



“十二五”国家重点出版规划项目

国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

现代激光技术及应用丛书

飞秒激光在前沿 技术中的应用

王清月 等编著

Femtosecond Laser Applications in
Advanced Technologies



国防工业出版社
National Defense Industry Press



“十二五”国家重点出版规划项目

/现代激光技术及应用丛书/

飞秒激光在前沿 技术中的应用

王清月 等编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书介绍飞秒激光技术在前沿领域中的应用。第1章,介绍飞秒激光的基本概念,包括飞秒激光的主要特点、脉冲形成机制以及脉冲的测量手段等。第2章,按照飞秒激光技术的发展历程,介绍几种典型的飞秒激光源,包括钛宝石飞秒激光源、光纤飞秒激光源、光子晶体光纤飞秒激光源、超连续谱飞秒激光源、光学参量飞秒激光源及紫外飞秒激光源等。从第3章开始,介绍飞秒激光在物理、工业、生命科学等领域的典型应用。第3章,介绍飞秒激光在高非线性光子晶体光纤中实现非线性频率变换的应用。第4章,介绍飞秒激光产生超快太赫兹辐射脉冲技术,以及基于该技术的太赫兹时域频谱学。第5章,介绍飞秒激光与金属、透明介质、有机物等典型材料的相互作用机制,讨论其在材料加工中的突出特点。第6章,介绍基于飞秒激光的高时间分辨本领与梳状光谱实现任意长度绝对距离测量的应用。第7章,介绍飞秒激光在生命科学中的应用,包括生物成像、转基因、细胞手术、分子调控、细胞融合及组织修复等方向。

本书主要面向基于飞秒激光开展研究工作的科研人员,并可作为激光专业研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

飞秒激光在前沿技术中的应用/王清月等编著.

—北京:国防工业出版社,2015.12

(现代激光技术及应用丛书)

ISBN 978-7-118-10329-8

I. ①飞… II. ①王… III. ①激光技术—应用
IV. ①TN209

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第283979号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司印刷

新华书店经售

*

开本710×1000 1/16 印张23 字数408千字

2015年12月第1版第1次印刷 印数1—2500册 定价98.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

丛书学术委员会 (按姓氏拼音排序)

主任	金国藩	周炳琨		
副主任	范滇元	龚知本	姜文汉	吕跃广
	桑凤亭	王立军	徐滨士	许祖彦
	赵伊君	周寿桓		
委员	何文忠	李儒新	刘泽金	唐 淳
	王清月	王英俭	张雨东	赵 卫

丛书编辑委员会 (按姓氏拼音排序)

主任	周寿桓			
副主任	何文忠	李儒新	刘泽金	王清月
	王英俭	虞 钢	张雨东	赵 卫
委员	陈卫标	冯国英	高春清	郭 弘
	陆启生	马 晶	沈德元	谭峭峰
	邢海鹰	阎吉祥	曾志男	张 凯
	赵长明			

世界上第一台激光器于1960年诞生在美国,紧接着我国也于1961年研制出第一台国产激光器。激光的重要特性(亮度高、方向性强、单色性好、相干性好)决定了它五十多年来在技术与应用方面迅猛发展,并与多个学科相结合形成多个应用技术领域,比如光电技术、激光医疗与光子生物学、激光制造技术、激光检测与计量技术、激光全息技术、激光光谱分析技术、非线性光学、超快激光学、激光化学、量子光学、激光雷达、激光制导、激光同位素分离、激光可控核聚变、激光武器等。这些交叉技术与新的学科的出现,大大推动了传统产业和新兴产业的发展。可以说,激光技术是20世纪最具革命性的科技成果之一。我国也非常重视激光技术的发展,在《国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006—2020年)》中,激光技术被列为八大前沿技术之一。

近些年来,我国在激光技术理论创新和学科发展方面取得了很大进展,在激光技术相关前沿领域取得了丰硕的科研成果,在激光技术应用方面取得了长足的进步。为了更好地推动激光技术的进一步发展,促进激光技术的应用,国防工业出版社策划组织编写出版了这套丛书。策划伊始,定位即非常明确,要“凝聚原创成果,体现国家水平”。为此,专门组织成立了丛书的编辑委员会,为确保丛书的学术质量,又成立了丛书的学术委员会,这两个委员会的成员有所交叉,一部分人是几十年在激光技术领域从事研究与教学的老专家,一部分是长期在一线从事激光技术与应用研究的中年专家;编辑委员会成员主要以丛书各分册的第一作者为主。周寿桓院士为编辑委员会主任,我们两位被聘为学术委员会主任。为达到丛书的出版目的,2012年2月23日两个委员会一起在成都召开了工作会议,绝大部分委员都参加了会议。会上大家进行了充分讨论,确定丛书书目、丛书特色、丛书架构、内容选取、作者选定、写作与出版计划等等,丛书的编写工作从那时就正式地开展起来了。

历时四年至今日,丛书已大部分编写完成。其间两个委员会做了大量的工作,又召开了多次会议,对部分书目及作者进行了调整。组织两个委员会的委员对编写大纲和书稿进行了多次审查,聘请专家对每一本书稿进行了审稿。

总体来说,丛书达到了预期的目的。丛书先后被评为国家“十二五”重点出

版规划项目和国家出版基金资助项目。丛书本身具有鲜明特色:一)丛书在内容上分三个部分,激光器、激光传输与控制、激光技术的应用,整体内容的选取侧重高功率高能激光技术及其应用;二)丛书的写法注重了系统性,为方便读者阅读,采用了理论—技术—应用的编写体系;三)丛书的成书基础好,是相关专家研究成果的总结和提炼,包括国家的各类基金项目,如973项目、863项目、国家自然科学基金项目、国防重点工程和预研项目等,书中介绍的很多理论成果、仪器设备、技术应用获得了国家发明奖和国家科技进步奖等众多奖项;四)丛书作者均来自于国内具有代表性的从事激光技术研究的科研院所和高等院校,包括国家、中科院、教育部的重点实验室以及创新团队等,这些单位承担了我国激光技术研究领域的绝大部分重大的科研项目,取得了丰硕的成果,有的成果创造了多项国际纪录,有的属国际首创,发表了大量高水平的具有国际影响力的学术论文,代表了国内激光技术研究的最高水平。特别是这些作者本身大都从事研究工作几十年,积累了丰富的研究经验,丛书中不仅有科研成果的凝练升华,还有着大量作者科研工作的方法、思路和心得体会。

综上所述,相信丛书的出版会对今后激光技术的研究和应用产生积极的重要作用。

感谢丛书两个委员会的各位委员、各位作者对丛书出版所做的奉献,同时也感谢多位院士在丛书策划、立项、审稿过程中给予的支持和帮助!

丛书起点高、内容新、覆盖面广、写作要求严,编写及组织工作难度大,作为丛书的学术委员会主任,很高兴看到丛书的出版,欣然写下这段文字,是为序,亦为总的前言。

金国藩 周炳琨

2015年3月

飞秒激光诞生于20世纪80年代初,当时已经有科学家预言,飞秒激光将是所有激光中应用最广泛的一种激光技术,原因有两方面:一是飞秒激光可以做其他激光不可能做的事;二是其他激光可以做的事,飞秒激光能够做得更好。30多年的飞秒激光发展史正使这一预言变为现实。1981年,首台飞秒激光器诞生,称为染料飞秒激光,它是人类在实验室条件下首次获得的短至飞秒量级的脉冲,它所具有的极高时间分辨率,使其在物理、化学领域的超快过程研究中获得重大应用,取得重大突破,开辟了飞秒激光新时代。但是,染料飞秒激光的液体形态导致的运转不稳定性,又将飞秒激光的应用局限于基础科学中的超快过程研究。1991年,掺钛蓝宝石飞秒激光器诞生,它的固体形态的增益介质不仅使飞秒激光运转稳定性大大提高,而且将峰值功率提高到太瓦(10^{12}W)以上,从而不仅开辟了飞秒激光在强场物理等基础学科的新应用,而且应用到新一代辐射光源、激光受控核聚变快速点火等大科学工程,以及微纳加工等新技术领域。但是,以块状固体为增益介质的钛宝石飞秒激光,仍然受制于两个方面:一方面是过于复杂的结构和过于苛刻的环境要求造成经济成本和维护管理成本十分昂贵,使其成为一种贵族技术,严重限制了其应用范围;另一方面是块状固体激光的热效应大大限制了它的平均功率(尽管峰值功率很高),使其无法满足需要高平均功率的飞秒技术应用领域。为此同时发展起来的另一类固体飞秒激光就是光纤飞秒激光,它实现了飞秒激光的简单化、集成化、小型化,便于操作,成本低廉,在信息领域和其他领域中获得广泛应用。但是受限于纤芯面积,平均功率低仍然是其突出的短板。21世纪初具有微结构特征的光子晶体光纤飞秒激光技术的诞生,将飞秒激光应用推向了一个新阶段。光子晶体光纤所具有的微纳结构,使其非线性、色散和偏振具有设计的灵活性和操作的便利性,它使飞秒激光具有了类型的多样性和应用的普适性。它的平均功率可以高出钛宝石和传统光纤飞秒激光1~2个数量级,从而大大促进了飞秒激光

在各个领域应用的普及化。

天津大学超快激光研究室自1981年开始进行飞秒激光研究以来,30多年坚持这一研究方向,先后经历了液体(染料)飞秒激光、固体(钛宝石)飞秒激光和微结构(光子晶体光纤)飞秒激光几个重要阶段。最近几年又在研究飞秒激光技术的基础上,先后开展了飞秒激光在频率变换、微纳加工、太赫兹波、精密测距和生物光子学等前沿技术中的应用。飞秒激光在前沿技术中的应用,在国际上已成为研究热点,发展十分迅速,并在前沿科学技术、航空航天技术、微纳技术、生物医学技术以及国防等领域不断取得突破性应用成果。飞秒激光在前沿技术应用中的突飞猛进的发展,推动了社会对该领域的知识需求。鉴于此,我们将多年的研究成果和心得体会撰写成本书。本书共分为7章,第1章是对飞秒激光的基础知识、基本概念的论述,由王清月撰写,第2章是对应用中常碰到的典型飞秒激光源的论述,由宋有建、刘博文、方晓惠和王清月撰写。其他5章分别为飞秒激光的频率变换、超快太赫兹波、微纳加工、精密测距和生物光子学,依次分别由胡明列、邢岐荣、庞冬青、宋有建和贺号撰写。全书由王清月审阅定稿,由宋有建协助整理。

由于著者水平所限,书中错误和疏漏之处请广大读者批评指正。

作者

2015年10月

第 1 章 飞秒激光的基本概念和基本知识

1.1	飞秒激光的特点	1
1.2	飞秒激光脉冲是如何形成的	2
1.3	各种物理机制对脉冲宽度的影响	5
1.3.1	增益的滤波作用	5
1.3.2	谐振腔的选模作用	5
1.3.3	自相位调制效应的加宽光谱作用	6
1.3.4	色散对脉冲的影响	7
1.4	超短脉冲激光测量技术	8
1.4.1	强度相关函数	9
1.4.2	双光子荧光法	12
1.4.3	二阶强度光学相关器	13
1.4.4	相干光学相关器	14
1.4.5	单次脉冲光学相关器	18
	参考文献	19

第 2 章 典型飞秒激光源

2.1	钛宝石飞秒激光源	20
2.1.1	钛宝石飞秒激光器	20
2.1.2	钛宝石飞秒激光放大器	31
2.2	光纤飞秒激光源	34
2.2.1	非线性偏振旋转锁模光纤激光器	34
2.2.2	孤子锁模光纤激光器	35
2.2.3	自相似锁模光纤激光器	38
2.3	光子晶体光纤飞秒激光源	40
2.3.1	光子晶体光纤飞秒激光器	40
2.3.2	光子晶体光纤飞秒激光放大系统	75
2.4	其他飞秒激光源	86

2.4.1 超连续谱飞秒激光源	86
2.4.2 光学参量飞秒激光源	89
2.4.3 紫外飞秒激光源	98
参考文献	101

第3章 光子晶体光纤飞秒激光频率变换技术

3.1 光子晶体光纤的典型结构及其特性	104
3.1.1 无截止单模特性	105
3.1.2 可控的色散特性	106
3.1.3 可设计的非线性特性	107
3.1.4 高双折射率特性	108
3.1.5 带隙特性	109
3.2 光子晶体光纤的种类和制作方法	110
3.2.1 全内反射型光子晶体光纤	111
3.2.2 带隙型光子晶体光纤	112
3.2.3 光子晶体光纤的控制方法	113
3.3 高非线性光子晶体光纤及频率上转换	114
3.3.1 偏振控制的频率上转换	114
3.3.2 模式控制的频率上转换	117
3.3.3 多芯光子晶体光纤中的频率上转换	125
3.3.4 光子带隙型光子晶体光纤中的频率变换	128
参考文献	132

第4章 超快太赫兹辐射脉冲的产生与太赫兹时域频谱学

4.1 泵浦-探测技术及太赫兹时域频谱技术	133
4.1.1 泵浦-探测技术	133
4.1.2 太赫兹时域频谱技术	134
4.2 超快太赫兹辐射脉冲的产生及探测	135
4.2.1 电磁辐射方程	135
4.2.2 基于光电导天线的超短太赫兹辐射脉冲的产生及探测	137
4.2.3 光学整流产生超短脉冲太赫兹辐射及其探测	141
4.3 高功率超快太赫兹辐射脉冲	159
4.3.1 大口径光电导天线太赫兹辐射源	160
4.3.2 高效、高功率超快太赫兹辐射脉冲源	161

4.3.3	电子加速器产生超快太赫兹辐射	171
4.3.4	基于气体等离子体的超快太赫兹辐射源	172
4.3.5	物质与强太赫兹辐射的相互作用	174
4.4	超快太赫兹辐射脉冲操控技术	174
4.4.1	太赫兹辐射脉冲的中心频谱调谐技术	175
4.4.2	脉冲整形及编码	178
4.4.3	标准的太赫兹时域频谱实验系统	180
4.4.4	小波域太赫兹时域频谱技术	182
4.4.5	光学泵浦-太赫兹探测太赫兹时域频谱技术	184
4.4.6	太赫兹泵浦-太赫兹探测太赫兹时域频谱技术	187
4.4.7	太赫兹泵浦-光学探测太赫兹时域频谱技术	188
	参考文献	189

第5章 飞秒激光微纳加工技术

5.1	飞秒激光与金属相互作用	196
5.1.1	双温度方程	196
5.1.2	改进的双温度方程	197
5.1.3	双温度方程与流体力学方程组	198
5.1.4	飞秒激光加工金属孔	201
5.1.5	飞秒激光金属表面改性	202
5.2	飞秒激光与透明介质相互作用	204
5.2.1	飞秒激光与透明介质相互作用的理论模型	204
5.2.2	飞秒激光直写波导	207
5.2.3	飞秒激光直写微流体管道	208
5.2.4	飞秒激光全息法制造三维微纳结构	211
5.2.5	飞秒激光表面织构技术	213
5.2.6	飞秒激光与半导体相互作用中的非热熔化	216
5.3	飞秒激光与有机物相互作用	218
5.3.1	紫外激光烧蚀有机物的原理	218
5.3.2	真空紫外激光烧蚀有机物的原理	221
5.3.3	近红外激光烧蚀有机物面临的困难	223
5.3.4	中红外激光共振烧蚀有机物的理论和实验研究	224
5.3.5	激光推进轻型飞行器	228
5.4	多脉冲效应	229
5.4.1	多脉冲的理论	229

5.4.2	高重复频率飞秒脉冲在直写波导领域中的应用	230
5.4.3	高重复频率飞秒脉冲在激光微焊接领域中的应用	231
5.5	氛围的影响	232
5.5.1	水的击穿与超临界水的产生	232
5.5.2	冲击波法纳米化	233
5.5.3	超临界状态的产生及其应用	234
	参考文献	236

第6章 基于飞秒激光的精密测距技术

6.1	激光测距概述	239
6.1.1	脉冲飞行时间距离测量	240
6.1.2	基于光波干涉的距离测量	240
6.1.3	激光测距的定标问题	241
6.1.4	现有的高精度、大量程的激光绝对距离测量方案比较	241
6.2	飞秒激光测距原理	242
6.2.1	飞秒激光的时间-频率特性	242
6.2.2	飞秒激光的飞行时间测距理论	245
6.2.3	飞秒激光的飞行时间与光波干涉相结合的测距理论	248
6.2.4	基于飞秒激光的啁啾脉冲激光雷达	253
6.3	基于飞秒激光的任意长度绝对距离测量技术	255
6.3.1	基于飞秒激光的微尺度、高精度位移测量	257
6.3.2	千米尺度、纳米分辨率的飞秒激光飞行时间绝对距离测量	260
6.3.3	基于双飞秒激光频率梳的高速、高分辨率绝对距离测量	264
6.4	飞秒激光任意长度绝对距离测量在卫星编队飞行中的应用	266
6.4.1	基于卫星编队飞行的合成孔径空间探测器	267
6.4.2	基于光学干涉仪的引力波探测器	268
	参考文献	270

第7章 基于飞秒激光的生物光子学

7.1	基于飞秒激光技术的生物成像	273
7.1.1	非线性成像理论	273
7.1.2	多光子荧光成像	280
7.1.3	谐波成像	284
7.1.4	相干反斯托克斯拉曼散射成像	286

7.1.5	受激辐射耗尽超分辨率显微成像	290
7.2	飞秒激光光镊及转基因技术	293
7.2.1	飞秒激光光镊	294
7.2.2	飞秒激光转基因	298
7.2.3	飞秒激光转基因在基因工程上的应用	303
7.3	飞秒激光细胞手术及分子调控	305
7.3.1	飞秒激光对细胞的精确手术	305
7.3.2	飞秒激光对于神经的精确手术以及神经再生	308
7.3.3	飞秒激光对细胞内钙离子的调控	309
7.3.4	飞秒激光对于细胞内活性氧自由基簇的调控	318
7.4	飞秒激光细胞融合及组织修复	322
7.4.1	飞秒激光对细胞的融合	322
7.4.2	飞秒激光外科手术	324
7.4.3	基于飞秒激光的光动力治疗	329
	参考文献	330

第1章

飞秒激光的基本概念和基本知识

1.1 飞秒激光的特点

飞秒激光有三个特点:一是脉冲宽度极短;二是脉冲峰值功率极高;三是覆盖频谱范围极广^[1-6]。

飞秒激光脉冲的持续时间为 10^{-15} s, 即飞秒(Femtosecond, fs), 它相当于电子绕原子核半周的时间, 以光速为 30 万 km/s 计算, 在 1fs 的时间内, 光仅传播了 $0.3\mu\text{m}$, 可见飞秒这一单位时间之微。这样极端微小的时间在人们所看到的宏观世界里是无法找到其踪迹的。但是, 在由基本粒子所组成的微观世界里, 其运动状态的改变常常发生在飞秒这样极其短暂的时间, 如分子的能量转移、化学键的破裂和形成、原子的横向弛豫和纵向弛豫、半导体中载流子的激发和复合等。正是由于这个缘故, 在飞秒激光诞生后的相当长的一段时间内, 飞秒激光主要是用来研究物理、化学领域微观过程超快现象的一种先进技术, 从而在物理、化学和生物领域完成了大量的超快过程的研究, 发现了大量的新的超快现象, 解释了大量原子、分子微观运动规律, 成为多个基础学科研究领域相当引人注目并获得累累成果的研究方向。

飞秒激光的峰值功率是指脉冲持续时间内所具有的瞬时功率, 即 E/τ , E 为飞秒脉冲包络内所携带的能量, τ 为飞秒脉冲包络的极大值 1/2 处所对应的的时间宽度。由于 τ 为极短的时间, 在 10^{-15} s 量级, 因此, 即使其携带的能量为毫焦耳量级 (10^{-3} J), 其峰值功率也高达 10^{12} W (太瓦) 以上, 它相当于全世界发电总功率之和。目前的飞秒激光放大系统可以输出高达 10^{15} W (拍瓦) 峰值功率的飞秒脉冲。如此超强峰值功率的飞秒激光脉冲, 聚焦之后其焦点区域内所具有的电场强度已经远远超过原子核对其价电子的库仑力。在其作用下, 任何固态、液态和气态的物质都会在瞬间变成等离子体。由此发展起来的超快超强激光物理正在形成强场物理研究领域一个新的分支, 并应用到激光受控核聚变、同步辐射加速器等大科学工程中。正在兴起的飞秒激光微纳精细加工技术也正是利用了飞秒激光超高峰值功率这一特点, 在晶格热传导过程还来

不及发生时,飞秒激光已经在微纳尺度内完成了去除物质或使其改性的物理过程。

当前由飞秒激光器直接输出的波长主要集中在 $0.8 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 的近红外波段,但是由它激发而产生的飞秒激光脉冲却覆盖了从 X 射线到太赫兹波 (Terahertz Wave, THz) 这一广阔领域,利用超强飞秒激光和电子束相互作用的汤姆逊散射效应,可以产生相干的硬 X 射线,波长达 0.04nm 。飞秒强激光与惰性气体原子的相互作用而引发的高次谐波,可获得软 X 波段的相干辐射,波长可覆盖数十纳米至几纳米。飞秒激光在晶体中的二倍频、四倍频、六倍频效应可将近红外的飞秒激光变换至可见、紫外、极紫外和真空紫外波段,直至 150nm ,与高次谐波的软 X 波段相接。利用飞秒激光在晶体中的参量振荡 (Optic Parametric Oscillator, OPO) 和参量放大 (Optic Parametric Amplifier, OPA) 过程,可以在近红外甚至中红外波段实现宽频谱范围的调谐^[7]。除此之外,利用飞秒激光在非线性介质中的传输,可以发生自相位调制 (Self - Phase - Modulation, SPM)、四波混频 (Four Wave Mixing, FWM)、孤子自频移 (Soliton Self - Frequency Shift, SSFS) 和超连续 (Supercontinuum, SC) 等多种非线性效应,这些效应都可以使飞秒激光器输出的光脉冲从单一波长变换到紫外至红外波段。特别值得提出的是,太赫兹波这一在大分子领域极具应用价值的亚毫米波长的辐射,在人类征服了 X 射线—紫外—可见—红外—无线电波的漫长时间之后,终于在 20 世纪 80 年代,借助飞秒激光技术,实现了 $10 \mu\text{m} \sim 3\text{mm}$ 波段的相干辐射。飞秒激光覆盖光谱范围极广的另一层含义是,飞秒激光脉冲内包含着数量极大的分立的可相干光谱成分 (纵模)。一个脉冲宽度数十飞秒的脉冲可包含高达百万个频谱成分,相当于上百万个具有不同中心波长的保持相等频率间隔的连续波 (CW) 激光器。飞秒激光的这一特性在计量标准和精密测量中获得了重大应用。

1.2 飞秒激光脉冲是如何形成的

一个规则的光脉冲或光脉冲序列是由众多具有不同频率成分的光波 $E(t)$ 按照确定的相位关系叠加而成的。图 1-1 ~ 图 1-3 分别给出了两个、四个、八个具有不同频率成分的光波按照相位为零叠加后,形成规则的光场强度 $|E(t)|^2$ 分布 - 序列脉冲。

如果具有不同频率成分的光波按照不确定的相位叠加,其结果就会形成光场强度随机起伏的噪声,而非单个脉冲或脉冲序列,图 1-4 和图 1-5 就是分别将三个、六个不同频率成分的光波按照随机相位叠加后所形成的光场强度 $I(t)$ 随时间的变化。

所以,一个规则的光脉冲或脉冲序列的形成,其必要条件是,首先具有多个频率成分的光波,但是这并不充分,还必须使这些不同频率成分的光波按照确定

的相位进行叠加。人们日常所看到的日光、灯光等都具有众多频率成分,但是其各个成分之间的相位没有确定关系,是随机分布的,所以其光场强度 $I(t)$ 表现为随机时间的无规则起伏,而并非规则的脉冲序列。

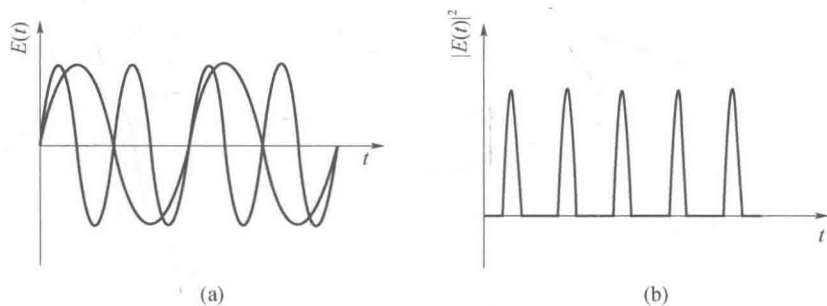


图 1-1 两个不同频率成分的光波零相位叠加

(a) 两个不同频率成分光波的电场示意图; (b) 叠加后的光场强度示意图。

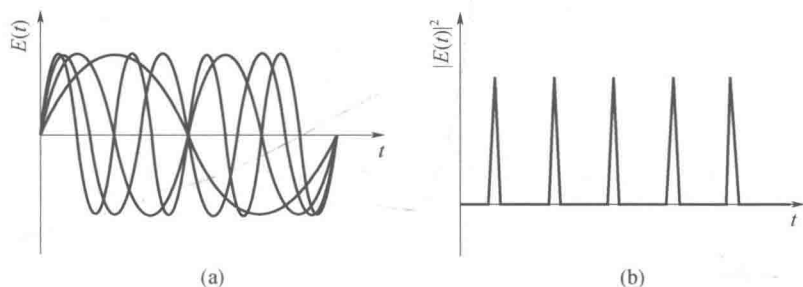


图 1-2 四个不同频率成分的光波零相位叠加

(a) 四个不同频率成分光波的电场示意图; (b) 叠加后的光场强度示意图。

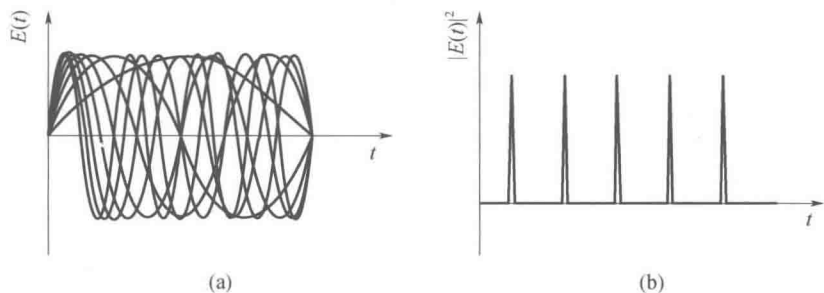


图 1-3 八个不同频率成分的光波零相位叠加

(a) 八个不同频率成分光波的电场示意图; (b) 叠加后的光场强度示意图。

这一非常清晰的物理现象,用数学形式描述,就是众所周知的傅里叶变换,即

$$f(t) = \sum A(\omega_n) e^{i\omega_n t} \quad (1-1)$$

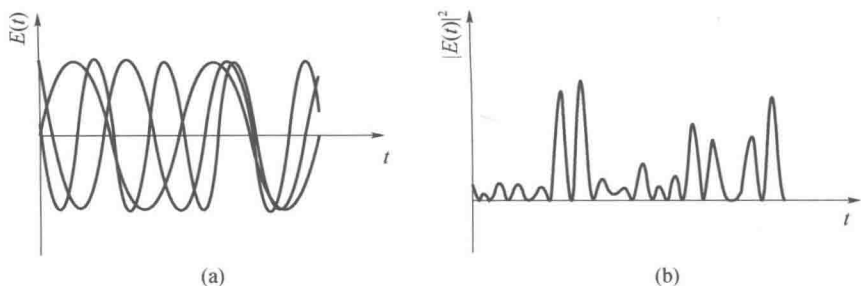


图 1-4 三个不同频率成分的光波按照随机相位叠加

(a) 三个不同频率成分光波的电场示意图; (b) 叠加后的光场强度示意图。

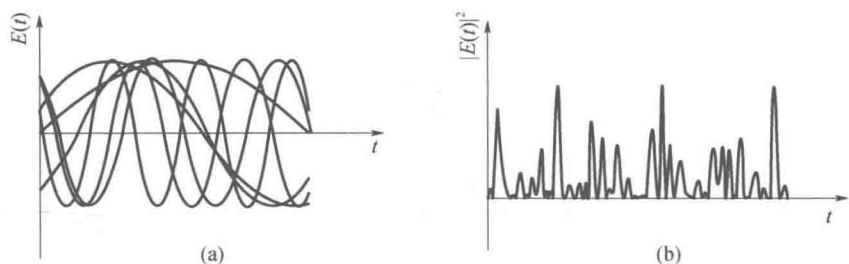


图 1-5 六个不同频率成分的光波按照随机相位叠加

(a) 六个不同频率成分光波的电场示意图; (b) 叠加后的光场强度示意图。

如果频谱成分 $A(\omega_n)$ 相当密集, 则可以用积分代替求和, 即

$$f(t) = \int A(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (1-2)$$

其实, 上述表示式已经隐含了各个频率成分之间的相位为零。如果考虑到各个频谱成分之间相位是不同的, 式(1-2)积分应该将相位 $\phi(\omega)$ 一项加进去, 即

$$f(t) = \int A(\omega) e^{i\omega t} e^{i\phi(\omega)} d\omega \quad (1-3)$$

从式(1-3)可以推导出, 脉冲宽度 Δt 与光谱宽度 $\Delta\omega$ 具有下述简单的关系:

$$\Delta t = \frac{b}{\Delta\omega}, \text{ 或 } \Delta t \Delta\omega = b \quad (1-4)$$

即脉冲宽度与光谱宽度成反比。 b 为一常数, 它是由光脉冲的波形 $f(t)$ 决定的。由此可见, 要想获得窄的脉冲宽度, 必须有充分宽的光谱宽度来支持, 同时要有特定的相位将所有频率成分锁定。

关于如何获得短至飞秒的激光脉冲, 归纳起来, 要从三个方面进行研究: 一是如何获得足够支撑飞秒脉冲宽度的光谱, 其动力学过程主要涉及增益和非线性; 二是如何实现不同频谱成分的特定相位的锁定, 即锁模技术; 三是如何保证