书般的厚重品质;参与本书翻译工作的王超、康轶凡和任兆玉同志,无疑付出了大

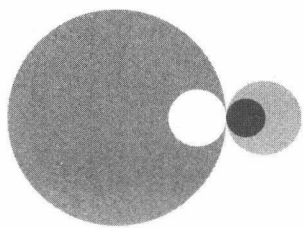
量的精力和宝贵的时间,这一切皆自然流露于本书的字里行间,以至于我在通译和校译的过程中常常叹服他们对原著所述物理本质及相关专业术语的准确把握;中国科学院西安光学精密机械研究所所长赵卫能在百忙之中过目此书并欣然答应为中译本作序,着实让我受宠若惊;我的亲人给我以榜样的力量,知晓我“立志不坚,终不济事”的道理,这使我在期间遇到困难时总能坦然面对、勇往直前。现在,我想说的是,非常感谢您们!虽然一句感谢远不能表达此刻我内心的感受,哪怕是十分之一,但是恳请您们姑且接受这样的谢意。

由于译者水平有限,书中难免有不足和错误之处,恳请广大读者不吝赐教,给予批评指正。

王 超

中国科学院西安光学精密机械研究所

2013年2月 于西安



原文序

2001年,我有幸被邀请为2003年在意大利西西里岛埃里切市举行的夏季学习班作系列讲座,讲座的主题即是我们长期以来的研究工作——半导体中的强场激发。一接到这个邀请我便立即开始积极准备,不久便形成了这次系列讲座的蓝图:系列讲座与我们的研究工作相关,但主题内容要更为宽泛一些。当重新阅读、整理我们已出版的论著原文时,其材料内容之丰富、涉及研究领域之广泛,真的使我感到非常惊讶:这其中包括固态物理、原子物理、相对论物理、粒子物理以及物理计量学。此刻我意识到,一个全新的非线性光学领域正呈现在我面前。纵观这些研究层面及其内容,尽管彼此之间存在着因领域不同而导致的如术语等方面的重大差异,但它们在物理本质上的某些相似性则是不难发现的,尤其是在极端非线性光学这个物理机制下。这些有着深刻物理意义甚至相当新颖的物理效应和现象,在现有的教科书中则未曾涉及。此即为本书的成因。

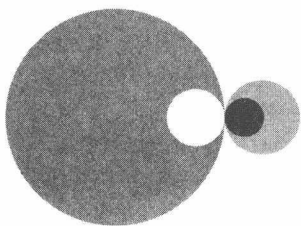
本书在兼顾相关物理理论的基础上,以一个实验物理学家的视角展示了此新兴研究领域的概貌。其中第1章至第6章为基础部分,传统非线性光学中的相关关键结论在必要的时候亦给予了扼要复述。作为此六章正文内容的有益补充,本书还针对相关关键内容相应给出了二十多个问题(供练习、思考)及较多实例,并在书后给出了相应的问题解答。第7章及第8章则从整体上评述了极端非线性光学,以期引导读者掌握本领域最新的研究进展及成果。

因此,本书可作为物理学或电子工程专业学生在非线性光学、量子光学或

量子电子学课程学习及研讨方面的教材,也能对刚介入极端非线性光学领域的年轻学者给予一定的指导。同时,本书所涉及的各学科领域的纵深发展及彼此之间在物理学机制方面的横向联系,足以使之成为各分支学科专家学者的良师益友。

Martin Wegener

2004年6月于卡尔斯鲁厄



目录

第1章 引言 /1

- 1.1 从传统非线性光学到极端非线性光学 /1
- 1.2 如何研读本书 /8

第2章 疏周期激光脉冲和非线性光学的若干方面 /10

- 2.1 麦克斯韦方程组 /10
- 2.2 光强度 /11
- 2.3 激光谐振腔中的电场 /13
- 2.4 唯象非线性光学浅谈 /20
- 2.5 偶数阶谐波的产生和反演对称性 /23
- 2.6 测量载波-包络频率的原理 /24

第3章 洛伦兹振荡模型及相关扩展 /29

- 3.1 线性光学:回顾洛伦兹模型 /29
- 3.2 二能级系统和拉比能 /31
- 3.3 载波拉比振荡 /35
- 3.4 反演对称条件下的倍频效应 /40

3.5 多光子吸收的量子干涉效应 /44

3.6 二能级系统的高阶谐波产生 /49

第4章 德鲁德自由电子模型及相关扩展 /62

4.1 线性光学:德鲁德模型 /62

4.2 光驱动下的电子波包 /64

4.3 晶体电子 /72

4.4 相对论性电子的极端非线性光学 /76

4.5 狄拉克电子的极端非线性光学 /87

4.6 Unruh 辐射 /93

第5章 从洛伦兹模型到德鲁德模型:束缚态—非束缚态跃迁 /94

5.1 高阶谐波产生:唯象方法 /94

5.2 Keldysh 参量 /97

5.3 原子的场致电离 /101

5.4 高阶谐波产生 /106

5.5 应用:金属表面光发射 /112

第6章 传播效应 /116

6.1 非线性麦克斯韦方程的数值解 /116

6.2 慢变包络近似 /119

6.3 Gouy 相位和载波-包络相位 /120

6.4 幅度谱的整形 /127

第7章 半导体和绝缘体中的极端非线性光学 /131

7.1 载波拉比振荡 /134

7.2 外现为二阶谐波的三阶谐波产生过程 /156

7.3 动态 Franz-Keldysh 效应 /166

7.4 光子牵引或动态 Hall 效应 /172

7.5 圆锥形二阶谐波产生 /175

第 8 章 原子与电子的极端非线性光学 /178

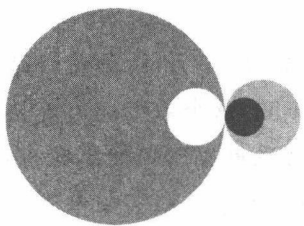
8.1 原子系统中的高阶谐波产生过程 /179

8.2 相对论性非线性汤姆森散射 /189

问题解答 /193

附录 A:重要符号 /212

附录 B:引文索引 /217



第 1 章 引 言

总的说来,随着激光技术在 20 世纪 60 年代的发明^{[1,2]*},尤其是红宝石激光器的成功研制(1960 年由梅曼完成)^[3],光学学科也迅速于 1961 年开创性地进入了非线性光学阶段^[4]。在这种新的物理学机制下,材料的光学特性已非过去几百年里一直认为的那样——与光的强度无关,而是随着光强度的变化呈现出相应的差异,这种光强依赖性直接导致了光与物质相互作用过程中许多新现象、新效应及相关新应用的出现。时至今日,非线性光学已经在多个层面进入了我们的日常生活并直接导致了光谱学和激光领域诸多新技术、新产品的出现。的确,自非线性光学诞生之日起,激光物理学和非线性光学已因激光这个纽带而彼此紧密联系。

1.1 从传统非线性光学到极端非线性光学

在传统非线性光学范畴,物质在与之作用光场的一个光周期内的光学性质的绝对变化量非常微小。这一物理事实构成了传统非线性光学领域诸多物理概念及物理近似的物理基础,这一点从当今许多优秀的教科书中即可看

* 附录 B,文献[1]、文献[2]。

出^[5-10]。然而,激光技术经过多年的发展已经在多个方面实现了巨大进展,尤其是在最大峰值光强和最小光脉冲宽度方面。在距离激光技术发明之日五十余年的今天,可实现的最短光脉冲的时间宽度仅为 1.5 个光周期(参见图 1.1),这已经非常逼近光脉冲宽度的极限——单个光周期。由于锁模激光技术^[11]尤其是自锁模全固态激光技术^[12]的成熟,如此超短光脉冲即可由激光谐振腔直接产生,而且通过啁啾脉冲放大技术(chirped pulse amplification, CPA)^[16,17],一些实验室已经能够产生聚焦峰值光强在 10^{22} W/cm²数量级范围的放大光脉冲^[18](参见图 1.2)。预计在未来的十年间,这个数值还可能再增大几个数量级。因此可以说,现今光场强度已足以导致此类现象的出现:在光场光波周期数量级的作用时间内,光场足以引起物质光学性质实质性的甚至是极端的变化。从本书的后续论述中我们将会看到,上述对此类现象定性的甚至是有些含糊的描述可做如下确切的说明。

当外界光场能量(与光强度有关)可以和与之作用的物质或系统的特征能量相比拟甚至相对更高时,传统非线性光学中的相关规律将不再适用,基于不同物理机制的新现象将会发生!

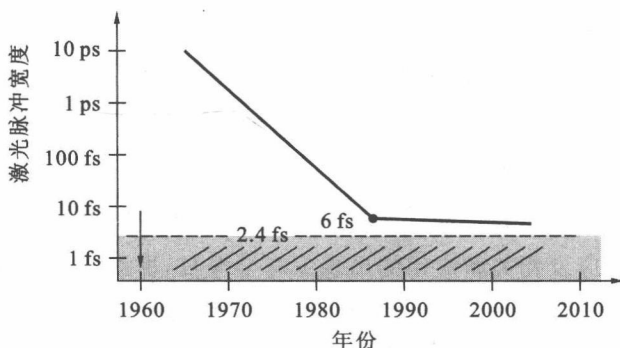


图 1.1 激光脉冲宽度 t_{FWHM} 向更短方向发展的演变历史(示意图)

注:1960 年红宝石激光器研制成功(箭头所示),仅仅五年之后就产生了 10 ps 光脉冲。之后二十年间,脉冲宽度几乎以直线下降方式减小,直至 1987 年 Shank 等人利用燃料激光器及燃料放大技术创纪录地研制成功了 6 fs 激光脉冲^[13]。在此之后,在缩短脉冲宽度方面一直没有太大进展。然而,随后的固态革命^[14,15]则导致激光器在稳定性方面产生了巨大的进步。同时,图中也示出了理论上可以实现的最短脉冲宽度 2.4 fs(这相当于中心光子能量为 2.25 eV 光场周期的 1.3 倍,见问题 2.2)。本图中,我们并不打算考虑在高阶谐波产生过程中出现的亚飞秒级紫外脉冲(见实例 1.3)。

此类物理机制被称作极端非线性光学或载波非线性光学。后者对此类物理机制本质的描述更为准确,但前者因对此类机制的描述更为感性而获得更多的

使用。针对研究对象(物理问题或物理系统)的不同,与光强 I 相关的能量可有如下五种形式:

- 拉比能 $\hbar\Omega_R \propto \sqrt{I}$;
- 质动能 $\langle E_{\text{kin}} \rangle \propto I$;
- 布洛赫能 $\hbar\Omega_B \propto \sqrt{I}$;
- 回旋能 $\hbar\omega_c \propto \sqrt{I}$;
- 隧穿能 $\hbar\Omega_{\text{tun}} \propto \sqrt{I}$ 。

与此相对应,系统的特征能量也有如下三种形式:

- 光场载波光子能 $\hbar\omega_0$ (或者跃迁能 $\hbar\Omega$);
- 束缚能 E_b ;
- 静止能 $m_0 c_0^2$ 。

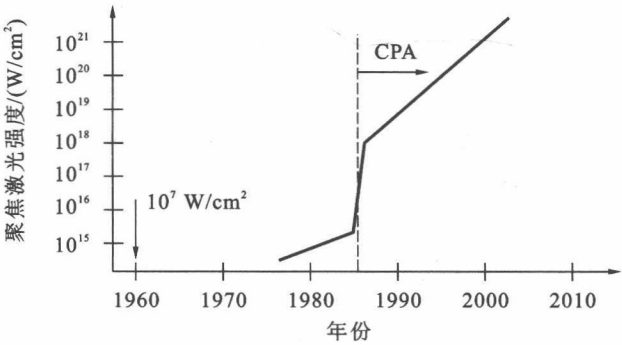


图 1.2 聚焦激光强度向更高方向发展的演变历史(示意图)

注:1960 年红宝石激光器的聚焦激光强度约 10^7 W/cm^2 (如箭头所示);1985 年啁啾脉冲放大技术出现,此后的近二十年间激光强度近似以直线上升形式提高。当然,激光强度可望在未来得到进一步的提升。

表 1.1 给出了相应特征能量的概览,其中空白项则意味着所及两参量为不相关物理量。能量关系满足 $\langle E_{\text{kin}} \rangle$ 略大于 $\hbar\omega_0$ 的情形将在本书后面 4.2 节和 7.3 节予以讨论。

表 1.1 系统特征能量概览

	$\hbar\Omega_R$	$\langle E_{\text{kin}} \rangle$	$\hbar\Omega_B$	$\hbar\omega_c$	$\hbar\Omega_{\text{tun}}$
$\hbar\omega_0$	3, 7.1, 7.2	4.2, 7.3	4.3	4.4, 4.5, 8.2	5.2, 5.3, 5.4, 8.1
E_b		5.2, 5.3, 5.4, 8.1			
$m_0 c_0^2$		4.4, 4.5, 8.2		4.5	

如果极端非线性光学及其相关规律可由传统非线性光学在细枝末节方面的微小修正而得到,那么本书无疑将不具备任何研究或参考价值。但事实上,截至目前的极端非线性光学领域已经呈现出诸多新的物理现象乃至物理效应。下面我们将给出几个简单的物理效应实例以使读者在窥见本书所及内容之一斑的基础上,能够对本书内容的价值有一个初步的总体把握。



实例 1.1

当今常用的泵浦用绿光激光器,其绿光实质上并非直接由激光器谐振腔产生,而是由近红外激光通过二阶谐波产生(Second-Harmonic Generation, SHG)晶体以实现倍频转换过程而得。在传统非线性光学机制下,此类倍频效应只有在不具备反演对称性的材料介质中才可实现。比如,在具备各向同性之属性的玻璃介质中则不可能发生此类效应。而在极端非线性光学机制下,区分倍频过程与二阶谐波产生过程将变得非常困难:每当两种效应相互干涉影响时,彼此之间将是相关的甚至是密不可分的,因为两者均可在具备反演对称属性的介质中发生。

倍频过程指的是光谱图中在二倍于基频光载波频率处产生的光谱峰。比如,通过外现为二阶谐波的三阶谐波产生过程,半导体材料在疏周期强脉冲光场的作用下即可产生倍频过程。根据相关实验结果可知,此类物理效应能达到与传统的由二阶谐波产生过程所致倍频效应几乎相等的信号强度。另一种相关的机制是载波拉比振荡(Carrier-Wave Rabi Flopping),此时激光载波频率的边频带在光谱图上可以与基频光的二阶谐波成分相重合。

二阶谐波产生过程无疑将导致倍频效应,但前者相比后者有较为严格的发生条件——所产生二阶谐波辐射场的载波频率必须是基频激光场载波频率的二倍。对具备反演对称性的绝缘体或者气体而言,其中的圆锥形二阶谐波产生过程将导致真正意义上的二阶谐波辐射场,辐射场呈圆锥形发射轮廓。同样在具有反演对称性的介质中,能够导致真正二阶谐波产生过程的另一种物理机制将在实例 1.4 中予以介绍。