

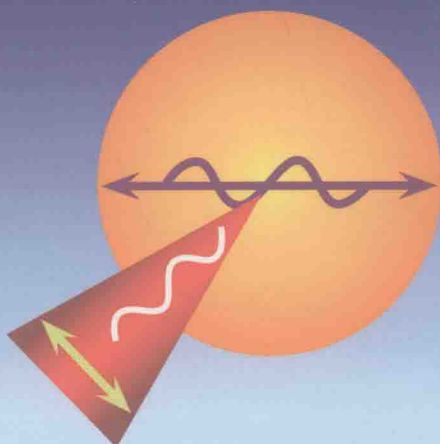


光学与光子学丛书

飞秒激光加工技术

—— 基础与应用

邱建荣 编著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助项目

光学与光子学丛书

飞秒激光加工技术 ——基础与应用

邱建荣 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是一本介绍飞秒激光加工原理、技术和应用的著作。全书分 20 章。第 1 章和第 2 章是飞秒激光脉冲产生和放大的原理以及飞秒激光与物质相互作用的基本原理；第 3~6 章是飞秒激光加工系统、干涉技术、脉冲整形技术；第 7 章是表面加工技术；第 8 章是双光子聚合技术；第 9~19 章是内部加工技术；第 20 章是溶液中制备纳米颗粒技术。

本书可作为飞秒激光加工领域研究的教师和科研人员的参考书，也可作为相关专业的研究生和高年级本科生教材。

图书在版编目(CIP)数据

飞秒激光加工技术：基础与应用/邱建荣编著. —北京：科学出版社，2018.6
(光学与光子学丛书)

ISBN 978-7-03-057863-1

I. ①飞… II. ①邱… III. ①激光加工—研究 IV. ①TG665

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 129493 号

责任编辑：刘凤娟 / 责任校对：杨 然

责任印制：张 伟 / 封面设计：耕 者

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 6 月第 一 版 开本：720 × 1000 1/16

2018 年 6 月第一次印刷 印张：25 1/8 插页：6

字数：500 000

定价：179.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

本丛书名由中国科学院院士母国光先生题写

光学与光子学丛书

《光学与光子学丛书》编委会

主 编 周炳琨

副主编 郭光灿 龚旗煌 朱健强

编 委 (按姓氏拼音排序)

陈家璧 高志山 贺安之 姜会林 李淳飞

廖宁放 刘 旭 刘智深 陆 卫 吕乃光

吕志伟 梅 霆 倪国强 饶瑞中 宋菲君

苏显渝 孙雨南 魏志义 相里斌 徐 雷

宣 丽 杨怀江 杨坤涛 郁道银 袁小聪

张存林 张书练 张卫平 张雨东 赵建林

赵 卫 朱晓农

前 言

人类的历史可以说是人类感知光、理解光、创造光、利用光的一部恢宏的历史画卷。激光是人类发明的一种特殊的光的形态，它具有高方向性、高亮度、高相干性、高单色性等特点，广泛应用于信息、能源、环境、医疗、国家安全等各个领域，被称为 20 世纪改变了人类生活方式和历史进程的最伟大的四项发明之一。迄今为止，从激光的基础理论到激光的前沿应用诞生了众多诺贝尔奖。而飞秒激光是激光的一种极端形态，它具有超短脉冲、超高峰值功率、超高电场强度等特点，自 20 世纪 80 年代横空出世以来，对各个领域的发展起到了极大的推动作用，诞生了新的学科分支。已有 Zewail, Hänsch 以及 Hall 等科学家因为利用飞秒激光的时间分辨光谱技术以及光学频率梳技术而获得了诺贝尔奖。

我在 1995 年初加入由日本京都大学平尾一之教授领衔的日本科技厅创造科学推进事业 (ERATO) 的研究团队，开始接触当时系统庞大的一台价格近 1 亿日元的飞秒激光器，为飞秒激光照射材料时所产生的各种神奇现象所吸引，于是盲打莽撞地开始飞秒激光与材料相互作用这个对我来说陌生但引人入胜的领域的研究。在平尾教授团队近 10 年的时间里，我和团队成员一起发现了众多的神奇现象，如飞秒激光诱导的偏振依赖的纳米光栅和沿激光传播方向的周期性纳米点串结构，开拓了飞秒激光直写光波导、超高密度光存储和三维打孔等新技术，这是我人生中最富有探索精神和创造激情的美好岁月。

2005 年回国后，我建立了光子材料与器件实验室。作为课题负责人，参加了由徐至展院士领衔的科技部 973 项目“超强超短激光科学中的若干重要前沿问题”，又和华东师范大学的贾天卿和张诗按老师合作主持承担了国家自然科学基金委的重点项目“飞秒激光诱导透明介质功能微结构的机理与应用”，继续开展飞秒激光诱导物质的超快动力学和微纳结构的系统研究，并取得了一定成绩，曾于 2005 年和 2015 年先后荣获德国 Abbe 基金颁发的国际 Otto-Schott 研究奖和美国陶瓷协会颁发的 G. W. Morey 奖，这是国际学术界对我们团队工作所取得的成绩的一种承认。我一直想把这 20 年来在这这方面的工作做一个总结。

本书的写作除飞秒激光的结构以及原理、飞秒激光与物质相互作用原理外，主要整理归纳了我们团队在飞秒激光与物质相互作用方面的工作，也参考融入了相关领域国内外团队的重要的代表性工作。近年来国内不少团队如吉林大学、北京理工大学、北京大学、山东大学、南开大学、天津大学、西安交通大学、中国科技大学、华中科技大学、中山大学、江苏大学、华南理工大学、上海大学、昆明理工大

学、中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院西安光学精密机械研究所等团队在飞秒激光精细加工领域做出了系列创新性成果，引起了国际学术界的普遍关注，超短脉冲贝塞尔光束已用于手机面板玻璃等的切割。相关成果在本书中有一定体现。

在本书的写作中，贾天卿教授执笔了第 7 章，赵全忠研究员执笔了第 4 章和第 11 章，张诗按教授执笔了第 6 章，戴晔副教授执笔了第 12 章和第 13 章，宋娟副教授执笔了第 14 章。本人负责其他章节的撰写和统稿。我的研究室的博士后张航和研究生谭德志、张芳腾、于永泽、陈秋群、叶羽婷、王玮琦等对资料整理、书稿的录入和修改等做出了贡献，在此表示衷心感谢。

最后真诚感谢引领我进入飞秒激光与物质相互作用这片神奇土地的平尾一之教授，衷心感谢给了我指导和帮助的徐至展院士、朱从善先生、P. Kazhnsky 教授、三浦清贵教授，和我一起并肩作战精诚协作的研究团队成员，以及给予我宽容、体谅和照顾的家人。

飞秒激光与物质相互作用的研究范围很广，内容非常丰富，而本书所涉及的内容有限，没有将近年发展非常迅速的包括切割和打孔等飞秒激光表面加工通用技术以及时空整形和调制技术包括在内，在选择内容时又带有编著者个人的偏好，所以本书有不少表达不到位或介绍不全面之处，敬请同行不吝施教，提出宝贵意见。



2018 年 5 月于浙江大学

目 录

第 1 章 飞秒激光脉冲的产生与放大	1
1.1 引言	1
1.2 钛宝石激光器飞秒激光脉冲的产生和放大	3
1.2.1 啁啾脉冲放大技术	3
1.2.2 飞秒激光振荡器	4
1.2.3 展宽器	10
1.2.4 放大器	13
1.2.5 压缩器	14
1.3 超短脉冲光纤激光器	15
1.3.1 光纤激光器发展及特点	15
1.3.2 光纤激光器锁模技术	16
1.4 小结和展望	21
参考文献	21
第 2 章 飞秒激光与物质的相互作用原理	23
2.1 引言	23
2.2 飞秒激光的特点	24
2.3 飞秒激光与介质作用机理	25
2.3.1 非线性吸收过程	25
2.3.2 能量传递与转化过程	27
2.3.3 飞秒激光作用材料诱导的微结构	29
2.3.4 飞秒激光加工材料的特点	30
2.3.5 重复频率对飞秒激光诱导微纳结构的影响	31
参考文献	32
第 3 章 飞秒激光微纳加工系统	35
3.1 引言	35
3.2 飞秒激光直写加工系统	36
3.2.1 飞秒激光直写加工系统结构	36
3.2.2 飞秒激光直写诱导微结构	38
3.2.3 飞秒激光直写光波导	38
3.2.4 飞秒激光诱导离子价态变化	39

3.2.5	飞秒激光诱导微纳光栅结构	40
3.2.6	飞秒激光诱导析出金属纳米颗粒	41
3.2.7	飞秒激光诱导析出光功能晶体	42
3.3	飞秒激光多光束干涉微纳加工系统	44
3.4	飞秒激光投影成形技术	47
	参考文献	47
第 4 章	飞秒激光共振干涉技术	49
4.1	引言	49
4.2	飞秒激光共振干涉理论	49
4.2.1	飞秒激光脉冲干涉的实现	49
4.2.2	干涉区光场分布	51
4.3	飞秒激光干涉场诱导微纳结构	54
4.3.1	飞秒激光双光束干涉诱导的微纳结构	54
4.3.2	飞秒激光多光束干涉诱导的微纳结构	57
4.4	小结和展望	61
	参考文献	62
第 5 章	飞秒激光非共振干涉技术	65
5.1	引言	65
5.2	$\omega + 2\omega$ 非共振相干技术	65
5.3	飞秒激光非共振相干实验系统	66
5.4	飞秒激光非共振相干诱导玻璃二阶非线性光学效应	67
5.5	飞秒激光非共振相干诱导聚合物二阶非线性光学效应	69
5.6	小结和展望	71
	参考文献	71
第 6 章	飞秒激光脉冲整形技术	74
6.1	引言	74
6.2	飞秒激光脉冲整形的技术方法	75
6.2.1	液晶空间光调制器	76
6.2.2	硅基液晶调制器	79
6.2.3	声光空间光调制器	81
6.2.4	其他调制器	82
6.3	飞秒激光脉冲整形技术的控制方式	83
6.4	飞秒激光脉冲整形技术的应用	84
6.4.1	分子动力学中的应用	84
6.4.2	非线性光谱学中的应用	88

6.4.3	光纤光学中的应用	89
6.4.4	光通信系统中的应用	89
6.4.5	生物医学中的应用	90
6.4.6	飞秒放大器的相位补偿	90
6.4.7	带通滤波的应用	90
6.5	未来应用趋势	91
6.5.1	量子计算	91
6.5.2	生物医学应用	91
6.5.3	新型半导体器件	92
6.6	小结和展望	93
	参考文献	93
第 7 章	飞秒激光表面加工技术	103
7.1	引言	103
7.2	飞秒激光烧蚀材料表面基本过程及物理机制	104
7.2.1	飞秒激光烧蚀材料表面的基本过程	104
7.2.2	飞秒激光烧蚀材料的物理机制	105
7.3	单束飞秒激光诱导的表面微纳结构及应用	107
7.3.1	表面周期条纹结构	107
7.3.2	飞秒激光诱导的锥状结构	121
7.4	多束飞秒激光干涉形成的表面周期结构及应用	122
7.4.1	飞秒激光双光束干涉制备表面周期结构	123
7.4.2	飞秒激光三光束干涉制备表面周期结构	124
7.4.3	飞秒激光四光束干涉制备表面周期结构	126
7.5	小结和展望	127
	参考文献	128
第 8 章	飞秒激光诱导双光子聚合	135
8.1	引言	135
8.2	双光子聚合材料	136
8.2.1	单体	137
8.2.2	光引发剂	137
8.2.3	添加剂	138
8.3	紫外负性 SU8 光刻胶	138
8.3.1	紫外负性 SU8 光刻胶的主要成分和性质	138
8.3.2	紫外负性 SU8 光刻胶的感光机理	139
8.4	双光子聚合加工原理	139

8.5	双光子聚合加工分辨率	141
8.6	双光子聚合研究进展	142
8.7	小结和展望	146
	参考文献	146
第 9 章	飞秒激光诱导色心形成	148
9.1	引言	148
9.2	飞秒激光在透明材料内部诱导色心	149
9.2.1	飞秒激光在玻璃中诱导色心	149
9.2.2	飞秒激光在晶体中诱导色心	153
9.3	飞秒激光诱导色心的应用	156
9.4	小结和展望	157
	参考文献	157
第 10 章	飞秒激光诱导离子价态变化	160
10.1	引言	160
10.2	飞秒激光诱导离子价态操控	160
10.2.1	飞秒激光诱导过渡金属离子价态变化	160
10.2.2	飞秒激光诱导重金属离子价态变化	161
10.2.3	飞秒激光诱导稀土离子价态变化	163
10.2.4	飞秒激光诱导贵金属离子价态变化	165
10.3	小结和展望	169
	参考文献	169
第 11 章	飞秒激光在透明介质中制备波导器件	172
11.1	引言	172
11.2	飞秒激光诱导透明材料折射率改变机理	173
11.2.1	载流子激发	173
11.2.2	折射率改变	175
11.3	飞秒激光制备光波导	180
11.3.1	激光系统	180
11.3.2	直写形式	181
11.3.3	无源波导	182
11.3.4	波导器件	183
11.3.5	有源波导	183
11.4	波导制备优化技术	185

11.4.1	改善波导对称性	185
11.4.2	提高制作波导效率的方法	192
11.4.3	偏振选择	194
11.5	小结和展望	194
	参考文献	195
第 12 章	飞秒激光诱导晶体选择性析出	207
12.1	引言	207
12.2	飞秒激光诱导晶体选择性析出机理	208
12.3	飞秒激光诱导代表性晶体选择性析出	210
12.3.1	飞秒激光诱导非线性晶体选择性析出	210
12.3.2	飞秒激光诱导析出的晶体对掺杂稀土离子发光的影响	216
12.3.3	飞秒激光诱导半导体晶体选择性析出	222
12.3.4	飞秒激光诱导上转换发光晶体选择性析出	222
12.4	小结和展望	223
	参考文献	224
第 13 章	飞秒激光操控金属纳米粒子	227
13.1	引言	227
13.2	飞秒激光诱导和修饰纳米粒子的原理	228
13.3	飞秒激光诱导玻璃内部金属纳米粒子的析出	230
13.4	飞秒激光诱导玻璃内部金属纳米粒子的形变	234
13.5	飞秒激光在有机透明材料内部调控金属纳米粒子的光学特性	241
13.6	小结和展望	244
	参考文献	244
第 14 章	飞秒激光诱导微孔洞和气泡形成	248
14.1	引言	248
14.2	飞秒激光诱导微孔洞的形成	248
14.3	飞秒激光诱导微孔洞的应用研究	250
14.4	微孔洞的坍塌行为	251
14.5	飞秒激光在材料内部诱导气泡的形成	251
14.6	小结和展望	254
	参考文献	255
第 15 章	飞秒激光照射形成三维流路	257
15.1	引言	257
15.2	飞秒激光制备三维微流通道研究现状	258

15.2.1	飞秒激光改性辅助的化学刻蚀法	258
15.2.2	液体辅助飞秒激光烧蚀法	264
15.3	改善微流通道结构性能的方法	267
15.3.1	激光光束空间整形	268
15.3.2	激光光束时间整形	269
15.3.3	时空聚焦整形技术	270
15.3.4	其他改善技术	270
15.4	存在的问题	272
15.5	小结和展望	272
	参考文献	273
第 16 章	飞秒激光诱导偏振依赖纳米结构	280
16.1	引言	280
16.2	偏振依赖纳米结构的发现及其基本特征	281
16.3	纳米光栅结构的特性	282
16.3.1	光学双折射现象	282
16.3.2	热稳定性	283
16.3.3	周期性	284
16.3.4	可接续性	285
16.3.5	可重复擦写	286
16.3.6	光轴和光程延迟的可控性	287
16.3.7	方向选择性化学腐蚀	288
16.4	纳米光栅结构的应用	289
16.4.1	光学数据存储	289
16.4.2	微流体通道	291
16.4.3	微光学元件	292
16.5	纳米光栅结构形成的物理机制研究	293
16.5.1	纳米光栅结构形成的三个发展阶段	293
16.5.2	目前主流的机理解释及理论模型	294
16.5.3	影响纳米光栅结构形成的因素	299
16.6	小结和展望	302
	参考文献	303
第 17 章	飞秒激光诱导纳米周期性孔洞结构	308
17.1	引言	308
17.2	飞秒激光诱导自组装孔洞结构	309
17.2.1	贝塞尔-高斯飞秒激光束制备周期性孔洞结构	309

17.2.2	飞秒激光光束截断法制备周期性孔洞结构	309
17.2.3	高斯光束紧聚焦方法	310
17.3	高斯光束紧聚焦法诱导周期性孔洞结构的一些重要实验进展	312
17.3.1	多种透明介质材料中诱导周期性孔洞结构	312
17.3.2	高数值孔径的干透镜和无油油浸透镜诱导互为倒装的周期性孔洞结构	317
17.3.3	改变油浸透镜浸润液体诱导互为倒装的周期性孔洞结构	318
17.4	飞秒激光诱导纳米周期性孔洞结构的形成机理	319
17.4.1	样品表面触发和连续脉冲辐照推动的孔洞自组装机制	320
17.4.2	电子等离子体驻波模型	320
17.4.3	环境介质/样品界面折射率差别引起的球差机制	321
17.5	飞秒激光诱导周期性孔洞结构的应用	326
17.5.1	周期性孔洞结构用作涡旋光束阵列产生器	326
17.5.2	利用类周期性孔洞结构制备光波导以及光波导阵列	329
17.5.3	利用周期性孔洞结构制备衍射光栅	331
17.5.4	利用周期性孔洞结构制备条纹取向可控的自组织微光栅	333
17.6	小结和展望	337
	参考文献	338
第 18 章	飞秒激光诱导离子重新分布	341
18.1	引言	341
18.2	飞秒激光在不同玻璃中诱导离子重新分布	342
18.2.1	飞秒激光在硼酸盐玻璃中诱导离子重新分布	342
18.2.2	飞秒激光在硅酸盐玻璃中诱导离子重新分布	345
18.2.3	飞秒激光在锆酸盐玻璃中诱导离子重新分布	354
18.3	小结和展望	355
	参考文献	355
第 19 章	飞秒激光诱导高温高压相形成	358
19.1	引言	358
19.2	飞秒激光诱导局域高温高压特点	358
19.3	飞秒激光诱导高温高压相的进展	359
19.4	小结和展望	362
	参考文献	363
第 20 章	飞秒激光诱导溶液中纳米粒子形成	365
20.1	引言	365
20.2	飞秒激光在溶液中制备纳米粒子的类型和原理	366
20.2.1	块体靶材液相脉冲激光烧蚀法原理	367

20.2.2	散颗粒耗材液相脉冲激光烧蚀法	369
20.2.3	前驱体靶材液相脉冲激光烧蚀法的过程与机理	370
20.3	飞秒激光在溶液中制备纳米粒子的研究进展	370
20.3.1	无表面活性剂的纳米粒子制备	370
20.3.2	半导体纳米粒子制备	373
20.3.3	其他功能纳米粒子制备	375
20.4	飞秒激光液相烧蚀法制备纳米粒子的应用	377
20.4.1	生物学应用	377
20.4.2	光学应用	378
20.4.3	催化应用	379
20.4.4	其他应用	380
20.5	小结和展望	380
	参考文献	380
	索引	387
	彩图	

第1章 飞秒激光脉冲的产生与放大

1.1 引言

激光 (laser), 是“受激辐射光放大” (light amplification by stimulated emission of radiation) 的简称。激光和原子能、半导体以及计算机被称为 20 世纪影响人类文明进程的四大发明。自 1960 年美国休斯公司的科学家 Maiman 利用红宝石研制出第一台激光器以来, 激光技术的应用和发展取得了巨大成就。激光作为全新的光源, 具有方向性好、单色性好、亮度高以及相干性好等优点, 已经在科学技术发展、工农业生产、医疗卫生技术革新、国防军事建设等领域中获得了广泛的应用。在 20 世纪 60 年代, 激光器首次实现锁模, 获得了小于谐振腔一周所需时间的皮秒 (ps, 10^{-12} s) 量级光学相干脉冲。自此之后, 超短脉冲在超快物理与化学过程的研究、超高速通信方面的应用等领域发挥了不可替代的作用。

按照脉冲激光的产生方式, 其发展历程可以分为以下四个阶段。

(1) 20 世纪 60 年代中后期, 各种锁模理论初步建立, 各种锁模方式的初步实验探索, 获得激光脉冲的脉宽在 $10^{-10} \sim 10^{-9}$ s, 属于超短脉冲激光的初始研究阶段。

(2) 20 世纪 70 年代中后期, 各种锁模技术和理论建立完善, 如主动锁模、被动锁模、同步泵浦锁模等, 并在物理和化学领域开展了皮秒级激光脉冲的应用探索。

(3) 20 世纪 80 年代是超短脉冲激光发展的第三个阶段, 主要特征是激光脉冲宽度已进入飞秒 (fs, 10^{-15} s) 阶段, 以碰撞锁模染料激光器为代表。1981 年, 美国贝尔实验室的 Fork 等首次利用碰撞脉冲锁模技术, 在环形染料激光器中获得脉宽为 90 fs 的超短激光脉冲^[1]。就基本锁模原理而言, 碰撞锁模染料激光器仍属于被动锁模范畴, 在锁模方式和机理上没有取得根本意义上的突破。能实现锁模的激发概率最高只能达到 70%, 这导致染料激光器稳定性较差, 不易调整和控制。但是由于脉冲碰撞效应, 激光脉冲能够运转在飞秒量级, 从此拉开了一个十分活跃的新的研究领域——超快激光科学与技术的序幕。

(4) 20 世纪 90 年代以后是超短激光脉冲发展的第四个阶段, 超短脉冲激光技术真正进入飞秒时代。20 世纪 80 年代后期, 随着一批以钛宝石为代表的优质激光晶体的制备及各种锁模技术的发明, 固体激光器发展的第二次革命就此到来。基于固体介质的飞秒激光器利用克尔透镜锁模原理和色散补偿技术, 可以方便地从振荡器中输出脉宽低于 10 fs 的激光脉冲。在自锁模过程中, 激光器的连续振荡模

式可以通过微小振动过渡到锁模状态,省略了饱和吸收器及附加脉冲锁模装置,这使得固体介质飞秒激光放大系统结构更为简化,性能更加优越。1991年,英国圣安德鲁斯大学的 Spence 等首次向人们介绍了由自锁模钛宝石激光器产生 60 fs 激光脉冲的研究成果,引领飞秒激光的研究进入以固体激光器为潮流的时代^[2]。1999年, Morgner 等在腔外利用啁啾镜和低色散棱镜对进行色散调控,产生了带宽超过 400 nm、脉宽 5.4 fs 的超短周期量级脉冲^[3]。2001年, Ell 等在钛宝石激光器腔内利用 BK7 玻璃片产生自相位调制效应将光谱进一步展宽,并且利用 CaF_2 棱镜对和啁啾镜对进行腔内色散补偿,获得脉冲宽度为 5 fs 的超短脉冲,其光谱宽度达到一个倍频程^[4]。2003年, Schenkel 等使用氩气填充的中空光纤进行展宽光谱,利用相位补偿技术,将钛宝石飞秒激光器出射的 25 fs 激光脉冲压缩至 3.8 fs^[5]。在这个时期,除了钛宝石晶体,各种新的固体激光材料也研制成功,如 Cr:LiSAF ^[6], Cr:YAG ^[7] 等,具有非常好的物理特性和优良的光学性能。以这些材料为增益介质的克尔透镜锁模激光器拓宽了固体飞秒激光器的波长范围。另外,半导体可饱和吸收镜的研制和应用弥补了克尔透镜锁模激光器不能自启动的不足,并且增加了飞秒激光器锁模输出的稳定性。

钛宝石飞秒激光器在 20 世纪 90 年代的研制获得了很大的成功,到 21 世纪,方便、实用、高效的新一代光子晶体光纤飞秒激光器的研究也已蓬勃发展。自 1991 年 Russell 等提出在二维光子晶体中引入线缺陷^[8],通过光子带隙的作用限制某些频率光的传播的理论以来,光子晶体光纤开始进入广泛研究的时代。进而,基于光子晶体光纤的飞秒激光技术研究开始快速发展起来。2004年,德国的 Moenster 等利用掺钕离子 (Nd^{3+}) 的光子晶体光纤结合半导体可饱和吸收镜实现被动锁模技术,实现了 26 ps 脉宽的激光脉冲输出^[9]。2007年, Ortaç 等利用掺镱 (Yb) 光子晶体光纤振荡器中的反常色散被动锁模技术获得脉宽小于 500 fs,平均功率大于 880 nW 的飞秒激光脉冲^[10]。2010年, Baumgartl 等开发了大模场面积光子晶体光纤激光器系统,输出脉冲脉宽被压缩至 77 fs,单脉冲能量高达 163 nJ^[11]。目前,掺稀土元素全光纤飞秒激光脉冲的产生与放大技术已成为超快激光技术领域研究热点。掺稀土元素光纤超短脉冲激光器可采用半导体激光器作为泵浦源,具有调节灵活、阈值低、稳定性好等优点,在现代通信技术、超快光学技术、医学、生物学等领域具有广泛的应用前景。光纤飞秒激光器的发展将成为超快激光技术研究领域一个十分活跃的新分支。

脉冲激光的发展历程可以从图 1.1 中了解,图中给出了各个时期对应的脉冲激光脉宽及用于产生脉冲激光的不同激光介质材料。

飞秒激光脉冲具有两个显著的特点:一个是脉冲宽度极短,在飞秒量级;另一个是峰值功率极高。这样的脉冲宽度和功率密度,给科学实验研究带来了前所未有的高时间分辨率、高电场及磁场强度、高压强和高温度的极端物理条件。飞秒激光

的应用可以分为两个方面。一方面，可以直接利用飞秒激光脉宽所提供的时问尺度，直接进行时间分辨光谱学研究。飞秒激光可以用于观测物理、化学和生物等领域的超快过程。例如，将飞秒激光用作相干断层扫描的光源，可以观测到活体细胞的三维图像。1999年，美国加州理工学院的 Zewail 因开创性地利用飞秒激光对化学反应过程中原子与分子转变状态进行时间分辨研究获得了诺贝尔化学奖。飞秒激光可以在各个领域进行快速诊断，能够记录原子、分子水平的一些超快过程，形成多种时间分辨光谱技术和泵浦探测技术，并提供超高的时间分辨率。另一方面，飞秒激光的峰值功率可以达到 $10^{12} \sim 10^{15}$ W 量级。聚焦飞秒激光后的峰值功率密度可以达到 10^{20} W/cm² 的量级，产生的电磁场作用强度足以超过原子核对其周围电子的库仑场强作用强度，达到普通激光所不能达到的强光与物质相互作用的程度，开拓了相关研究领域，如受控核聚变、激光等离子体物理、激光微纳加工等。飞秒脉冲激光在这些领域中日益扩大的应用前景，将不断激励着飞秒脉冲激光技术自身的发展。

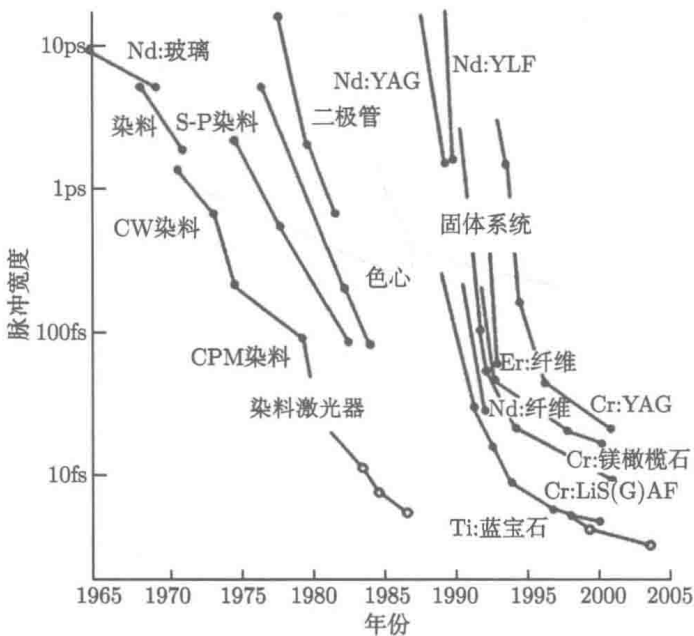


图 1.1 脉冲激光发展历程

1.2 钛宝石激光器飞秒激光脉冲的产生和放大

1.2.1 啁啾脉冲放大技术

自飞秒激光器问世以来，在过去 20 年里，激光技术领域发生了一场深刻的