

学校编码: 10384  
学号: 23120091152697

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_  
UDC\_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于石墨烯饱和吸收体的掺镱光纤  
脉冲激光器

Yb-doped Pulsed Fiber Lasers Based on Graphene  
Saturable Absorber

张成

指导教师姓名: 蔡志平

专 业 名 称: 光学工程

论文提交日期: 2012 年 月

论文答辩时间: 2012 年 月

学位授予日期: 2012 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2012 年 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 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

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 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

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 摘要

光纤激光器技术是光电子学领域最为重要的技术之一，在光纤传感、光纤通信、工业加工等领域都有着重要的应用。本文主要研究了以石墨烯作为饱和吸收体的被动调 Q 和被动锁模光纤激光器技术。

首先简单介绍了光纤激光器的发展历史和脉冲光纤激光器的种类，总结了几种典型光纤脉冲激光器的研究进展和发展趋势。

然后以调 Q 技术和锁模技术的理论为基础，应用激光器的速率方程理论，对石墨烯作为可饱和吸收体的调 Q 光纤激光器进行了数值理论分析。同时从实验方面对基于石墨烯饱和吸收体的掺镱调 Q 光纤激光器进行研究。我们利用石墨烯的可饱和吸收特性和四波混频机制，实现了  $1\ \mu\text{m}$  波段稳定运行的多波长调 Q 掺镱光纤激光器。调 Q 脉冲重复频率 45 KHz，脉冲宽度为 3.3  $\mu\text{s}$ 。在泵浦功率为 215 mW 时，平均输出功率为 0.58 mW，折算成单脉冲能量为 10.3 nJ。

最后研究了基于熔锥光纤倏逝场作用下的石墨烯锁模掺镱光纤激光器。利用熔锥光纤石墨烯饱和吸收体实现了  $1\ \mu\text{m}$  波段的双波长锁模掺镱光纤激光器。采用光学诱导沉积法，将水溶液中的石墨烯纳米复合物在光倏逝场的作用下沉积至熔锥光纤的锥腰部位。该石墨烯熔锥光纤器件作为可饱和吸收锁模部件具有制作灵活、全光纤结构以及高损伤阈值等优点。基于该器件的可饱和吸收及腔内双折射滤波特性，通过调节偏振控制器优化激光腔内偏振特性，我们实现了稳定的 YDFL 双波长锁模。该激光器的两个锁模波长分别为 1034.77 nm 和 1038.85 nm，二次谐波锁模重复频率为 1.09 MHz，腔内单脉冲能量最大可达 35 nJ。

本文以实验研究为主、理论研究为辅，侧重用石墨烯作为饱和吸收体来实现被动调 Q 和被动锁模光纤激光器功能及其技术方案。对进一步发展基于可饱和吸收体的脉冲激光器技术和推进石墨烯在光电子技术领域的应用具有重要意义。

**关键词：** 光纤激光器；石墨烯；调 Q；锁模；

厦门大学博硕士学位论文摘要库



## ABSTRACT

Fiber laser technology is one of the most important technologies in the field of optoelectronics. It has important applications in fiber optic sensing, fiber optic communications, industrial processing or other fields. We mainly studies passively Q-switched and mode-locked fiber laser using graphene as a saturable absorber.

Firstly, we introduce and the types and the history of development of fiber pulse lasers, and summarize the progress and development trend of several typical optical fiber pulse laser.

Then using the theory of Q-switched and mode-locking technology and the laser rate equation, we carry out numerical analysis of Q-switched fiber laser, and also experiment on ytterbium-doped Q-switched fiber laser based on graphene saturated absorber. We used saturable absorber characteristic and four-wave-mixing mechanism of graphene to achieve a multi-wavelength stable operation Q-switched Yb-doped fiber laser at 1  $\mu\text{m}$ -band. The Q-switched repetition rate is 45 KHz, and the pulse width is 3.3  $\mu\text{s}$ . The output average power is 0.58 mW at the pump power of 215 mW, corresponding to the pulse energe of 10.3 nJ.

Finally, a dual-wavelength passively mode-locked Yb-doped fiber laser (YDFL) based on the interaction of graphene and fiber-taper evanescent field is reported. Using optical evanescent-light deposition technique, graphene-polymer nanocomposites in aqueous suspension are coated onto taper waist region. The graphene-based tapered-fiber as a saturable absorber can possess the advantages of flexibility, all-fiber configuration and high optical damage threshold. Based on the saturable absorption of this graphene-based component and the cavity-birefringent filtering characteristics, we obtained the stable dual-wavelength mode-locked operation, by properly adjusting the polarization state of the laser cavity. The two mode-locked wavelengths of this laser are 1034.77 nm and 1038.85 nm, the mode-locked repetition rate is 1.09 MHz at the second harmonic frequency, and the intracavity pulse energy can be as high as 35nJ.

In this paper, both the experimental research and theoretical analysis have been carried out to realize passively Q-switched and passively mode-locked fiber lasers based on graphene saturable absorber. It is useful and of great significance to the further development of pulsed laser technology based on the saturable absorber and the application of graphene in the field of photonics technology.

**Key Word:** Fiber Laser; Graphene; Q-switched; Mode Locked

厦门大学博硕士学位论文摘要库

# 目 录

摘 要 .....	I
ABSTRACT .....	III
<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 光纤激光器 .....	1
1.1.1 光纤激光器的发展与研究意义 .....	1
1.1.2 光纤激光器的分类 .....	3
1.2 脉冲光纤激光器 .....	3
1.2.1 调 Q 光纤激光器的种类 .....	3
1.2.2 锁模光纤激光器的种类 .....	6
1.2.3 研究光纤脉冲激光器的目的和意义 .....	10
1.3 石墨烯在光电子领域的应用 .....	11
1.3.1 石墨烯的应用 .....	11
1.3.2 石墨烯在脉冲激光器领域的成果 .....	16
1.4 本文的主要工作 .....	17
<b>第 2 章 脉冲光纤激光器的基本理论</b> .....	19
2.1 Yb <sup>3+</sup> 离子的能级结构和光谱特性 .....	19
2.2 调 Q 的基本原理 .....	23
2.3 调 Q 激光器的速率方程 .....	25
2.3.1 速率方程的建立 .....	25
2.3.2 速率方程的解 .....	27
2.3.3 被动调 Q 速率方程 .....	29
2.4 基于石墨烯调 Q 掺镜光纤激光器的数值仿真 .....	30
2.4.1 仿真参数 .....	30
2.4.2 结果与分析 .....	32
2.5 锁模激光器的基本原理与锁模机制 .....	39
2.6 本章小结 .....	40
<b>第 3 章 基于石墨烯的多波长调 Q 掺镜光纤激光器</b> .....	41
3.1 石墨烯饱和吸收体的制备 .....	41
3.2 调 Q 实验的建立 .....	44
3.3 实验结论与数据分析 .....	45
3.4 本章小结 .....	50
<b>第 4 章 熔锥光纤倏逝场作用石墨烯锁模掺镜光纤激光器</b> .....	51
4.1 熔锥光纤石墨烯器件的制作 .....	51
4.2 实验的建立 .....	53
4.3 实验结果与讨论 .....	54
4.4 本章小结 .....	58

第 5 章 总结与展望.....	60
5.1 总结.....	60
5.2 展望.....	61
参考文献.....	63
攻读硕士学位期间获得的研究成果.....	71
致 谢.....	72

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## Contents

<b>Chinese Abstract</b> .....	I
<b>English Abstract</b> .....	III
<b>Chapter1 General Review</b> .....	1
<b>1.1 Fiber Lasers</b> .....	1
1.1.1 Development and Research Significance of Fiber Laser .....	1
1.1.2 Types of Fiber Lasers .....	3
<b>1.2 Pulsed Fiber Lasers</b> .....	3
1.2.1 Types of Q-switched Fiber Lasers .....	3
1.2.2 Types of Mode Locked Fiber Lasers .....	6
1.2.3 Purpose and Significance of Pulsed Fiber Lasers .....	10
<b>1.3 Application of graphene</b> .....	11
1.3.1 Application .....	11
1.3.2 Development Status .....	16
<b>1.4 Contents of the thesis</b> .....	17
<b>Chapter2 Theory of Pulsed Fiber Lasers</b> .....	19
<b>2.1 Energy Level and Spectral Characteristics of Yb<sup>3+</sup></b> .....	19
<b>2.2 Theory of Q-switched</b> .....	23
<b>2.3 Rate Equation of Q-switched Lasers</b> .....	25
2.3.1 Establishment of Rate Equation .....	25
2.3.2 Solution of Rate Equation .....	27
2.3.3 Rate Equation of Passively Q-switched .....	29
<b>2.4 Numerical Simulation of Q-switched Fiber Lasers</b> .....	30
2.4.1 Simulation Parameters .....	30
2.4.2 Simulation Results and Analysis .....	32
<b>2.5 Theory of Mode Locking</b> .....	39
<b>2.6 Summary</b> .....	40
<b>Chapter3 Yb-Doped Q-switched Fiber Lasers Based on Graphene</b> .....	41
<b>3.1 Preparation of Graphene Saturable Absorber</b> .....	41
<b>3.2 Experiment of Q-switched</b> .....	44
<b>3.3 Experiment Results and Data Analysis</b> .....	45
<b>3.4 Summary</b> .....	50
<b>Chapter4 Yb-doped Mode-Locked Fiber Lasers Based on the</b> <b>Interaction of Graphene and Fiber-Taper Evanescent Field</b> .....	51
<b>4.1 Fabrication of graphene-based tapered-fibers</b> .....	51
<b>4.2 Experiment</b> .....	53

4.3 Results and discussion .....	54
4.4 Summary .....	58
<b>Chapter5 Summary and Expectation.....</b>	<b>60</b>
5.1 Summary .....	60
5.2 Expectation .....	61
<b>References.....</b>	<b>63</b>
<b>Published Papers.....</b>	<b>71</b>
<b>Acknowledgements .....</b>	<b>72</b>

厦门大学博硕士学位论文摘要

# 第1章 绪论

## 1.1 光纤激光器

光纤激光器是以掺杂光纤作为增益介质,或者利用光纤本身的非线性效应而形成的一类激光器,属于新型的高性能固体激光器。作为第三代激光技术的代表,光纤激光器被称作 21 世纪初最伟大的发明之一,在各个领域都有着重要的应用。

### 1.1.1 光纤激光器的发展与研究意义

光纤激光器一直是光电子技术领域最前沿的研究热点之一。稀土掺杂的光纤激光器研究最早始于 20 世纪 60 年代。1961 年, Snitzer 研制出了第一台光纤激光器,当时使用了闪光灯泵浦芯径为  $300\ \mu\text{m}$  的掺钕光纤,产生了波长为  $1.06\ \mu\text{m}$  的激光<sup>[1]</sup>。但由于当时光纤传输的损耗很高,而且没有性能优异的半导体激光器作为泵源,光纤激光器在很长的时间内都没得到太大的发展。

1966 年,高锟博士详细阐述了光纤中光衰减的主要原因,并明确指出了光通信在实际使用中应当解决的主要问题<sup>[2]</sup>。随后,这个难题由 Corning 公司在 1971 年解决,发明了衰减小于  $20\text{dB/km}$  的光纤<sup>[3]</sup>。1973 年,又研制出了半导体激光器泵浦的光纤激光器<sup>[4][5]</sup>。1975~1985 这十年间,许多发展光纤激光器所必须的工艺技术趋于成熟,低损耗的硅单模光纤和半导体激光器都已商品化,基于硅光纤的定向耦合器的制作也得到完善。这些都为光纤激光器的研制铺平了道路。

在 20 世纪 80 年代,稀土离子掺杂光纤拉制技术、掺铒光纤放大器以及相关光纤器件制作技术逐渐成熟。1987 年,美国的 Bell 实验室和英国南安普顿大学几乎同时在掺铒 ( $\text{Er}^{3+}$ ) 光纤激光器上面取得了重大突破<sup>[6][7]</sup>,实现了对光信号的直接光学放大,使长距离通信成为可能。南安普顿大学用 MCVD 法制作单模光纤实现了激光器的运行,并报道了光纤激光器的调 Q、锁模、单纵模输出方面的研究工作,使得光纤激光器更具有实用性。20 世纪 90 年代,光纤光栅技术开始得到发展<sup>[8]</sup>,在光纤通信、光纤传感等领域中得到重要应用,并促进了单频光纤激光器的发展。1996 年之后出现了光子晶体光纤、拉锥光纤等新型光纤,由

于具有特殊的色散和非线性特性，可用于光纤色散补偿和非线性效应的产生<sup>[9]</sup><sup>[10]</sup>。这些技术与工艺的进步都为光通信行业和光纤激光器的发展奠定了基础。

由于光纤激光器的诸多优点，其应用日益广泛，主要集中在光纤通信和光纤传感两大领域。光纤激光器是光纤通信系统中一种很有前景的光源，他的优点主要体现在：

(1) 可以用与稀土离子吸收光谱相对应的短波长半导体激光二极管作为泵浦源，成本较低。

(2) 光纤激光器的圆柱形几何尺寸容易耦合到系统的传输光纤中。

(3) 光纤结构具有较高的面积/体积比，散热效果较好。

(4) 光纤激光器可以通过掺杂不同稀土离子，在 380~3900nm 的带宽范围内实现激光输出，波长选择容易且可调谐。

(5) 光纤激光器和光纤放大器与现有的光纤器件完全相容，故可以制作出全光纤传输系统。

在光通信系统中，普通以半导体激光器作为光源，但是当激光被耦合进入光纤时，总是存在着耦合损耗的问题。光纤激光器则解决了这一难题，因为光纤到光纤的耦合不仅损耗低、效率高，而且非常稳定。尤其是耦合点被熔接以后，效果更好。另外光纤激光器经过优化设计之后，可以实现单纵模连续输出，波长在 50 nm 范围内可调谐并保持 10 kHz 的线宽，而半导体激光器的线宽远大于 0.1 MHz，因此，光纤激光器具有更高的波长精度控制性，更适用于多通道通信系统。锁模光纤激光器可以输出重复频率为 10 GHz，脉宽为 100 fs 的超短光脉冲，可以用于孤子通信系统。由光纤激光器发射的孤子在无滤波和其他控制装置的情况下能够以 2.5 Gb/s 的速率传输 17600 km<sup>[11]</sup>。

光纤激光器还可以应用在光传感领域<sup>[12][13]</sup>。一般情况下，光纤激光器以连续波方式运转，并以 Bragg 光纤光栅作为激光谐振腔的反射镜，因此它的工作波长是由光纤光栅的反射波长来决定的，而光纤光栅的反射波长会随外界的温度和应力的变化而变化。因此利用光纤激光器可以实现对温度、应力、应变、场强、电流等物理量的传感测量。

此外由于光纤激光器结构小巧、紧凑，对温度与震动的稳定性好，尤其是包层泵浦技术的发展，大大促进了大功率光纤激光器的发展，因此还可以应用与国



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](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

廈門大學博碩士論文摘要庫