

学校编码: 10384

分类号__密级__

学号: 23120100154042

UDC__

廈門大學

博 士 学 位 论 文

碳纳米管及石墨烯锁模超快光纤激光器

Ultrafast Fiber Lasers Mode-Locked by Carbon Nanotubes
and Graphene

王金章

指导教师姓名: 蔡志平教授

专业名称: 电路与系统

论文提交日期: 2014年5月

论文答辩时间: 2014年5月

学位授予日期: 2014年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2014年5月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

皮秒或飞秒超快脉冲激光器在科学、商业及工业等领域内具有许多重要应用，例如微机械加工，飞秒化学，医学成像以及光通信等。在过去二十年中，新增益介质以及新锁模技术的不断发展，已经改变了整个超快激光器的应用前景，使之变成了一项非常成熟的技术。目前遗留的前沿技术是制作结构紧凑、性能稳定、价格低廉及实用的超快激光源。被动锁模光纤激光器因为具有高增益、无需准直、高效散热且不用外加主动调制器件等优点，被认为是一种理想的超快激光源。然而，当前常见的被动锁模机制仍然存在着一些限制，例如克尔透镜锁模只能用于固体激光中，要求外部扰动才能启动脉冲并且准直条件苛刻，半导体可饱和吸收镜锁模(SESAMs)存在制备复杂，与光纤兼容性不高且工作带宽窄的缺点，而基于克尔效应的加成脉冲锁模对外部环境高度敏感等。因此，寻找一种新的被动锁模材料或者技术具有重要研究意义。

碳纳米管(CNTs)和石墨烯具有卓越的电学，光学，热学和机械性能，它们在电子学，光电子学，生物学以及表面化学的应用将之置于纳米科技研究中心。独特的光电性能使它们不仅具备超快响应时间以及宽带工作波长特性，还有尺寸小并且与光纤激光器兼容性高等优点，因此是一种优良的可饱和吸收体(SA)，广泛应用于锁模超快光纤激光器。作者博士期间的主要工作就是探索 CNTs 和石墨烯的非线性光学特性，并利用它们产生锁模光纤激光脉冲。主要工作及创新点包括：

在开始实现锁模激光实验之前，最重要的一步工作是探索和掌握 CNTs 及石墨烯的光学特性。为此，我们使用了四种光学手段测量它们的光学性能，包括紫外到近红外吸收谱测量，材料拉曼光谱测量，泵浦探测技术测量超快响应时间以及功率相关的非线性吸收测量。随后根据需要制备成器件集成到不同类型的光纤激光器中实现锁模脉冲。

在 CNTs 锁模光纤激光器方面：1) 结合 Haus 主振荡方程或者非线性薛定谔方程与 CNTs 的可饱和吸收模型，我们使用数值仿真研究腔内色散对 CNTs 被动锁模光纤激光器的重要影响，仿真结果指明了设计超快脉冲激光器的道路以及如何优化输出性能，并首次利用数值模型完整研究并定义 CNTs 拉伸脉冲锁模区域。2) 在数值模型的指引下，采用 CNTs 作为 SA (CNT-SA)，通过改变腔

内群速度色散使之从正色散变化到负色散区域，我们从实验上获得了基于 CNT-SA 1.5 μm 波段正色散锁模，拉伸脉冲锁模以及负色散类孤子锁模，并且实验结果与仿真结果相一致，证实了 NLSE 模型的可靠性。这是首次从仿真及实验上均实现这三种类型 CNTs 锁模激光器，弥补了以往类似研究中无法从实验上实现拉伸脉冲锁模的遗憾，而且对后面的石墨烯 SA (GSA) 及其他类型锁模技术具有重要的指导意义。

在石墨烯锁模光纤激光器方面：石墨烯具有超快的波长不相关可饱和吸收特性，而且无需对能量带隙进行特殊设计，大部分的石墨烯锁模光纤激光器是把石墨烯材料以"三明治结构"直接放入激光腔体内，即夹在两个光纤接头之间，这种结构具有较低的热损伤阈值。为了提高石墨烯热损伤阈值以及探索新的非线性特征，首次提出了沉积石墨烯的熔锥光纤(GDTF)这一新型结构，其制备过程是基于熔锥光纤倏逝波与石墨烯之间相互作用，形成一个具有更高热损伤阈值的 SA 装置，把 GDTF 装置放入激光腔内，不仅能获得锁模脉冲运转，而且使用不同腔体结构还能获得调 Q 脉冲。除此之外，GDTF 装置不仅具有卓越的可饱和吸收性能，还会通过熔锥光纤固有的滤波特性以及腔内双折射等效效应产生等效梳妆滤波效果。在这滤波器的作用下，首次成功获得了 1.03 μm 波段石墨烯多波长锁模掺 Yb 光纤激光器。

这些结果表明了 CNTs 和石墨烯作为一种灵活 SA 的能力，而且象征着它们朝着经济效益以及可取代传统器件方向迈出了重要的一步。

关键词：碳纳米管；石墨烯；可饱和吸收体；锁模光纤激光器

Abstract

Picosecond or femtosecond pulsed lasers have versatile applications in many scientific, commercial and industrial domains, such as micro-machining, femtochemistry, medical imaging and optical communications. Development of new gain media and mode-locking technologies have changed the outlook of ultrafast lasers over the past two decades, driving them to become a mature technology. One of the remaining frontiers is to make the sources compact, stability, inexpensive and more practical. Owing to the high gain, free-alignment, efficient heat dissipation and nonutility of external modulating components, passively mode-locking fiber lasers are considered as excellent ultrafast sources. Nevertheless, current mode-locking techniques still suffer from drawbacks, e.g., Kerr-lens mode-locked lasers (only can be used in solid-state lasers) usually require external perturbations in order to start and are extremely sensitive to misalignment, semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs) are complex, incompatible with fiber lasers and narrow operating bandwidth, additive pulse mode-locking caused by Kerr effect is typically sensitive to the environmental changes. These limitations motivate research on new mode-locking materials or novel designs and technologies.

Carbon nanotubes (CNTs) and graphene have remarkable electrical, optical, thermal and mechanical properties. Their possible applications in electronics, optoelectronics, biology, surface chemistry place them at the center of nanotechnology research. The special opto-electrical properties of CNTs and graphene not only make them present ultrafast dynamics and broadband operation, but also possess the advantages of small size and good compatibility with fiber lasers. Thus, they are superior saturable absorbers (SA) and widely used in mode-locking fiber lasers. The objective of my PhD was to study the optical nonlinearities of CNTs and graphene embedded in different types of fiber lasers for ultrafast pulse generation. The major works and innovations are summarized as following:

Before the initiation of mode-locking experiments, the most important step is to fully study and understand the behavior of CNTs and graphene in laser cavity. Thus, we employed four kinds of optical characterization techniques to measure the optical properties, including UV-Vis-IR absorption measurements, Raman spectroscopy, pump-probe technique to measure the ultrafast response and Power-dependent absorption measurements. Understanding and controlling at the same time the

nonlinear behavior of the SA, opens huge possibilities for the laser design. Finally, according to the requirements, the CNTs and graphene are integrated in different fiber laser configurations for the realization of mode-locking operation.

In the case of CNTs mode-locked fiber lasers: 1) Combination of the Haus's Master Equation or Nonlinear Schrödinger Equation (NLSE) and SA model of CNTs, the numerical simulations were carried out to investigate the output properties of passive mode-locking fiber lasers dependence on the total group delay dispersion (GDD). The simulating results showed us a way to design the ultrafast pulse lasers and optimize the output properties. Moreover, the stretched-pulse operation regime was first time fully studied and defined with the numerical model. 2) According to the tutorial of numerical model and employing the CNTs as fast SA, different CNT-mode-locked fiber lasers at 1.5 μm were finally achieved by changing the total GDD value from positive to negative, including normal dispersion mode-locking, stretched-pulse mode-locking and soliton-like operation. The experimental results were found to be reasonable agreement with numerical simulations, indicating the reliability of our numerical model. This is the first time to numerically and experimentally realize these three types of mode-locking operation, in particular, the realization of stretched-pulse mode-locking in experiment, which is current a blank of similar researches. The research can offer a great help for graphene-based SA (GSA) mode-locking or other mode-locking techniques.

In the case of graphene mode-locking fiber lasers: Graphene has ultrafast, wavelength independent saturable absorption properties, with no need for band gap engineering. The traditional GSA used in the most mode-locked fiber lasers is embedded into the laser cavity with 'sandwich' structure, i.e. placed between two fiber connectors, which presents low thermal damage threshold. In order to improve the thermal damage threshold and study new nonlinear properties, a new structure named 'graphene-deposited tapered fiber (GDTF)' has been proposed for the first time. The fabrication process is based on the interaction of the evanescent field of a tapered fiber with graphene solution. Employing the GDTF as SA in laser cavity, we obtained the reliably Q-switched and mode-locked operation with different cavity structures. However, the GDTF device is not only acts as an excellent SA for mode locking, but also induces a comb-like spectral filter due to the intrinsic comb-like spectral filter of tapered fiber and other effects (such as birefringence). Finally, based

on the spectral filter effect, multiwavelength mode-locking Yb-doped fiber laser was achieved at 1.03 μm for the first time.

These results highlight the flexible SA capability offered by CNTs and in particular graphene and represent major step forward in their implementation as a cost-effective and viable alternative to traditional devices.

Keywords: Carbon nanotubes; Graphene; Saturable absorbers; Mode-locked fiber lasers.

厦门大学博硕士论文摘要库

目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
图片目录	X
缩略词表	XIII
第一章 绪论	1
1.1 综述	1
1.1.1 CNTs 锁模研究现状	3
1.1.2 石墨烯锁模研究现状.....	5
1.2 研究意义及论文安排	7
第二章 超快脉冲产生机制	10
2.1 介绍	10
2.2 调 Q	11
2.2.1 主动调 Q.....	12
2.2.2 被动调 Q.....	13
2.3 锁模	14
2.3.1 主动锁模.....	15
2.3.2 被动锁模.....	17
2.4 可饱和吸收技术：自幅度调制	19
2.4.1 可饱和吸收体(SA).....	20
2.4.2 基于光学克尔效应的等效 SA	24
2.4.2.1 加成脉冲锁模	25
2.4.2.2 克尔透镜锁模	26
2.4.3 当前常用技术的限制.....	27
2.5 结论	28
第三章 石墨烯及 CNTs 光学性能研究	29
3.1 介绍	29
3.2 石墨烯及 CNTs 的制备及物理性质	30
3.2.1 石墨烯及 CNTs 的制备方法	30
3.2.2 石墨烯的电学和光学特性.....	33
3.2.3 CNTs 的电学和光学特性	35
3.2.4 石墨烯和 CNTs 的非线性光学特性	39
3.3 石墨烯及 CNTs 光学性能测量	40
3.3.1 光学吸收谱测量.....	43

3.3.2 拉曼光谱分析.....	45
3.3.3 超快恢复时间测量.....	47
3.3.4 功率相关透过率测量.....	51
3.4 CNTs 和石墨烯集成 SA 器件.....	53
3.5 总结	55
第四章 数值和实验分析 CNTs 锁模光纤激光器	57
4.1 介绍	57
4.2 CNTs 被动锁模光纤激光器理论分析及数值仿真	60
4.2.1 Haus 主振荡方程理论分析	61
4.2.2 数值仿真.....	64
4.3 CNTs 被动锁模掺 Er ³⁺ 光纤激光器实验结果	72
4.3.1 实验装置.....	72
4.3.2 实验结果及分析.....	74
4.4 总结	78
第五章 石墨烯锁模光纤激光器	79
5.1 介绍	79
5.2 倏逝波光学沉积制备 GSA	80
5.3 掺 Er ³⁺ 调 Q 及锁模光纤激光器	84
5.3.1 调 Q 实验结果.....	85
5.3.2 锁模实验结果.....	88
5.3.3 分析及讨论.....	90
5.4 掺 Yb ³⁺ 多波长锁模光纤激光器.....	91
5.4.1 实验原理及装置.....	91
5.4.2 实验结果及讨论.....	93
5.5 总结	96
第六章 总结与展望	97
6.1 总结	97
6.2 未来展望	98
参考文献	101
攻读博士学位期间发表的论文	119
致谢.....	121

Contents

Abstract in Chinese	I
Abstract in English	III
List of figures	X
Acronyms	XIII
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Overview	1
1.1.1 Reviews of CNTs mode-locked fiber lasers	3
1.1.2 Reviews of graphene mode-locked fiber lasers	5
1.2 Objectives and outline of this thesis	7
Chapter 2 Ultrafast pulse generation	10
2.1 Introduction	10
2.2 Q-switching	11
2.2.1 Active Q-switching	12
2.2.2 Passive Q-switching.....	13
2.3 Mode-locking	14
2.3.1 Active mode-locking.....	15
2.3.2 Passive mode-locking	17
2.4 Saturable absorption technology: Self-amplitude modulation	19
2.4.1 Saturable absorber.....	20
2.4.2 Effective SA using the Kerr effect.....	24
2.4.2.1 Additive pulse mode-locking.....	25
2.4.2.2 Kerr lens mode-locking	26
2.4.3 Limitations of current technologies	27
2.5 Conclusions	28
Chapter 3 Studies on optical properties of graphene and CNTs	29
3.1 Introduction	29
3.2 The growth and physical properties of graphene and CNTs	30
3.2.1 The growth of graphene and CNTs.....	30
3.2.2 Electrical and optical properties of Graphene.....	33
3.2.3 Electrical and optical properties of CNTs.....	35
3.2.4 Nonlinear optical properties of graphene and CNTs	39
3.3 Optical characterization of graphene and CNTs	40

3.3.1 Measurements of UV-Vis-IR absorption	43
3.3.2 Raman spectroscopy	45
3.3.3 Characterizations of ultrafast response time	47
3.3.4 Measurements of power-dependent transmittance.....	51
3.4 Integration of Graphene and CNTs as SA.....	53
3.5 Conclusions.....	55
Chapter 4 Numerically and experimentally studies on CNTs mode-locked fiber lasers	57
4.1 Introduction.....	57
4.2 Theoretically and numerically studies on CNTs mode-locked fiber lasers	60
4.2.1 Haus's master equation.....	61
4.2.2 Numerical simulations	64
4.3 Experimental results of CNTs mode-locked Er ³⁺ -doped fiber lasers.....	72
4.3.1 Experimental setup.....	72
4.3.2 Experimental results and discussion	74
4.4 Conclusions.....	78
Chapter 5 Graphene mode-locked fiber lasers	79
5.1 Introduction.....	79
5.2 Fabrication of GSA based on evanescent field deposition	80
5.3 Q-switched and mode-locked Er ³⁺ -doped fiber lasers	84
5.3.1 Results of Q-switched experiments	85
5.3.2 Results of mode-locked experiments	88
5.3.3 Discussion	90
5.4 Multi-wavelength mode-locked Yb ³⁺ -doped fiber lasers.....	91
5.4.1 Experimental principle and setup.....	91
5.4.2 Experimental results and discussion	93
5.5 Conclusions.....	96
Chapter 6 Conclusions and future works.....	97
6.1 Conclusions.....	97
6.2 Future works	98
References	101
Publications	119
Acknowledgement.....	121

图片目录

图 2.1 增益、损耗及脉冲在时域上的动态变化过程, (a)主动调 Q 激光器; (b)被动调 Q 激光器	12
图 2.2 四个纵模在(a)相位未锁定 及(b)相位锁定下叠加后输出光强度; 锁模脉冲在(c)时域及(d)频域的表现形式	15
图 2.3 锁模过程示意图: (a)含有增益介质及损耗调制器件的典型锁模激光腔; (b)主动锁模技术; (c)被动锁模技术。引用自文献[3].....	16
图 2.4 被动锁模机制的三种模型: (a)慢 SA 结合动态增益模型; (b)快 SA 模型; (c)慢 SA 孤子锁模或皮秒脉冲锁模模型	18
图 2.5 (a)典型的半导体材料泵浦探测响应曲线; (b)典型的 SA 非线性响应曲线	20
图 2.6 典型的 SESAM 结构示意图.....	23
图 2.7 对于 $n_2 > 0$, 克尔效应导致折射率随着光强度增加而变大, 造成脉冲中心高强度部分产生延迟, 纵向效应对应着自相位调制, 横向部分则对应克尔透镜。参考自文献[228].....	24
图 2.8 (a)典型 NALM 锁模示意图; (b)典型 NPR 旋转锁模示意图	26
图 2.9 基于非线性介质横向克尔效应的克尔透镜锁模原理, 由克尔效应引起折射率变化形成克尔透镜, 对比低强度光, 高强度光具有更强聚焦作用, 能有效降低光斑尺寸, 穿过孔径后损耗更小, 是一种等效的快速 SA。参考自文献[3]	27
图 3.1 不同维度碳材料的形式。二维石墨烯是其他维材料形成的基本单元, 可以形成零维富勒烯, 一维 CNT 及三维石墨。参考自文献[20].....	29
图 3.2 石墨烯能带结构示意图, (a)紧束缚近似下的能量分布; (b)狄拉克点附近的狄拉克锥; (c)费米能级附近的态密度分布	33
图 3.3 从石墨烯切割卷曲形成具有手性矢量 C_h 的 CNT 示意图	35
图 3.4 (a)金属性 CNT 能带结构; (b)半导体性 CNT 能带结构; (c)金属性 CNT 态密度分布; (d)半导体性 CNT 态密度分布	36
图 3.5 体现手性分布的半导体性 CNTs 光致发光 PL 谱, 参考自文献[253].....	38

图 3.6 (a)和(b)石墨烯; (c)和(d) CNTs 光学吸收及饱和特性示意图.....	40
图 3.7 (a)石墨烯或者 CNTs 水溶液样品; (b)含有石墨烯或者 CNTs 的聚合物复合材料样品.....	42
图 3.8 (a) LA-CNTs 吸收谱; (b) LPE 石墨烯吸收谱	44
图 3.9 LA-CNTs 的拉曼光谱	46
图 3.10 LPE 石墨烯拉曼光谱.....	47
图 3.11 CNTs 的泵浦探测测量, (a)非共线简并泵浦探测实验装置图; (b)快速响应曲线; (c)受激载流子的弛豫过程	48
图 3.12 石墨烯的泵浦探测测量, (a)非简并共线泵浦探测实验装置图; (b)快速响应曲线; (c)受激载流子的弛豫过程	50
图 3.13 石墨烯或 CNTs 非线性透射率测量实验装置图, DCF 表示色散补偿光纤	52
图 3.14 (a)LA-CNTs , (b)LPE 石墨烯的透过率与入射光脉冲能量密度关系图 ..	52
图 3.15 基于 CNTs 或者石墨烯 SA 器件不同的制备方法, (a)光全部穿透作用; (b)光倏逝波作用; (c)镶嵌在光纤或者波导内部	54
图 4.1 脉冲在不同色散值的介质中传输引起的变化, β_2 指群速度色散参数	58
图 4.2 用于仿真的环形 EDFL 腔体结构示意图.....	65
图 4.3 不同 GDD 下脉冲形成过程, 总色散为(a) 0.011; (b)~0; (c) -0.0105 ps ² ..	66
图 4.4 不同 GDD 下锁模脉冲输出特性, (a)和(b)表示啁啾脉冲的频域和时域特性; (c)和(d)表示去啁啾后脉冲频域和时域特性	67
图 4.5 稳定状态下不同 GDD 输出脉冲时域与频谱的详细分布图	69
图 4.6 稳定状态下腔内脉冲演化过程.....	70
图 4.7 在腔内不同位置处脉冲 FWHM 随着腔长或总色散值演变过程	70
图 4.8 腔内脉冲压缩比和腔内最小脉冲宽度与总色散值之间的关系.....	72
图 4.9 CNTs 锁模光纤激光器实验装置图	73
图 4.10 零色散拉伸脉冲锁模特征, (a)输出光谱图; (b)脉冲 SHG 自相关曲线; (c)示波器脉冲序列图; (d)脉冲基阶 RF 频谱	74
图 4.11 (a)归一化边带功率谱密度与谐波中心峰值偏置频率的关系; (b)归一化边带功率谱积分与谐波次数的关系.....	76

图 4.12 不同总色散值腔体输出锁模激光的特征, (a)输出光谱图; (b)压缩后的脉冲自相关曲线.....	77
图 5.1 制备熔锥光纤的实验装置.....	81
图 5.2 (a) 熔锥光纤沉积石墨烯的实验装置; (b)基于石墨烯溶液与倏逝波相互作用产生的光学沉积示意图.....	82
图 5.3 (a) 3.2 μm GDTF 的光学显微镜图; 熔锥光纤沉积石墨烯之前(a)及之后(c)注入 635 nm 可见光激光的光学显微镜图.....	83
图 5.4 GDTF 归一化透过率与沉积时间在(a)不同沉积功率以及(b)不同锥腰直径下的关系图.....	84
图 5.5 3.2 μm GDTF 被动调 Q 光纤激光器的示意图	85
图 5.6 在不同泵浦功率下(a) 13.5, (b) 35, (c) 69.4, (d) 73.7 mW 的调 Q 脉冲序列	86
图 5.7 (a)调 Q 输出光谱; (b)调 Q 单脉冲的形状; (c)脉冲宽度和重复频率与泵浦功率的关系; (d)单脉冲能量和平均输出功率与泵浦功率的关系.....	87
图 5.8 半小时内每隔三分钟记录的调 Q 脉冲 RF 频谱	88
图 5.9 4.3 μm GDTF 被动锁模 EDFL 实验装置示意图	88
图 5.10 锁模输出特征, (a) 输出光谱; (b)示波器上锁模脉冲序列; (c) 锁模脉冲基次谐波 RF 频谱, $f_1 = 3.33 \text{ MHz}$; (d)脉冲干涉自相关曲线	89
图 5.11 (a)多波长锁模 YDFL 的实验装置结构图; (b)熔锥光纤内在的梳妆滤波特性; (c)人为构建的 Lyot 滤波器在有石墨烯和无石墨烯条件下的梳妆滤波特性	92
图 5.12 对比非孤子锁模与耗散孤子锁模的不同输出特征, (a)非孤子锁模的输出光谱; (b)非孤子锁模中 1038 nm 波长的示波器脉冲序列; (c)三波长耗散孤子锁模的输出光谱; (d)耗散孤子锁模中 1038 nm 波长的示波器脉冲序列, 内嵌图: 三波长耗散孤子的瞬时脉冲序列.....	94
图 5.13 (a)锁模脉冲基阶 RF 频谱, $f_1 = 551.5 \text{ kHz}$; (b) 高阶宽带 RF 频谱	95
图 5.14 脉冲干涉自相关曲线及高斯曲线拟合.....	95

缩略词表

AM	Amplitude modulation	幅度调制
AOM	Acousto-optic modulator	声光调制器
APM	Additive pulse mode-locking	加成脉冲锁模
ASE	Amplified spontaneous emission	自发辐射放大
BDF	Bismuth-doped fiber	掺铋光纤
BOC	Balanced optical cross-correlator	平衡光学交叉相干法
CMC	Carboxymethylcellulose	羧甲基纤维素
CNT(s)	Carbon nanotube(s)	碳纳米管
CVD	Chemical vapor deposition	化学气相沉积
CW	Continuous wave	连续波
DCF	Dispersion compensation fiber	色散补偿光纤
DOS	Density of states	态密度
DWCNTs	Double-wall carbon nanotubes	多壁碳纳米管
EDF	Erbium-doped fiber	掺铒光纤
EDFL	Erbium-doped fiber laser	掺铒光纤激光器
EOM	Electro-optic modulator	电光调制器
FBG	Fiber Bragg grating	光纤布拉格光栅
FCA	Free carrier absorption	自由离子吸收
FET	Field-effect transistor	场效应晶体管
FM	Frequency modulation	频率调制
FSR	Free spectral range	自由频谱范围
FWHM	Full width at half maximum	半高宽
GDD	Group delay dispersion	群延时色散
GDTF	Graphene-deposited tapered fiber	熔锥光纤沉积锁模
GO	Graphene oxide	氧化石墨烯
GSA	Graphene-based saturable absorber	石墨烯可饱和吸收体
GVD	Group velocity dispersion	群速度色散

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库