

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 23120141153090

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

橙光 Bi_2Se_3 被动调 Q Pr:ZBLAN

全光纤脉冲激光器理论与实验研究

Theoretical and experimental investigations on Bi_2Se_3 -based
orange passively Q-switched Pr:ZBLAN all-fiber pulse lasers

林辉育

指导教师姓名: 蔡志平

专 业 名 称: 光学工程

论文提交日期: 2017 年 4 月

论文答辩时间: 2017 年 5 月

学位授予日期: 2017 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2017 年 5 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

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

可见光脉冲激光器在远距离探测、医疗和通信领域有着重要的应用。相比非线性倍频方法得到可见光，利用掺杂稀土离子光纤激射可见光，具有结构紧凑、简单和高效的优点。 Pr^{3+} 离子是唯一在室温下可激射多种可见光波长的稀土离子。可见光波段在普通石英光纤中有较大的传输损耗，而 ZBLAN 光纤因为声子能量很低，仅为 580cm^{-1} ，且在可见光波段传输损耗小 ($<0.1\text{dB/m}$)，使得掺 Pr^{3+} ZBLAN 光纤成为可见光激光器的绝佳增益介质。

被动调 Q 相比于主动调 Q 减少了非光学器件的引入，更易与光纤激光器相结合。近年来石墨烯的出现，开启了二维材料在超短脉冲领域的研究热潮。拓扑绝缘体 (Bi_2Se_3) 凭借其调制深度大，宽带可饱和吸收特性，成本低廉等优点，已经被广泛应用于调 Q/锁模激光器的研究工作。而基于拓扑绝缘体的被动调 Q 激光器激射波长主要集中在 1-和 2- μm 波长，本文正是基于以上背景，开展可见光 604nm Bi_2Se_3 被动调 Q Pr:ZBLAN 全光纤激光器的理论与实验研究工作，主要的内容和创新点总结如下：

1、橙光 Bi_2Se_3 被动调 Q 光纤激光器的数值仿真。通过被动调 Q 激光器的基本原理和速率方程的推导，在结合实验参数、增益介质 Pr:ZBLAN 光纤以及拓扑绝缘体 (Bi_2Se_3) 材料特性的基础上，利用 Runge-Kutta 法数值解析得到被动调 Q 激光器的特性和基本规律。被动调 Q 激光器腔内光子数密度、增益介质反转粒子数密度和可饱和吸收体基态粒子数密度在数值上有 1:1:1 的关系。调 Q 脉冲重复频率与泵浦效率成正比，与可饱和吸收体调制深度成反比关系；脉冲宽度随可饱和吸收体调制深度增加而降低。数值仿真为后续实验做理论基础和指导。

2、实现掺 Pr^{3+} ZBLAN 被动调 Q 激光器的全光纤结构。光纤端面经过金刚石抛光纸抛光之后，使用等离子磁控溅射仪进行镀制介质薄膜，最终得到对于泵浦光高透且对 604nm 橙光高反 (78.22% @444nm, 2.65% @604nm) 的输入镜，以及对激射橙光有一定比例输出 (65.54% @444nm, 7.2% @604nm) 的输出镜。两者共同构成全光纤可见光激光器的谐振腔，有效的保留了光纤激光器紧凑、高效的特性。

3、实现拓扑绝缘体 (Bi_2Se_3) 在可见光波段最短波长 (604nm) 的调 Q 脉冲输出, 从实验上充分证明 Bi_2Se_3 宽带可饱和吸收特性。以连续橙光激光器为基础, 在谐振腔中依照“三明治结构”插入可饱和吸收体, 最终得到 604nm Bi_2Se_3 Pr:ZBLAN 全光纤脉冲激光器。激光器调 Q 阈值 253.0mW, 可饱和吸收体的插入损耗为 1.76dB, 脉冲宽度 748ns-494ns, 脉冲重复频率 86.2kHz-187.4kHz, 信噪比达到 40dB。据我们所知, 这是最短波长的 Bi_2Se_3 被动调 Q 全光纤激光器。

关键词: Pr:ZBLAN 光纤; 可见光激光器; 被动调 Q; 拓扑绝缘体 (Bi_2Se_3);

Abstract

Visible pulse lasers play an important role in remote sensing, medicine, and communications. Compared to second-harmonic visible lasers, rare-earth-doped visible fiber lasers offer compact construction, are maintenance-free, and have high efficiency. Pr^{3+} is the only rare earth ion that emit multi-wavelength in visible range at room temperature. Furthermore, ZBLAN ($\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$) fiber possesses low phonon energy (580 cm^{-1}) and low transmission loss ($<0.1\text{ dB/m}$) in visible regions. Hence, Pr^{3+} -doped ZBLAN fiber has been considered as excellent gain medium for visible fiber lasers.

Passively Q-switching is more likely to be combined with fiber lasers than actively one as it without introducing non-optical device. Recently, two-dimensional materials have attracted great attention in the area of passively Q-switching fiber laser. Like graphene, topological insulator (Bi_2Se_3) possesses large modulation depth, ultrabroad wavelength saturable absorption range and low cost, and has been widely used as saturable absorber (SA) in the research of ultra-short pulse including Q-switching and mode-locking. In the past few years, several research works proposed that Bi_2Se_3 was suit for pulsed fiber laser operation and showed a broadband saturable absorption. Base on the investigation above, we numerically simulate the dynamic evolution process of Q-switched pulses in the laser cavity, and experimentally demonstrated a compact Bi_2Se_3 -based orange passively Q-switched all-fiber laser at 604 nm. The main contents and innovations are as follows:

1. Numerical simulation of Bi_2Se_3 -based orange passively Q-switched fiber laser was developed. Principle of Q-switching and rate equation is the base of simulation, and Runge-Kutta method is used to unfold the equation. The density of photon number in the cavity, inverted population density of gain medium and ground state particles of SA have a ratio relationship of 1:1:1. Q-switched pulse frequency is proportional to the pump rate, while inversely proportional to the modulation depth of

SA. The pulse duration decreases with the increase of the modulation depth of SA. Theoretical analysis could support the experimental research.

2. Achieving the all-fiber structure with the help of two dielectric mirrors which were prepared after fiber end face was solved using manual fiber polishing technique. The compact laser resonant cavity consists of two dielectric films. One was an input mirror with a high-transmittance of 78.22% at the pump wavelength of 444 nm and a high reflectivity of 97.35% at the laser wavelength of 604 nm. The other was an output mirror with a transmittance of 7.2% at 604 nm.

3. A simple passively Q-switched praseodymium-doped all-fiber laser at visible wavelength of 604 nm was experimentally demonstrated. The repetition rate of the achieved 604 nm Q-switching pulse can be widely tuned from 86.6 to 187.4 kHz, the pulse duration can be as narrow as 494 ns, and a signal noise rate of ~ 40 dB. To the best of our knowledge, this is the shortest operation wavelength of a Bi₂Se₃-based pulsed all-fiber laser at 604 nm.

Keywords: Pr:ZBLAN fiber; Visible lasers; Passively Q-switching; Topological insulator (Bi₂Se₃);

目 录

摘 要	I
Abstract.....	III
第一章 绪论	1
1.1 前言	1
1.2 被动调 Q 激光器介绍	3
1.3 基于拓扑绝缘体被动调 Q 掺镨光纤激光器的背景介绍	7
1.4 本章小结	10
第二章 Pr:ZBLAN 光纤及 Bi ₂ Se ₃ 基本理论.....	11
2.1 Pr ³⁺ 离子能级结构	11
2.2 Bi ₂ Se ₃ 可饱和吸收原理及光学性质	15
2.2.1 Bi ₂ Se ₃ 结构及可饱和吸收原理	15
2.2.2 Bi ₂ Se ₃ 薄膜光学性质	17
2.3 Bi ₂ Se ₃ 的制备方法	19
2.4 本章小结	22
第三章 被动调 Q 激光器基本原理及数值仿真.....	23
3.1 被动调 Q 激光器的基本原理与速率方程	23
3.1.1 被动调 Q 激光器的基本原理.....	23
3.1.2 被动调 Q 激光器的速率方程.....	25
3.2 被动调 Q 激光器的输出特性	28
3.3 橙光 Bi ₂ Se ₃ 被动调 Q 光纤激光器数值仿真.....	30
3.4 本章小结	38
第四章 Pr:ZBLAN 光纤橙光激光器实验研究.....	41
4.1 Pr: ZBLAN 光纤激光器系统搭建	41
4.1.1 光纤耦合系统搭建.....	41
4.1.2 光纤镀膜反射镜的制备.....	46
4.2 橙光 604nm Pr:ZBLAN 光纤连续激光器的实验研究	49
4.2.1 Pr:ZBLAN 光纤荧光光谱及吸收谱测试.....	49
4.2.2 604nm 连续光激光器性能测试	51
4.3 橙光 Bi ₂ Se ₃ Pr:ZBLAN 被动调 Q 激光器	54

4.3.1 Bi ₂ Se ₃ 材料制备与表征	54
4.3.2 Bi ₂ Se ₃ 橙光被动调 Q 激光器实验装置.....	58
4.3.3 Bi ₂ Se ₃ 橙光被动调 Q 激光器实验结果与分析.....	59
4.4 本章小结	64
第五章 总结与展望	65
5.1 总结	65
5.2 展望	66
参考文献	69
硕士期间发表论文	75
致 谢	77

Content

Chapter I Introduction	1
1.1 Preface.....	1
1.2 Introduction of passively Q-switched laser.....	3
1.3 Background of Q-switched Pr ³⁺ -doped fiber laser with Bi ₂ Se ₃ SA....	7
1.4 Summary.....	10
Chapter II Theory of Pr:ZBLAN fiber and Bi₂Se₃.....	11
2.1 Energy level structure of Pr ³⁺ ion.....	11
2.2 Saturable absorption scheme and optical properties of Bi ₂ Se ₃	15
2.2.1 Saturable absorption scheme of Bi ₂ Se ₃	15
2.2.2 Optical properties of Bi ₂ Se ₃ film	17
2.3 Preparation of Bi ₂ Se ₃	19
2.4 Summary.....	22
Chapter III Numerical simulation of Q-switched laser	23
3.1 Principle and rate equation of Q-switched laser	23
3.3.1 Principle of Q-switched laser.....	23
3.1.2 Rate equation of Q-switched laser	25
3.2 Output characteristics of Q-switched laser	28
3.3 Numerical simulation of orange Q-switched laser	30
3.4 Summary.....	38
Chapter IV Experimental study on orange Pr³⁺-doped fiber laser	41
4.1 System bulid of Pr:ZBLAN fiber laser	41
4.1.1 Coupling system.....	41
4.1.2 Preparation of fiber pigtail mirrors	46
4.2 Experimental study on continuous Pr:ZBLAN fiber laser	49
4.2.1 Fluorescence and absorption spectroscopy test	49
4.2.2 Performance test of continuous-wavelength laser	51
4.3 Orange Q-switched Pr:ZBLAN fiber laser.....	54
4.3.1 Preparation and characterization of Bi ₂ Se ₃	54
4.3.2 Schematic of orange Q-switched fiber laser	58

4.3.3 Experimental result and analysis	59
4.4 Summary	64
Chapter V Summary and prospects.....	65
5.1 Summary	65
5.2 Prospects	66
References	69
Publications	75
Acknowledgements	77

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 绪论

1.1 前言

人类生活在一个充满光的世界，光给人类带来温暖与色彩，而人们最早懂得利用且最熟悉的是自然光。时间追溯到 1917 年，爱因斯坦（Albert Einstein）提出受激辐射的概念，从理论上预言激光产生的可能性。经过不懈的努力，1960 年美国休斯公司的年轻工程师梅曼（Theodore H.Maiman）制作出人类史上的第一台激光器：红宝石激光器（波长为 694.3nm），从此开创激光技术的历史。激光拥有相干性强、高方向性、高亮度和单色性强等特性，由此开拓许多新的研究领域和激光应用新方法。

激光器由谐振腔、泵浦源和增益介质组成，三者缺一不可。根据激光器工作物质的不同，可以将激光器分类为固体激光器（Nd:YAG 晶体、红宝石激光器）、液体激光器、气体激光器（ Ar^{3+} 、He-Ne、 CO_2 ）、染料激光器和半导体激光器（GaAs、InGaAs）。光纤激光器是以掺杂稀土离子光纤作为增益介质并加入正反馈机制的新型激光器。其历史可以追溯到 1961 年，美国光学公司的 E. Snitzer^[1]，在掺 Nd^{3+} 离子光学玻璃波导中发现自发辐射的现象，打开光纤激光器的大门。但由于光纤的传输损耗大，光纤激光器在之后的 20 年之中发展缓慢。直到 1985 年英国南安普顿大学的 Poole 和 Payne^[2] 等人通过金属气相沉积法（MCVD），制成在 950-1400nm 波长低传输损耗特性的稀土离子（钕、铒）光纤，才使得光纤激光器重新迎来一个新的发展局面。

光纤激光器相比于半导体激光器等固体激光器，拥有诸多优势：（1）耦合效率高，因为其本身就是光纤结构，与光纤传输系统的耦合相比于固体激光器少了光学耦合系统损耗；（2）转换效率高、激光阈值低，光纤具有较好的表面积/体积比，散热效果好，能在不加冷却装置的情况下连续长时间工作；（3）极好的柔嫩性，光纤是利用全反射的原理，在一定的弯曲角度下拥有较好的柔性，能够与耦合器构成柔性谐振腔。众多的优点极大的促进光纤激光器的发展，光纤激光器

已经在光纤通信、大功率光纤激光器、激光医疗以及 DWDM（密集波分复用）系统当中有广泛的运用。但是因为光纤纤芯极小，在光纤中传输的光束直径小，导致光纤激光器腔内的能量密度很高，引发腔内的非线性效应，最终限制大功率单模光纤激光器的发展。所以，目前人们研究的热点主要集中在如何采用新型的腔镜结构、如何挖掘新的材料，从而提高光纤激光器的性能和获得高性能的超短脉冲。

与连续光光纤激光器相比，脉冲光纤激光器能够获得较高的峰值功率输出。超短脉冲主要是指脉冲宽度从微秒到纳秒级别以及更短的脉冲，产生超短脉冲的主要手段是调 Q 和锁模。调 Q 是通过某种方法调节激光腔内的损耗，从而改变腔内品质因子 Q 值，使激光器输出一个峰值功率高、宽度窄的巨脉冲。而锁模技术是进一步对于激光的特殊调制，使得激光腔中各个纵模的相位差恒定，多个模式相干叠加得到超短脉冲。锁模技术使得激光能量在时间上高度集中，是目前获得高峰值功率激光器的最先进技术。本文介绍的主要集中于通过调 Q 手段获得超短脉冲。

调 Q 方法主要分为主动调 Q 和被动调 Q。主动调 Q 激光器是指外界注入脉冲电流源或者在激光腔内插入主动调制连续光的器件，对光振幅或者相位进行调制，实现重复频率可控的脉冲光输出。声光调 Q 和电光调 Q 技术属于主动调 Q，但是由于声光和电光都是属于外部调制的方法，在激光腔中引入非光纤器件，使得激光器的结构变得臃肿且不稳定，因此逐步失去人们的青睐。而被动调 Q 不需要插入任何主动器件，是一种全光学产生超短脉冲的新型技术。常用的被动调 Q 手段是可饱和吸收体（SA），作为可饱和吸收体的非线性材料需要具备诸多特性：强非线性效应、宽带可饱和吸收、超快相应时间、低插入损耗、易于与系统连接等等。其中以半导体可饱和吸收镜（SESAM）^[3]、掺过渡金属离子（如 Cr³⁺）晶体、单壁碳纳米管^[4-6]以及二维材料（石墨烯^[7, 8]、拓扑绝缘体^[9]、过渡金属硫化物^[10-15]、纳米金属^[16]、黑磷^[17]材料）等等性能尤为突出。

石墨烯是一种新型二维材料，具有独特的零带隙结构及丰富的光学和电子性能。在 2004 年英国曼彻斯特大学的 A. K. Geim 教授和他的学生 K. S. Novoselo^[18]使用机械剥离方法，成功从石墨中分离出石墨烯，跨时代的在一维材料（纳米线）

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.

厦门大学博硕士论文摘要库