宽带激光脉冲的非线性时空演化及测量研究

邓杨保 著

吉林大学出版社
·长春·

需要全本请访问 www.ertongbook.com

宽带激光脉冲的非线性时空演化及测量研究

邓杨保 著



吉林大学出版社
·长春·

图书在版编目(CIP)数据

宽带激光脉冲的非线性时空演化及测量研究 / 邓杨保著. — 长春 : 吉林大学出版社, 2020.4
ISBN 978-7-5692-6296-4

Ⅰ. ①宽… Ⅱ. ①邓… Ⅲ. ①光脉冲—非线性—宽带传输—研究 Ⅳ. ① TN781

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 058808 号

书　　名：宽带激光脉冲的非线性时空演化及测量研究
KUANDAI JIGUANG MAICHONG DE FEIXIANXING SHIKONG YANHUA JI CELIANG YANJIU

作　　者：邓杨保　著
策划编辑：邵宇彤
责任编辑：卢　婵
责任校对：曲　楠
装帧设计：优盛文化
出版发行：吉林大学出版社
社　　址：长春市人民大街4059号
邮政编码：130021
发行电话：0431-89580028/29/21
网　　址：http://www.jlup.com.cn
电子邮箱：jdcbs@jlu.edu.cn
印　　刷：三河市华晨印务有限公司
成品尺寸：170mm×240mm　16开
印　　张：10
字　　数：180千字
版　　次：2020年4月第1版
印　　次：2020年4月第1次
书　　号：ISBN 978-7-5692-6296-4
定　　价：39.00元

版权所有　翻印必究



邓杨保，男，汉族，1983 年 9 月生，湖南省祁阳县人，中共党员，博士，湖南城市学院副教授，硕士生导师，美国田纳西大学访问学者，湖南省普通高校青年骨干教师，湖南省电子学会会员，湖南城市学院“351 人才”和“246 人才”，现任职于湖南城市学院。近年来，先后主持国家自然科学基金项目 2 项、湖南省自然科学基金项目 2 项、湖南省教育厅优秀青年基金项目 1 项、益阳市科技计划项目 1 项；主要参与完成国家自然科学基金和国家重大专项等 5 项；在 IEEE Photonics Technology Letters, Optics Express, Optics & Laser Technology 等国际 SCI/EI 期刊发表学术论文 20 多篇；获国家发明专利 3 项，作为主要成员获湖南省科技进步三等奖 1 次；指导学生参加湖南省电子设计大赛获省一等奖 1 次、参加美国大学生数学建模竞赛获三等奖 1 次。

前　言

随着超短脉冲激光技术的发展，激光脉冲的脉宽已经进入阿秒量级，从而使激光脉冲的光谱宽度变得越来越宽。光束质量（时空特性）是衡量激光系统性能的一个重要指标。宽带激光脉冲具有“尖锐”的时间特性（飞秒甚至更短）、很小的光束直径和很高的峰值功率等，导致它在介质中传输时会产生多种时空非线性效应，如自聚焦、自散焦、自相位调制、自陡和受激拉曼等，其中自聚焦（尤其是小尺度自聚焦）是最主要的非线性效应，它会影响光束质量，使输出的光束发生严重畸变。实时监测和精密测量宽带激光脉冲非线性传输过程中的时空演化特性就是为了更好地控制输出光束质量，所以研究和精密测量高功率宽带激光脉冲在非线性介质传输中的时空演化规律，无论在理论上还是在实际应用上都具有十分重要的意义。本书在理论和实验上研究了宽带激光脉冲非线性传输过程中的时空演化规律，获得了如下主要成果。

第一，本书第 3 章基于广义（3+1）维非线性薛定谔方程的解析解，在理论上研究了激光脉冲在非均匀非线性介质中的时空传输特性，得到了激光脉冲能够在该介质中稳定传输的条件。研究成果对激光脉冲非线性传输的扩展及调控具有一定的参考价值。

先综合利用奇次平衡法原理和 F- 展宽技术解析求解了具有分布系数的广义（3+1）维非线性薛定谔方程，并得到了一系列的时空孤子解和周期行波解。当激光脉冲在非均匀非线性介质中传输时，由于不同阶的强度矩可以描述激光脉冲的特性，于是利用强度矩方法研究解析解（激光脉冲）在非均匀非线性介质中的时空传输特性，并计算了解析解的束宽、脉宽、光强分布的对称性和时空 K 参数。然后，根据二阶强度矩详细地分析了解析解在非线性传输过程中的时空稳定性。研究发现：①当衍射系数和色散系数为相同的分布系数时，无初始啁啾和带有初始啁啾的时空孤子解的束宽和脉宽为恒定常数，而无初始啁啾和带有初始啁啾的周期行波解的束宽和脉宽

需要全本请访问 www.ertongbook.com

呈周期性变化，因此解析解在非线性传输过程中是稳定的，很小的啁啾或者微扰基本上不影响激光脉冲的时空传输特性；②当衍射系数和色散系数为其他系数时，无初始啁啾的时空孤子解的束宽和脉宽为恒定常数，但是带有初始啁啾的时空孤子解以及无初始啁啾和带有初始啁啾的周期行波解的束宽和脉宽呈现无规律变化，所以激光脉冲在非均匀非线性介质中传输是不稳定的，激光脉冲的时空传输特性很容易受到啁啾或者微扰影响。

第二，本书第 4 章中提出一种精密测量激光脉冲非线性传输过程中时域精细结构的方法，该方法具有操作简单、测量精度高等优点。利用该测量方法在实验上得到了激光脉冲自聚焦过程中的时间演化规律。该方法对测量中红外激光脉冲非线性传输过程中的时间演化特性具有一定的参考价值。

在大型钕玻璃激光系统中，时域上带有初始调制的激光脉冲通过非线性传输和放大，调制将会在整个钕玻璃激光系统中得到累积和增强，因此测量激光脉冲的时域精细结构是非常重要的。本书提出了一种基于同步飞秒激光脉冲测量皮秒激光脉冲在非线性传输过程中的时空演化方法。先从理论上分析了该方法的可行性和正确性，得出该方法能够精密测量时域比较复杂的皮秒激光脉冲精细结构和时间脉宽，飞秒探测激光脉冲的脉宽越短，测量精度越高，测量误差值也越小。然后，在实验上利用同步的 Ti:sapphire 激光器输出脉宽大约 100 fs 的飞秒激光脉冲测量了 Nd:YLF 激光器输出脉宽大约为 75 ps 的皮秒激光脉冲的时域精细结构。实验结果表明，从 Nd:YLF 皮秒激光器输出的皮秒激光脉冲时域比较匀滑干净，测量的脉宽和自相关方法测量结果基本一致。最后，利用该方法测量了皮秒激光脉冲经过不同长度二硫化碳（CS_2）非线性介质后的时空演化特性。结果表明，当 CS_2 介质长度增大时，皮秒激光脉冲在空间上出现轻微的自聚焦效应，时间脉宽有稍微变窄的趋势。

第三，本书第 5 章中提出一种精密测量超短激光脉冲非线性传输过程中不同空间位置的时间脉宽演化规律的方法。利用该测量方法在实验上揭示了小尺度自聚焦过程中局部空间强度变化对时间脉宽的演化影响，即时空耦合效应。

小尺度自聚焦会引起激光光束的局部空间强度迅速增长，从而导致光束分裂成为

强度增长区和强度非增长区域，本书在实验中研究了强度增长区和强度非增长区的时空演化规律。由于激光脉冲不同空间位置的初始光强分布是不均匀的，因此不同空间位置的初始时间脉宽是不一样的。本书提出了一种改进的互相关方法，它能够精密测量飞秒激光脉冲不同空间位置的时间脉宽。然后利用该方法精密测量了小尺度自聚焦过程中飞秒激光脉冲的强度增长区和强度非增长区域的时间脉宽演化规律。结果表明，随着入射峰值功率的增加，强度增长区域的空间峰值强度越来越大，因此该区域的小尺度自聚焦效应变得越来越强，从而导致该区域的时间脉宽变得越来越窄，当空间峰值强度达到最大时，脉宽将压缩到最窄。但是，当入射峰值功率增加时，强度非增长区的空间峰值强度基本保持不变，所以该区域的小尺度自聚焦效应非常弱，时间脉宽基本上保持不变。可见，详细地研究小尺度自聚焦过程中不同空间位置的时间演化规律，能够为精密测量激光脉冲成丝之后不同细丝非线性传输过程中的时空演化规律提供重要的参考依据。

邓杨保

2019 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论……1

1.1 课题来源……3

1.2 背景与意义……3

1.3 宽带激光脉冲的基本概念……6

1.4 宽带激光脉冲的研究现状……8

1.5 宽带激光脉冲的非线性传输特性……10

1.6 激光脉冲特性的测量方法……17

1.7 本章小结……32

第 2 章 宽带激光脉冲非线性传输的基础理论……35

2.1 引言……37

2.2 激光脉冲传输的理论模型……37

2.3 激光脉冲传输方程的基本研究方法……41

2.4 本章小结……48

第 3 章 非均匀非线性介质中激光脉冲的时空传输特性研究……49

3.1 引言……51

3.2 （3+1）维广义非线性薛定谔方程的解析解……52

3.3 解析解的强度演化规律……57

3.4 解析解的时空传输特性……60

3.5 本章小结……73

第 4 章　非线性传输过程中皮秒激光脉冲时空演化的精密测量……75
4.1　引言……77
4.2　理论分析……78
4.3　实验装置……82
4.4　实验结果及分析……85
4.5　本章小结……89
第 5 章　非线性传输过程中飞秒激光脉冲时空演化的精密测量……91
5.1　引言……93
5.2　实验装置……95
5.3　测量过程分析……97
5.4　线性传输过程中全空域中不同位置的时空特性测量……98
5.5　小尺度自聚焦过程中的空间演化规律……100
5.6　小尺度自聚焦过程中的时间演化规律……109
5.7　啁啾对时间脉宽的演化影响……113
5.8　本章小结……114
结　论……117
参考文献……121
致　谢……147

第1章　绪论

需要全本请访问 www.ertongbook.com

1.1　课题来源

本书研究成果获得国家自然科学基金项目“宇称时间对称介质中飞秒涡旋光束的演化及控制机理研究”（编号：61605045）和国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金项目“超短脉冲激光系统中光传输时空特性研究”（编号：10776008）的资助。本书主要对宽带激光脉冲在激光系统传输过程中的时空演化特性进行了一系列的研究，研究内容包括对宽带激光脉冲的传输模型进行系统的研究与分析；啁啾激光脉冲传输过程中各类空间调制对激光光束空间质量的影响，空间微扰增长与调制频率、功率和啁啾的关系；（准）宽带激光脉冲非线性传输过程中的时空演化及测量、不同空间位置的时间脉宽演化规律等。

1.2　背景与意义

随着超短脉冲激光技术的不断进步，激光脉冲的时间宽度已经进入阿秒量级，从而使激光的频谱带宽由窄带迈向宽带范畴，其中一个重大的发展是宽频带飞秒（fs）激光脉冲技术和以它为基础的超高功率超高强度超短脉冲激光器。[1] 高功率超短激光脉冲在非线性光学、强场物理、激光等离子体物理、超高能量密度物理、等离子体加速器及 X 射线激光等研究领域有着极其广泛而重要的应用。[2-4] 1963 年，苏联科学家 N. G. Basov 和 O. N. Krokhin 首次提出了激光核聚变（inertial confinement fusion，ICF）的基本概念。[5] 由于实现核聚变需要非常高的温度，同时用于 ICF 的驱动能量需要也非常高，所以超高功率、超高强度激光装置还是开展“快点火”激光聚变、探索极端条件下物质行

为等重大科学研究的基本手段。在过去的几十年中，世界上许多国家已经投入大量的人力、物力和财力进行相关理论和工程技术研究，陆续建成了一些高功率固体激光系统[6-13]，其中最典型的就是欧洲的 HiPER 激光系统，HiPER 利用现有的激光技术，将一个 200 kJ 的长脉冲激光器和一个 70 kJ 的短脉冲激光器进行了结合[14]。在这方面，国内数家单位如中国科学院上海光学精密机械研究所、中科院物理所和中国工程物理研究院等相继建造了类似的高功率固体激光系统。[15-19]

在研究高功率激光驱动器时，研究者发现如果采用宽频带激光在主激光系统传输，不但可以有效地改善靶面照明的均匀性，而且对激光系统本身有很多好处，如宽频带激光的放大效率比常规窄带激光的放大效率要高，而且宽频带激光的衍射、干涉效应被抑制得很显著，从而使总体性能、输出能力得到较大提高。1983 年，我国著名科学家邓锡铭等人[20]提出用增加频带宽度的方法来提高钕玻璃高功率激光器的输出功率，并进行了一系列的理论与实验研究，研究结果表明增加带宽可以有效地抑制小尺度自聚焦的发生，从而提高高功率激光系统的输出能力。同年，王桂英等人[21]从理论和实验两个方面研究了相同传输条件下宽带激光脉冲和窄带激光脉冲的传输特性，研究结果指出宽带激光脉冲的近场调制要小于窄带激光脉冲的近场调制，而且聚焦功率可以更高。20 世纪 90 年代初，美国劳伯斯 · 利弗莫尔国家实验室（LLNL）的研究人员在研究 ICF 激光驱动器时发现小带宽（大约 10%）可以提高激光打靶时的空间均匀性和材料的负载能力，而且当带宽增加时，小尺度调制的空间增益谱的频率范围往高频方向移动，这就意味着增大带宽可以抑制小尺度自聚焦效应。[22-26] 2006 年，张小明在其博士论文中总结了高功率激光驱动器的发展历史和不足之处，并对未来的发展趋势做出了预测，提出了一种新型高功率激光驱动器“Hi-FPN 激光系统”。这种新型高功率激光驱动器的主要核心功能包括宽带激光脉冲的产生、传输、放大、倍频和控制，该系统能够同时输出三类高功率激

光脉冲，分别为纳秒、皮秒和百飞秒量级的激光脉冲，并且能够降低非线性效应对系统输出能力的影响，增加带宽，提高光束远场分布的均匀性。[27]

综上所述，在高功率激光系统中采用宽带（小宽带）激光脉冲传输放大的技术途径，有可能从根本上解决高功率激光驱动器发展中所遇到的主要问题。此外，国家“快点火”工程的重要工具是以啁啾脉冲放大为技术路线的皮秒高能量激光系统，该系统也是一个典型的宽频带激光系统，但是激光脉冲在该系统中传输时，干涉、衍射等效应和常规的窄带系统是不一样的。所以，宽带激光脉冲的传输与普通窄带（准单色）的激光传输是有区别的，除了受到增益饱和、增益窄化和非线性自聚焦等效应影响外，它还受到自相位调制、色散、光谱漂移和光谱增益窄化等效应的影响，目前许多技术难题还未解决。[28-30] 宽带激光脉冲与窄带激光脉冲的差别主要表现有以下两点。第一，宽带激光脉冲的光谱包含多种频率的光波，而不同频率成分的光波衍射的强弱程度是不一样的，这就导致所谓的时空耦合现象，对光束的展宽、聚焦，以及小尺度自聚焦过程等都有影响[30-31]；第二，宽带激光脉冲具有“宽频带”特点，其光谱带宽是可以与激光增益带宽相比拟的，所以在研究宽带激光脉冲的放大过程中必须考虑不同光谱成分有不同的增益和脉冲光谱的窄化现象。[32] 同时，时空耦合效益会导致宽带激光脉冲在传输过程中发生形状改变的现象。[33-38]

另外，激光脉冲的频谱宽度得到极大增宽，其时间特性就变得非常尖锐（飞秒甚至更短），峰值功率也会变得很高，频谱变宽又必然会导致激光脉冲相关传输特性发生变化。高功率宽带激光脉冲在介质传输时会产生许多时空非线性效应，包括自聚焦效应、自散焦效应、成丝、脉冲塌陷、脉冲分裂、超连续、自陡峭效应、四波混频效应和受激拉曼效应等[38-55]，从而改变激光脉冲的特性或者高效地产生不同频率的超短脉冲，其作用过程非常复杂。在各种非线性效应中，自聚焦（尤其是小尺度自聚焦）是最主要的非线性效应，它会影响光束质量，从而使输出的光束发生严重畸变。实时监测和精密测量宽带激光脉

冲非线性传输过程中的时空演化特性，就是为了更好地控制输出光束质量。目前，对宽带激光脉冲非线性传输过程的空间演化特性进行实时监测测量是能够实现的，但是对时间和相位演化特性进行实时监测测量还是非常困难的，主要有以下几个问题。①超强宽带激光脉冲在非线性介质中传输时会产生各种不同的非线性效应，其作用过程非常复杂，从而导致脉冲的测量和分析非常困难，所以必须借助数值模拟分析和实验验证；②超强宽带激光脉冲在非线性介质中传输时产生各种不同的非线性效应，其作用过程非常快，导致激光脉冲的变化过程很难进行有效的实时监测测量。综上所述，对于进一步研究宽频带激光脉冲在非线性过程中的相关时空特性，以及精密测量宽带激光脉冲非线性传输过程中的时空演化规律，特别是时域精细结构、时间演化特性和相位变化情况，无论在理论上还是在实际应用上都具有非常重要的意义。

1.3 宽带激光脉冲的基本概念

在研究宽带激光脉冲的传输之前，我们必须清楚什么样的脉冲是“宽频带”激光脉冲，它的频谱宽度跟时间脉宽、啁啾之间的关系，以及带宽跟波长、啁啾之间的关系又是怎样的。当入射到介质中的激光脉冲为线性啁啾高斯脉冲时[56]，入射光场可以表示为

$$U(0,T)=\exp\left[-\frac{(1+\mathrm{i}C)}{2}\frac{T^2}{T_0^2}\right] \tag{1.1}$$

式中，C 表示啁啾参量，$C>0$ 表示从脉冲前沿到后沿的瞬时频率线性增加（正啁啾），$C<0$ 则刚好相反（负啁啾）；T_0 表示脉冲的半宽度（在光强峰值的 1/e 处）。对式（1.1）进行傅里叶变换可得到 $\tilde{U}(0,\omega)$ 的表达式：

$$\tilde{U}(0,\omega)=\left(\frac{2\pi T_0^2}{1+\mathrm{i}C}\right)\exp\left[-\frac{\omega^2 T_0^2}{2(1+\mathrm{i}C)}\right] \tag{1.2}$$

由式（1.2）可以得出频谱的半宽度（振幅的 1/e 处）为

$$\Delta\omega = \frac{\sqrt{\left(1+C^2\right)}}{T_0} \tag{1.3}$$

根据式（1.3）可以看出，当啁啾参量为零时（$C=0$），频谱宽度为傅里叶变换极限，满足关系式 $\Delta\omega T_0 = 1$；当啁啾参量不为零时（$C \neq 0$），频谱宽度增大了 $\sqrt{\left(1+C^2\right)}$ 倍。

由于 $\omega = 2\pi c/\lambda$，其中 c 表示光速，λ 表示波长，该式两边同时对 λ 进行求导可得 $\mathrm{d}\omega = \left(-2\pi c/\lambda^2\right)\mathrm{d}\lambda$，即有 $|\Delta\omega| = \left|\left(2\pi c/\lambda^2\right)\Delta\lambda\right|$。将式（1.3）代入前面的式子中就可以得到半带宽（振幅的 1/e 处）跟脉宽、啁啾和波长之间的关系式：

$$\Delta\lambda = \frac{\sqrt{\left(1+C^2\right)}}{T_0}\frac{\lambda^2}{2\pi c} \tag{1.4}$$

在实际情况下，脉冲的宽度常用半高全宽（FWHM）来表示，即有 $T_0 = T_{\mathrm{FWHM}}/2(\ln 2)^{1/2}$，将该式代入式（1.4）中可得带宽（半高全宽）跟脉宽、啁啾和波长的关系：

$$\Delta\lambda_{\mathrm{FWHM}} = \frac{(\ln 2)^{1/2}\sqrt{\left(1+C^2\right)}}{T_{\mathrm{FWHM}}}\frac{\lambda^2}{\pi c} \tag{1.5}$$

由式（1.3）和（1.5）可知，在无初始啁啾情况时（$C=0$），对于特定波长的脉冲，其脉宽越小，带宽就会变得越大。例如，对于波长为 800 nm，脉宽为 $T_{\mathrm{FWHM}} = 100$ fs 的超短脉冲，其带宽为 $\Delta\lambda_{\mathrm{FWHM}} = 11.322$ nm，这个带宽相对于窄带脉冲而言是很大了。对于固定材料的激光器，其输出脉冲的带宽是恒定不变的。例如，实验室的商用 Ti:sapphire 激光器输出带宽为 $\Delta\lambda_{\mathrm{FWHM}} = 12$ nm（大宽带）、脉宽为 100 fs 的超短脉冲；而 Nd:YLF 激光器输出带宽为 $\Delta\lambda_{\mathrm{FWHM}} = 0.1$ nm（准宽带）、脉宽为 75 ps 的脉冲。本书研究的宽带激光脉冲传输主要是指大宽带的飞秒激光脉冲和准宽带的皮秒激光脉冲。

1.4 宽带激光脉冲的研究现状

超短激光脉冲的出现对激光的传输有着很深的影响，同时使人类可以在从未有过的时间尺度上观察超快变化过程。随着激光脉冲的时间宽度变得越来越短，在分辨认识物质的过程的精度也就变得越来越高，于是就诞生了“极限非线性光学”和“单周期非线性光学”。[57] 几年来，超短激光脉冲的脉宽最短纪录不断被刷新 [58]，如在紫外和 X 射线波段可以产生 10 as 的超短脉冲。在可见光和红外波段，已经可以产生与光学周期差不多的甚至更短的超短脉冲，如中心波长为 800 nm 的激光脉冲的光学周期为 2.76 fs。目前，在 270 ～ 1 000 nm 波长范围内可以产生的脉宽为 1.5 fs，只有 0.65 个光学周期的超短脉冲。[59] 在 1.5 μm 波段也能产生单周期光脉冲，这极大地促进了超快光谱技术和阿秒科学技术的发展。[60] 宽频带飞秒激光脉冲技术和以它为基础的超高功率超高强度超短脉冲激光器成为最近几年的研究热点。近十年来，世界上各个主要科技大国已经陆续建成多套超高功率（>40 TW）飞秒激光装置 [3-4][61-68]（表 1.1），如美国的 Berkeley 实验室、Michigan 大学、德国的 MBI 研究所、MPQ 研究所、Jena 大学、日本东京大学和韩国的 KAERI 研究所等实验室建有太瓦量级的飞秒激光装置，并广泛地应用于多个领域。国内数家单位如中国科学院上海光学精密机械研究所、中科院物理所和中国工程物理研究院等也相继建立了几套 TW 量级的飞秒激光系统，其中最典型的一套是中国工程物理研究院于 2004 年初建成的 26 fs 、300 TW 钛宝石激光装置，装置总体性能和多项关键技术已处世界前列。

需要全本请访问 www.ertongbook.com