

清华大学优秀博士学位论文丛书



Tsinghua
theses

基于石墨烯可饱和吸收体的 锁模光纤激光器

付博 著 Fu Bo

Mode-Locked Fiber Lasers Based on
Graphene Saturable Absorbers

清华大学出版社
TSINGHUA UNIVERSITY PRESS

清华大学优秀博士学位论文丛书

基于石墨烯可饱和吸收体的 锁模光纤激光器

付博 著 Fu Bo

Mode-Locked Fiber Lasers Based on
Graphene Saturable Absorbers

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本文介绍了石墨烯的结构、性能、制备方法和应用,阐述了石墨烯作为可饱和吸收体的特点以及石墨烯作为锁模器件在光纤激光器中的应用。基于改进的非线性薛定谔方程,在理想饱和吸收体的模型下数值模拟了锁模脉冲的产生,并分析了石墨烯的调制深度对脉冲输出特性的影响。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

基于石墨烯可饱和吸收体的锁模光纤激光器/付博著. —北京:清华大学出版社,2018
(清华大学优秀博士学位论文丛书)

ISBN 978-7-302-51508-1

I. ①基… II. ①付… III. ①锁模激光器—研究 IV. ①TN248.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 255149 号

责任编辑:陈朝晖

封面设计:傅瑞学

责任校对:王淑云

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:155mm×235mm 印 张:8 字 数:132千字

版 次:2018年12月第1版

印 次:2018年12月第1次印刷

定 价:69.00元

产品编号:071348-01



一流博士生教育 体现一流大学人才培养的高度(代丛书序)^①

人才培养是大学的根本任务。只有培养出一流人才的高校,才能够成为世界一流大学。本科教育是培养一流人才最重要的基础,是一流大学的底色,体现了学校的传统和特色。博士生教育是学历教育的最高层次,体现出一所大学人才培养的高度,代表着一个国家的人才培养水平。清华大学正在全面推进综合改革,深化教育教学改革,探索建立完善的博士生选拔培养机制,不断提升博士生培养质量。

学术精神的培养是博士生教育的根本

学术精神是大学精神的重要组成部分,是学者与学术群体在学术活动中坚守的价值准则。大学对学术精神的追求,反映了一所大学对学术的重视、对真理的热爱和对功利性目标的摒弃。博士生教育要培养有志于追求学术的人,其根本在于学术精神的培养。

无论古今中外,博士这一称号都是和学问、学术紧密联系在一起,和知识探索密切相关。我国的博士一词起源于2000多年前的战国时期,是一种学官名。博士任职者负责保管文献档案、编撰著述,须知识渊博并负有传授学问的职责。东汉学者应劭在《汉官仪》中写道:“博者,通博古今;士者,辩于然否。”后来,人们逐渐把精通某种职业的专门人才称为博士。博士作为一种学位,最早产生于12世纪,最初它是加入教师行会的一种资格证书。19世纪初,德国柏林大学成立,其哲学院取代了以往神学院在大学中的地位,在大学发展的历史上首次产生了由哲学院授予的哲学博士学位,并赋予了哲学博士深层次的教育内涵,即推崇学术自由、创造新知识。哲学博士的设立标志着现代博士生教育的开端,博士则被定义为独立从事学术研究、具备创造新知识能力的人,是学术精神的传承者和光大者。

^① 本文首发于《光明日报》,2017年12月5日。

博士生学习期间是培养学术精神最重要的阶段。博士生需要接受严谨的学术训练,开展深入的学术研究,并通过发表学术论文、参与学术活动及博士论文答辩等环节,证明自身的学术能力。更重要的是,博士生要培养学术志趣,把对学术的热爱融入生命之中,把捍卫真理作为毕生的追求。博士生更要学会如何面对干扰和诱惑,远离功利,保持安静、从容的心态。学术精神特别是其中所蕴含的科学理性精神、学术奉献精神不仅对博士生未来的学术事业至关重要,对博士生一生的发展都大有裨益。

独创性和批判性思维是博士生最重要的素质

博士生需要具备很多素质,包括逻辑推理、言语表达、沟通协作等,但是最重要的素质是独创性和批判性思维。

学术重视传承,但更看重突破和创新。博士生作为学术事业的后备力量,要立志于追求独创性。独创意味着独立和创造,没有独立精神,往往很难产生创造性的成果。1929年6月3日,在清华大学国学院导师王国维逝世二周年之际,国学院师生为纪念这位杰出的学者,募款修造“海宁王静安先生纪念碑”,同为国学院导师的陈寅恪先生撰写了碑铭,其中写道:“先生之著述,或有时而不章;先生之学说,或有时而可商;惟此独立之精神,自由之思想,历千万祀,与天壤而同久,共三光而永光。”这是对于一位学者的极高评价。中国著名的史学家、文学家司马迁所讲的“究天人之际、通古今之变,成一家之言”也是强调要在古今贯通中形成自己独立的见解,并努力达到新的高度。博士生应该以“独立之精神、自由之思想”来要求自己,不断创造新的学术成果。

诺贝尔物理学奖获得者杨振宁先生曾在20世纪80年代初对到访纽约州立大学石溪分校的90多名中国学生、学者提出:“独创性是科学工作者最重要的素质。”杨先生主张做研究的人一定要有独创的精神、独到的见解和独立研究的能力。在科技如此发达的今天,学术上的独创性变得越来越难,也愈加珍贵和重要。博士生要树立敢为天下先的志向,在独创性上下功夫,勇于挑战最前沿的科学问题。

批判性思维是一种遵循逻辑规则、不断质疑和反省的思维方式,具有批判性思维的人勇于挑战自己、敢于挑战权威。批判性思维的缺乏往往被认为是中国学生特有的弱项,也是我们在博士生培养方面存在的一个普遍问题。2001年,美国卡内基基金会开展了一项“卡内基博士生教育创新计划”,针对博士生教育进行调研,并发布了研究报告。该报告指出:在美国和

欧洲,培养学生保持批判而质疑的眼光看待自己、同行和导师的观点同样非常不容易,批判性思维的培养必须要成为博士生培养项目的组成部分。

对于博士生而言,批判性思维的养成要从如何面对权威开始。为了鼓励学生质疑学术权威、挑战现有学术范式,培养学生的挑战精神和创新能力,清华大学在2013年发起“巅峰对话”,由学生自主邀请各学科领域具有国际影响力的学术大师与清华学生同台对话。该活动迄今已经举办了21期,先后邀请17位诺贝尔奖、3位图灵奖、1位菲尔兹奖获得者参与对话。诺贝尔化学奖得主巴里·夏普莱斯(Barry Sharpless)在2013年11月来清华参加“巅峰对话”时,对于清华学生的质疑精神印象深刻。他在接受媒体采访时谈道:“清华的学生无所畏惧,请原谅我的措辞,但他们真的很有胆量。”这是我听到的对清华学生的最高评价,博士生就应该具备这样的勇气和能力。培养批判性思维更难的一层是要有勇气不断否定自己,有一种不断超越自己的精神。爱因斯坦说:“在真理的认识方面,任何以权威自居的人,必将在上帝的嬉笑中垮台。”这句名言应该成为每一位从事学术研究的博士生的箴言。

提高博士生培养质量有赖于构建全方位的博士生教育体系

一流的博士生教育要有一流的教育理念,需要构建全方位的教育体系,把教育理念落实到博士生培养的各个环节中。

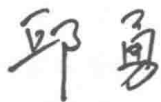
在博士生选拔方面,不能简单按考分录取,而是要侧重评价学术志趣和创新潜力。知识结构固然重要,但学术志趣和创新潜力更关键,考分不能完全反映学生的学术潜质。清华大学在经过多年试点探索的基础上,于2016年开始全面实行博士生招生“申请-审核”制,从原来的按照考试分数招收博士生转变为按科研创新能力、专业学术潜质招收,并给予院系、学科、导师更大的自主权。《清华大学“申请-审核”制实施办法》明晰了导师和院系在考核、遴选和推荐上的权利和职责,同时确定了规范的流程及监管要求。

在博士生导师资格确认方面,不能论资排辈,要更看重教师的学术活力及研究工作的前沿性。博士生教育质量的提升关键在于教师,要让更多、更优秀的教师参与到博士生教育中来。清华大学从2009年开始探索将博士生导师评定权下放到各学位评定分委员会,允许评聘一部分优秀副教授担任博士生导师。近年来学校在推进教师人事制度改革过程中,明确教研系列助理教授可以独立指导博士生,让富有创造活力的青年教师指导优秀的青年学生,师生相互促进、共同成长。

在促进博士生交流方面,要努力突破学科领域的界限,注重搭建跨学科的平台。跨学科交流是激发博士生学术创造力的重要途径,博士生要努力提升在交叉学科领域开展科研工作的能力。清华大学于2014年创办了“微沙龙”平台,同学们可以通过微信平台随时发布学术话题、寻觅学术伙伴。3年来,博士生参与和发起“微沙龙”12000多场,参与博士生达38000多人次。“微沙龙”促进了不同学科学生之间的思想碰撞,激发了同学们的学术志趣。清华于2002年创办了博士生论坛,论坛由同学自己组织,师生共同参与。博士生论坛持续举办了500期,开展了18000多场学术报告,切实起到了师生互动、教学相长、学科交融、促进交流的作用。学校积极资助博士生到世界一流大学开展交流与合作研究,超过60%的博士生有海外访学经历。清华于2011年设立了发展中国家博士生项目,鼓励学生到发展中国家亲身体验和调研,在全球化背景下研究发展中国家的各类问题。

在博士学位评定方面,权力要进一步下放,学术判断应该由各领域的学者来负责。院系二级学术单位应该在评定博士论文水平上拥有更多的权力,也应担负更多的责任。清华大学从2015年开始把学位论文的评审职责授权给各学位评定分委员会,学位论文质量和学位评审过程主要由各学位分委员会进行把关,校学位委员会负责学位管理整体工作,负责制度建设和争议事项处理。

全面提高人才培养能力是建设世界一流大学的核心。博士生培养质量的提升是大学办学质量提升的重要标志。我们要高度重视、充分发挥博士生教育的战略性、引领性作用,面向世界、勇于进取,树立自信、保持特色,不断推动一流大学的人才培养迈向新的高度。



清华大学校长

2017年12月

丛书序二

以学术型人才培养为主的博士生教育，肩负着培养具有国际竞争力的高层次学术创新人才的重任，是国家发展战略的重要组成部分，是清华大学人才培养的重中之重。

作为首批设立研究生院的高校，清华大学自20世纪80年代初开始，立足国家和社会需要，结合校内实际情况，不断推动博士生教育改革。为了提供适宜博士生成长的学术环境，我校一方面不断地营造浓厚的学术氛围，一方面大力推动培养模式创新探索。我校已多年运行一系列博士生培养专项基金和特色项目，激励博士生潜心学术、锐意创新，提升博士生的国际视野，倡导跨学科研究与交流，不断提升博士生培养质量。

博士生是最具创造力的学术研究新生力量，思维活跃，求真求实。他们在导师的指导下进入本领域研究前沿，吸取本领域最新的研究成果，拓宽人类的认知边界，不断取得创新性成果。这套优秀博士学位论文丛书，不仅是我校博士生研究工作前沿成果的体现，也是我校博士生学术精神传承和光大的体现。

这套丛书的每一篇论文均来自学校新近每年评选的校级优秀博士学位论文。为了鼓励创新，激励优秀的博士生脱颖而出，同时激励导师悉心指导，我校评选校级优秀博士学位论文已有20多年。评选出的优秀博士学位论文代表了我校各学科最优秀的博士学位论文的水平。为了传播优秀的博士学位论文成果，更好地推动学术交流与学科建设，促进博士生未来发展和成长，清华大学研究生院与清华大学出版社合作出版这些优秀的博士学位论文。

感谢清华大学出版社，悉心地为每位作者提供专业、细致的写作和出版指导，使这些博士论文以专著方式呈现在读者面前，促进了这些最新的优秀研究成果的快速广泛传播。相信本套丛书的出版可以为国内外各相关领域或交叉领域的在读研究生和科研人员提供有益的参考，为相关学科领域的发展和优秀科研成果的转化起到积极的推动作用。

感谢丛书作者的导师们。这些优秀的博士学位论文,从选题、研究到成文,离不开导师的精心指导。我校优秀的师生导学传统,成就了一项项优秀的研究成果,成就了一大批青年学者,也成就了清华的学术研究。感谢导师们为每篇论文精心撰写序言,帮助读者更好地理解论文。

感谢丛书的作者们。他们优秀的学术成果,连同鲜活的思想、创新的精神、严谨的学风,都为致力于学术研究的后来者树立了榜样。他们本着精益求精的精神,对论文进行了细致的修改完善,使之在具备科学性、前沿性的同时,更具系统性和可读性。

这套丛书涵盖清华众多学科,从论文的选题能够感受到作者们积极参与国家重大战略、社会发展问题、新兴产业创新等的研究热情,能够感受到作者们的国际视野和人文情怀。相信这些年轻作者们勇于承担学术创新重任的社会责任感能够感染和带动越来越多的博士生们,将论文书写在祖国的大地上。

祝愿丛书的作者们、读者们和所有从事学术研究的同行们在未来的道路上坚持梦想,百折不挠!在服务国家、奉献社会和造福人类的事业中不断创新,做新时代的引领者。

相信每一位读者在阅读这一本本学术著作的时候,在吸取学术创新成果、享受学术之美的同时,能够将其中所蕴含的科学理性精神和学术奉献精神传播和发扬出去。

清华大学研究生院院长

2018年1月

摘 要

可饱和吸收体是激光器的重要锁模器件。近年来,由于石墨烯作为饱和吸收体所具有的超宽的工作波段、超快的恢复时间、低线性吸收、高损伤阈值、可控的调制深度和较低的成本等特点而受到了人们的广泛关注。自从2009年石墨烯首次应用于光纤激光器以来,石墨烯作为锁模器件在光纤激光器中的应用越来越广泛。本文利用石墨烯作为锁模器件,实现了在不同波段光纤激光器中的锁模,本文的主要内容包括:

介绍了石墨烯的结构、性能、制备方法和应用,阐述了石墨烯作为可饱和吸收体的特点以及石墨烯作为锁模器件在光纤激光器中的应用。基于改进的非线性薛定谔方程,在理想饱和吸收体的模型下数值模拟了锁模脉冲的产生,并分析了石墨烯的调制深度对脉冲输出特性的影响。

用光诱导的方法把石墨烯转移至光纤端面,制备了石墨烯的锁模器件,对石墨烯的线性吸收、拉曼频移和调制深度等特性进行了表征。研究了石墨烯在掺铒光纤激光器中的锁模和谐波锁模,得到了重频频率为502.84MHz的32阶谐波锁模,并对比了石墨烯锁模器件在不同损耗时锁模和谐波锁模的性能。

把石墨烯薄膜的样品与光纤集成,应用在 $2\mu\text{m}$ 波段铽钦共掺光纤激光器中的锁模。研究了在较长腔时激光器的输出特性,实现了在铽钦共掺光纤激光器中的纳秒脉冲锁模,输出的单脉冲能量高达38.6nJ,并总结了腔长和泵浦功率对激光器输出特性的影响。

利用同一个石墨烯锁模器件实现了在掺镱($1\mu\text{m}$)、掺铒($1.5\mu\text{m}$)和铽钦共掺($2\mu\text{m}$)三个波段光纤激光器中的锁模,波长跨度近1000nm。

关键词: 石墨烯; 光纤激光器; 锁模; 可饱和吸收体

符号及缩写词表

BPF	带通滤波器 (bandpass filter)
CVD	化学气相沉积 (chemical vapor deposition)
EDF	掺铒光纤 (erbium doped fiber)
EDFA	掺铒光纤放大器 (erbium doped fiber amplifier)
FWHM	半高全宽 (full width at half maximum)
GVD	群速度色散 (group velocity dispersion)
GSA	石墨烯饱和吸收体 (graphene saturable absorber)
LD	激光二极管 (laser diode)
NALM	非线性放大环形镜 (nonlinear amplifying loop mirror)
NPR	非线性偏振旋转 (nonlinear polarization rotation)
OC	耦合器 (output coupler)
PBS	偏振分束器 (polarization beam splitter)
PI-ISO	偏振无关隔离器 (polarization insensitive isolator)
PC	偏振控制器 (polarization controller)
PD-ISO	偏振相关隔离器 (polarization dependent isolator)
RF	射频 (radio frequency)
SPM	自相位调制 (self phase modulation)
SESAM	半导体饱和吸收镜 (semiconductor saturable absorber mirror)
SWNTs	单壁碳纳米管 (single walled carbon nanotubes)
SMF	单模光纤 (single mode fiber)
SMS	超模抑制 (super mode suppression)
SNR	信噪比 (signal to noise ratio)
SEM	扫描电子显微镜 (scanning electron microscope)
TDF	掺铥光纤 (thulium doped fiber)
TDFA	掺铥光纤放大器 (thulium doped fiber amplifier)

TBP	时间带宽积(time-bandwidth product)
TEM	透射电子显微镜(transmission electron microscope)
THDF	铥钬共掺光纤(thulium-, holmium-codoped fiber)
WDM	波分复用器(wavelength division multiplexer)
YDF	掺镱光纤(ytterbium doped fiber)

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 本文研究的背景和意义	1
1.1.1 超短光脉冲和激光器的锁模	1
1.1.2 被动锁模的实现方法	2
1.2 锁模光纤激光器的分类	5
1.2.1 孤子光纤激光器	6
1.2.2 展宽脉冲光纤激光器	6
1.2.3 自相似光纤激光器	6
1.2.4 全正色散光纤激光器	7
1.3 饱和吸收体的类型及其在锁模光纤激光器中的应用	7
1.3.1 半导体饱和吸收镜	7
1.3.2 单壁碳纳米管	7
1.3.3 石墨烯	9
1.3.4 其他种类的可饱和吸收体	10
1.4 国内外研究现状与进展	11
1.4.1 基于石墨烯可饱和吸收体的锁模光纤激光器	11
1.4.2 石墨烯在其他种类激光器中的应用	16
1.4.3 石墨烯可饱和吸收体的宽带锁模特性	18
1.5 本文的主要内容	21
第 2 章 石墨烯的特性及其在锁模光纤激光器中的应用	25
2.1 引言	25
2.2 石墨烯的结构和特性	25
2.2.1 石墨烯的结构	25
2.2.2 石墨烯的性能	26

2.2.3	石墨烯的制备方法	27
2.2.4	石墨烯的应用	28
2.3	石墨烯作为可饱和吸收体的特点及其在锁模光纤激光器中的应用	29
2.3.1	石墨烯作为可饱和吸收体的特点	29
2.3.2	石墨烯与其他可饱和吸收体的对比和优势	29
2.3.3	石墨烯作为锁模器件在光纤激光器中的应用	31
2.4	石墨烯锁模光纤激光器的数值模拟介绍	32
2.4.1	理想饱和吸收体模型	32
2.4.2	石墨烯锁模光纤激光器的理论模型	32
2.4.3	理想饱和吸收体模型下锁模脉冲的产生	33
2.4.4	石墨烯的调制深度对脉冲输出特性的影响	34
2.5	本章小结	38
第3章 石墨烯掺铒光纤激光器的锁模和谐波锁模		39
3.1	引言	39
3.2	光诱导法及石墨烯的特性表征	40
3.2.1	光诱导法	40
3.2.2	石墨烯的特性表征	41
3.2.3	石墨烯调制深度的测量	41
3.3	掺铒光纤激光器的锁模和谐波锁模	42
3.3.1	实验装置	43
3.3.2	低损耗石墨烯样品的锁模和谐波锁模	44
3.3.3	高损耗石墨烯样品的锁模和谐波锁模	51
3.4	本章小结	55
第4章 石墨烯在铽钕共掺光纤激光器中的纳秒脉冲锁模		57
4.1	引言	57
4.2	化学气相沉积法获得的石墨烯样品及其特性表征	58
4.2.1	石墨烯的制备及与光纤的集成	58
4.2.2	石墨烯的特性表征	59

4.3	铥钕共掺光纤激光器的纳秒脉冲锁模·····	60
4.3.1	实验装置·····	60
4.3.2	腔中含有100m长普通单模光纤时的锁模·····	61
4.3.3	腔中含有200m长普通单模光纤时的锁模·····	67
4.4	腔长和泵浦功率对激光器输出特性的影响·····	69
4.4.1	腔长对激光器输出特性的影响·····	69
4.4.2	泵浦功率对激光器输出特性的影响·····	70
4.5	本章小结·····	73
第5章	石墨烯可饱和吸收体的宽带锁模特性·····	75
5.1	引言·····	75
5.2	石墨烯的线性吸收和调制深度的测量·····	76
5.3	同一石墨烯样品在掺镱、掺铒和铥钕共掺三个光纤激光器中的 锁模·····	77
5.3.1	实验装置·····	77
5.3.2	石墨烯的掺镱(1 μ m)锁模光纤激光器·····	78
5.3.3	石墨烯的掺铒(1.5 μ m)锁模光纤激光器·····	79
5.3.4	石墨烯的铥钕共掺(2 μ m)锁模光纤激光器·····	83
5.4	本章小结·····	85
第6章	结论与展望·····	87
6.1	本文的主要内容和工作总结·····	87
6.2	本文主要创新点·····	89
6.3	下一步工作展望·····	89
	参考文献·····	91

第 1 章 绪 论

1.1 本文研究的背景和意义

1.1.1 超短光脉冲和激光器的锁模

超短光脉冲通常指的是脉冲宽度为皮秒(10^{-12} s 或 ps)或飞秒(10^{-15} s 或 fs)量级的光脉冲。超短光脉冲除了具有窄的脉冲宽度外,还具有高的峰值功率和较宽的光谱宽度等特点。基于其所具有的超快的时间分辨率,超短脉冲可应用在高速时间分辨和大容量光通信系统等领域^[1],并且在泵浦探测技术和时间分辨光谱技术领域得到了快速的发展。例如,A. H. Zewail把超短脉冲应用在化学方面^[2],成功开辟了飞秒化学领域,并于 1999 年获得了诺贝尔化学奖。此外,由傅里叶变换可知,时域上较窄的脉冲宽度在频域上对应于较宽的光谱,周期性的脉冲在频域上对应等间距的梳齿,这使得超短脉冲可用于超精细光谱和光学频率梳等方面^[3],这方面的研究成果于 2005 年获得了诺贝尔物理学奖。超短脉冲的另一个特点是具有高的峰值功率,这使得超短脉冲在激光加工和生物医学等方面也具有广泛的应用^[4,5]。

锁模激光器是获得超短脉冲的常见方法,激光器锁模后所得到的脉冲宽度可以小于 100fs。根据增益介质的类型,激光器可分为半导体激光器、固体激光器和光纤激光器等。而光纤激光器由于其结构简单紧凑、稳定性高、散热性好、无需冷却、不需要准直和输出光束的质量高等特点,受到了人们的广泛青睐。自从 1990 年 M. E. Fermann 等人首次在光纤激光器中成功获得飞秒脉冲的锁模输出以来^[6],锁模光纤激光器得到了快速的发展。

激光器的锁模指的是输出光谱纵模之间的相位是相互锁定的。当激光器实现锁模后,相邻光谱纵模的相位差异为一定值(如图 1.1(a)所示)。在时域上则对应为周期性的脉冲序列(如图 1.1(b)所示),输出脉冲序列的重复频率与光谱的纵模间隔相等。脉冲的宽度与光谱的宽度成反比关系,脉冲的周期等于重复频率的倒数。

实现锁模的方法一般分为两大类,即主动锁模和被动锁模。主动锁模

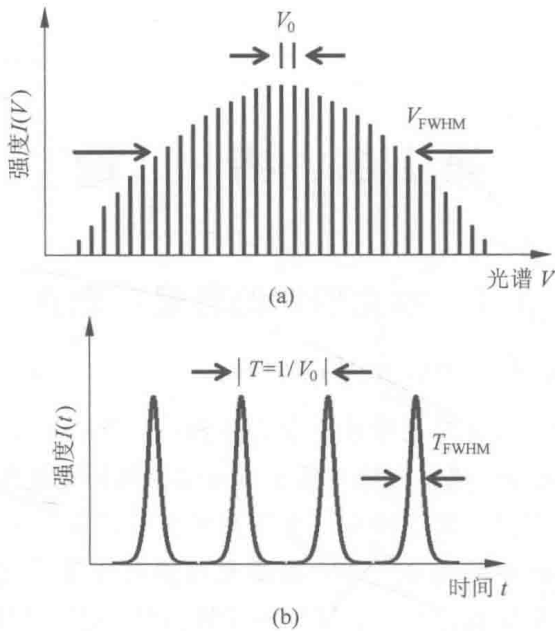


图 1.1 脉冲锁模时的(a)频域光谱和(b)时域脉冲序列

V_0 为相邻纵模的频率间隔, V_{FWHM} 为光谱宽度, t_{FWHM} 为脉冲的宽度, T 为脉冲的周期

一般指的是由外部向激光器提供调制信号,从而周期性地来改变激光器的增益或者损耗而达到锁模目的。而被动锁模是利用材料的可饱和吸收特性来实现激光器超短脉冲的产生。相比于被动锁模,主动锁模需要引入调制的器件,如声光调制器和电光调制器等。由于引入的器件为有源器件,所以需要外接电源或驱动,故结构一般比较复杂,并且成本偏高。此外,由于主动锁模的脉冲宽度反比于所用调制器件的调制频率,而调制器件的频率又不能无限提高,因此不利于产生很短的脉冲^[7]。而被动锁模是基于无源器件的可饱和吸收效应来实现激光器的锁模脉冲输出,激光器的腔结构更加简单。相比于主动锁模,被动锁模更容易获得窄的脉冲输出。接下来,本文主要针对被动锁模的光纤激光器来讨论。

1.1.2 被动锁模的实现方法

1.1.2.1 基于可饱和吸收体的锁模光纤激光器

可饱和吸收体的特点是它的透过率随着入射光功率的增强而增大(如图 1.2(a)所示),最终达到饱和。基于可饱和吸收体的锁模可追溯到