

密级:_____

中国科学院研究生院

硕士学位论文

用于激光雷达的高峰值功率全光纤脉冲激光器技术研究

作者姓名: _____ 云 剑 _____

指导教师: _____ 孙传东（研究员）西安光机所 _____

_____ 朱少岚（副研究员）西安光机所 _____

学位类别: _____ 工学硕士 _____

学科专业: _____ 光学工程 _____

培养单位: _____ 中国科学院西安光学精密机械研究所 _____

二零一二年 五月

Researches on high-peak-power, all-fiber, pulsed laser for
lidar

By
Yun Jian

A Dissertation Submitted to
Graduate University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Master of Engineering

Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese
Academy of Sciences

May, 2012

科研道德声明

秉承研究所严谨的学风与优良的科学道德，本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。论文中所引用的内容都已给予了明确的注释和致谢。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了致谢。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名：_____ 日 期：_____

知识产权声明

本人完全了解中科院西安光学精密机械研究所有关保护知识产权的规定，即：研究生在所攻读学位期间论文工作的知识产权单位系中科院西安光学精密机械研究所。本人保证离所后，发表基于研究生工作的论文或使用本论文工作成果时必须征得产权单位的同意，同意后发表的学术论文署名单位仍然为中科院西安光学精密机械研究所。产权单位有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；产权单位可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名：_____ 导师签名：_____

日 期：_____

日 期：_____

摘要

高峰值功率全光纤脉冲激光器以其诸多优点成为激光雷达系统的重要光源，对提高系统的整体性能起到了至关重要的作用。本论文基于 MOPA 技术，主要致力于高峰值功率、窄脉冲宽度、全光纤脉冲激光器技术的研究，以及其在激光测距、激光三维成像中的应用。

本论文的主要研究内容包括以下几个方面：

1、首先对全光纤激光器的种子源进行了研究。采用半导体激光器作为种子源进行了实验研究，获得了脉冲宽度为 1.5ns 的脉冲激光输出；进一步对不同重复频率和不同脉冲宽度条件下种子源的脉冲激光输出进行了研究。在重复频率 30kHz 和 50kHz 条件下，分别获得了脉冲宽度为 1.5ns、965ps 和 841ps 的脉冲激光输出。

2、对高峰值功率全光纤脉冲激光器进行了理论和实验研究。对直接调制的半导体激光器种子源、高效低噪声预放大器、高功率双包层光纤主放大器进行了研究。在重复频率 50kHz 时，获得了中心波长为 1549.8nm、脉冲宽度为 1.7ns 的脉冲激光输出，峰值功率达到 5.1 kW。激光器能同时以两种输出方式工作，用于连续激光输出时，产生了功率为 0.5W 的连续调制信号激光输出。

3、对高峰值功率全光纤脉冲激光器进行了工程化研究。首先对激光器种子源的脉宽、温控及输出功率等特性进行了调节；然后通过使用高掺杂双包层光纤，有效地降低了非线性效应。在重复频率 50kHz、脉冲宽度 1.2ns 时，获得了峰值功率 7.6 kW 的单横模脉冲激光输出。进一步阐述了光纤拉锥技术，最后给出了激光器工程化后的结果以及工程化样机。

4、将设计的激光器应用于高分辨率三维成像激光雷达系统进行了三维成像实验，给出了实验结果，验证了激光器的性能。实验结果表明，基于研制设计的高峰值功率、全光纤脉冲激光器，实现了三维成像的功能，测距精度达到 ± 7.5 cm。

关键词：全光纤激光器，高峰值功率，单模，MOPA 结构，激光雷达

Abstract

High-peak-power, all-fiber, pulse laser has becoming an important laser source for lidar by their many advantages, which is important to improve the performance of the lidar system. This dissertation mainly discusses high-peak-power, narrow-pulse, single-mode, all-fiber, MOPA laser source for lidar, range finding and 3D imaging.

The main research details are summarized as follows:

1. Firstly, the experimental research of the seeder laser of high-peak-power, all-fiber, pulsed laser is directly modulated to generate optical pulses with 1.5-ns time duration. In addition, the different repetition rate and pulse width of the seeder laser output is researched. The pulse width of 1.5 ns, 965 ps and 841 ps were obtained at the repetition rate of 30 kHz and 50 kHz.

2. The theoretical and experimental research of high-peak-power, all-fiber, pulsed laser have been discussed. The semiconductor seeder laser is directly modulated to generate optical pulses at 1549.8 nm. The high-efficiency, low-noise preamplifiers and high-power double-clad fiber amplifier were reported. It can produce 1.7-ns pulse width and 5.1-kW peak power at repetition rate of 50 kHz. The output power of 0.5 W is obtained in the case of CW laser output.

3. The engineering implementation of the high-peak-power, all-fiber, pulsed laser are researched. Firstly, the pulse-width, temperature-control, and output-power of the seeder laser have been discussed. The high-doped double-clad fiber was used to reduce the nonlinear effects. The output peak power of 7.6 kW is obtained at 1.2-ns pulse width and repetition rate of 50 kHz. Then, the fiber tapered technology is researched. Finally, the engineering results and laser prototype is achieved.

4. This laser has been used as a transmitter of high resolution 3D imaging lidar, which achieves the function of 3D imaging and gives the scanning imaging results. The performance of the laser was verified. The imaging results show that the single-mode, all-fiber laser source can be very suitable for 3D imaging lidar. The distance precision is about ± 7.5 cm.

Key word: All-fiber laser; high-peak-power; single-mode; MOPA; lidar

目录

摘要.....	I
Abstract	III
目录.....	V
第一章 绪论.....	1
1.1 引言	1
1.2 三维成像激光雷达对光源的要求	2
1.3 MOPA 结构脉冲光纤激光器在激光雷达中的应用	2
1.4 MOPA 结构脉冲光纤激光器的研究进展及趋势	3
1.5 本论文的主要研究内容和思路	6
第二章 MOPA 结构脉冲光纤激光器的基本理论及数值模拟	7
2.1 引言	7
2.2 掺 Yb^{3+} 光纤激光器的理论	7
2.2.1 掺 Yb^{3+} 光纤的特性	7
2.2.2 掺 Yb^{3+} 光纤放大器的传输方程	8
2.3 掺 Yb^{3+} 光纤放大器的数值模拟	10
2.4 掺 Er^{3+} 光纤激光器的理论	14
2.4.1 掺 Er^{3+} 光纤的特性	14
2.4.2 掺 Er^{3+} 光纤放大器的传输方程	15
第三章 全光纤激光器种子源的研究.....	19
3.1 引言	19
3.2 激光器种子源结构	20
3.3 采用 TO 封装的半导体激光器种子源输出结果	20
3.4 百皮秒脉冲种子源激光技术的研究	21
第四章 高峰值功率全光纤激光器的实验研究.....	23
4.1 引言	23
4.2 实验装置	24
4.3 实验结果及分析	24

4.3.1 激光器用于脉冲激光输出时的实验结果	24
4.3.2 激光器用于连续激光输出时的实验结果	27
4.4 本章小结	29
第五章 高峰值功率全光纤激光器的工程化	31
5.1 激光器种子源的工程化	31
5.1.1 种子源脉宽调节	31
5.1.2 种子源温控调节	31
5.1.3 种子源输出功率调节	32
5.2 光纤放大器的工程化	34
5.3 光纤拉锥技术的研究	34
5.4 全光纤激光器工程化后的结果	36
第六章 激光器用于高分辨率三维成像激光雷达实验	41
6.1 三维成像激光雷达系统组成	41
6.2 激光雷达三维成像实验结果及分析	42
第七章 总结与展望	45
参考文献	47
在读期间发表的文章	51
致谢	53

第一章 绪论

1.1 引言

激光雷达（LIDAR-Light Detected And Ranging）系统结合了光探测技术和距离测量技术，能够同时获得方位、俯仰、距离、强度等信息，特别适合于森林结构的估计、城市建设、工业、农业、航空航天等领域^[1]。激光问世的第二年，即 1961 年，就出现了激光测距、激光雷达、激光制导的设想，并展开了相关的研究工作。在工作原理上，激光雷达与微波雷达没有区别，但由于激光的波长比微波短好几个数量级，波束也更窄，所以具有极高的分辨率、能同时获取目标的多种图像信息、抗电磁干扰能力强、体积小和重量轻等一系列优点^[2,3]。

激光雷达一般由激光发射系统、光机扫描系统、光接受和探测系统、测距系统和信号处理系统组成。激光雷达自从 20 世纪 60 年代出现以来，种类不断增加，功能不断完善，应用的领域也越来越广。相应的，随着激光器技术的飞速发展，各种形式的激光雷达光源也相继出现，被广泛地应用在具有测距或者三维成像功能的激光雷达中。

激光雷达与微波雷达相比，虽然没有对环境的电磁污染，但是对人眼很不安全，在训练和能见度较差的战场环境中应用很不方便。针对人眼安全波段的激光雷达，使用中心波长为 1550nm 的激光源，将会大大降低对人眼的伤害，以益于士兵训练和雷达系统操作。人眼安全是激光雷达、激光测距系统的重要特性之一^[4,5]。

激光雷达技术已被证明是一种用于激光测距、激光三维成像的极好的工具，而具有良好输出光束质量的光源是激光雷达中的一项关键技术^[4,6]。窄脉冲宽度、高峰值功率、单模激光输出、主振荡功率放大（MOPA）结构全光纤激光器由于具有许多优越的特性使其成为了一种理想的光源。另外，激光器使用 Er^{3+} 掺杂光纤作为增益介质，放大器工作在 1.5 μm 波段，这样的激光具有人眼安全和较强的穿透能力等特性^[4,5]。激光源系统是激光雷达的重要组成部分，它的参数在很大程度上决定了激光雷达系统的整体性能。1550nm 的高峰值功率全光纤激光器是用于激光雷达的人眼安全波长的高效率光源。光纤激光器能够产生高峰值功率，

高光束质量的脉冲输出。光源出色的脉冲光束性能让激光雷达能够实现高精度、高分辨率成像技术，提高了系统的探测能力。

1.2 三维成像激光雷达对光源的要求

对高分辨率三维成像激光雷达来说，激光器设计的主要指标有：发射激光的峰值功率、脉冲宽度、重复频率等。激光器输出激光的峰值功率越高，探测器接收到的激光回波信号的峰值功率就会越高，雷达系统的作用距离就越远。所以为了提高激光雷达的作用距离，首先要提高激光器的峰值功率。减小激光器的脉冲宽度有利于提高输出激光的峰值功率，但脉冲宽度受限于探测器的响应带宽，激光器的脉冲宽度太窄会导致探测器的效率下降，从而会使激光雷达系统的测量距离下降。而且激光脉冲宽度越小，要求激光器的驱动电路输出的电流脉冲越窄，这会提高种子源驱动电路的设计难度。激光器的重复频率直接影响激光雷达的成像速度。激光雷达系统的各个组成部分是一个有机的整体，激光器的设计指标与雷达的其它部分息息相关，对于提高系统的整体性能起到重要的作用。因此，设计激光雷达的光源时应综合考虑各个因素^[7,8]。

用于三维成像激光雷达的激光源主要有三种：短距离和低精度探测时对光源的脉冲宽度、峰值功率、重复频率等参数要求较低，一般直接使用半导体激光器^[8]。但是半导体激光器的脉冲宽度、峰值功率有限，极大地限制了雷达的整体性能，无法满足远距离、高精度、高分辨率的探测要求；固体激光器能产生高峰值功率和短脉冲激光输出，成为了激光雷达的一种重要光源^[9,10]。但是，固体激光器很难获得较高的重复频率，且输出激光的光束质量也不是很理想，一般在高峰值功率下较难获得单模激光输出。与前两种光源相比，高峰值功率、单模激光输出、全光纤脉冲激光器具有许多优越的性能，例如，高光束质量、高效率、高稳定性和结构紧凑性、低重量、低功耗、低散热等优点^[11,12]，使其非常有利于提高激光雷达的整体性能，是激光雷达、激光测距、激光三维成像的理想光源，对提高雷达的作用距离和探测精度起到了重要的作用。

1.3 MOPA 结构脉冲光纤激光器在激光雷达中的应用

基于MOPA (Master-Oscillator Power-Amplifier)技术，研制设计用于激光雷达的高峰值功率、单模激光输出、全光纤脉冲激光器，要求激光器具有以下特性：

(1) 长时间稳定的激光输出；(2) 波长漂移、脉宽变化、光谱变形、频率抖动较小；(3) 较好的输出光束质量；(4) 结构紧凑，稳定性、散热性好。要求激光器能获得长时间的、稳定的高峰值功率、单模激光输出，输出光谱变形、中心波长漂移较小，种子源与放大后最终输出的脉冲宽度变化较小，结构紧凑性、机械稳定性要满足整体雷达系统实际工程使用和外部环境的要求。采用MOPA技术，使用电信号直接调制的分布反馈(DFB)型半导体激光器获得种子激光输出，使用单模增益光纤进行功率放大，容易获得单模激光输出，一般的机械振动不会改变其输出特性，非常适合作为激光雷达的光源^[13]。

在MOPA结构全光纤激光器用于激光雷达、激光三维成像方面，2004年，V. Philippov设计了一台用于激光雷达的MOPA结构光纤激光器，功率放大器采用1.8m的 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤；在重复频率4kHz时，获得了0.29mJ脉冲能量、100ns脉宽的激光输出^[14]。2008年，Canat报道了一台用于便携式探测雷达的窄线宽MOPA结构光纤激光器，种子源采用500kHz线宽的DFB半导体激光器，光纤采用 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ 共掺的大模场面积双包层光纤^[15]。2009年，Yuntong Fen等人报道了一台用于空间激光三维成像的MOPA结构全光纤脉冲激光器，在重复频率100kHz、脉冲宽度10ns条件下获得了平均功率2.3W的激光输出^[16]。2011年，刘源等人给出了一台用于多普勒雷达的人眼安全、全光纤化、MOPA结构脉冲激光器，在重复频率10kHz、脉冲宽度500ns条件下获得了脉冲能量116 μJ 的激光输出，实现了高重复频率、窄线宽的单频脉冲激光输出的全光纤激光器^[5]。

激光雷达系统采用MOPA结构全光纤脉冲激光器作为激光源，它不但能做到高峰值功率、短脉冲而且占用空间小。MOPA结构激光器的种子源能够产生高光束质量、低功率的激光束，经过光纤放大后，又满足了远距离探测的高峰值功率要求^[13]。预放大器采用单包层单模掺 Er^{3+} 光纤，主放大器采用单模 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤，能够确保获得单模激光输出，使激光源具有良好的输出光束质量，极大地提升了激光雷达系统的测量范围、测距精度和分辨率等性能。

1.4 MOPA 结构脉冲光纤激光器的研究进展及趋势

由于MOPA结构全光纤脉冲激光器具有较高的光-光转换效率、良好的热

稳定性和机械稳定性、紧凑的结构、良好的输出光束质量等优点，使其在激光雷达、激光测距和激光三维成像等领域得到了广泛的应用。由于脉冲激光具有比连续激光更高的峰值功率，能够传输更远的距离，因此对远距离的目标进行探测时，多采用脉冲激光。短脉冲、高重复频率、高峰值功率、高稳定度的全光纤激光源在激光雷达应用领域是一种应用前景广阔、非常有市场潜力的激光器^[17,18]。

MOPA 结构脉冲光纤激光器具有以下特点：

- (1) 波导结构热变形小，激光模式确定；
- (2) 极好的光束质量，可达 $M^2 < 1.2$ ；
- (3) 效率高，直接电光效率可达 30 % 以上；
- (4) 集成度高，体积小、重量轻；
- (5) 散热面积大，容易散热、热效应低；
- (6) 掺杂光纤的种类繁多，覆盖光谱范围宽，可以满足不同要求。

MOPA 结构全光纤脉冲激光器是获得高峰值功率、高光束质量、短脉冲输出的最有效的方法，广泛地应用于工程中，具有较好的实际应用价值^[17]。对 MOPA 结构光纤激光器国外的研究单位主要有德国的 Friedrich-Schiller 大学、英国的 Southampton 大学、法国的 Ammar Hideur 课题组和美国的 IPG 公司等^[17]。国内的研究单位主要有中国电子科技集团公司第四十六研究所、国防科技大学、中科院上海光机所、南开大学、清华大学等单位。

在 MOPA 结构光纤激光器方面，2004 年，V. Philippov 等人报道了一台 MOPA 结构 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ 共掺脉冲光纤激光器，由于非线性效应的作用，脉冲宽度从 70ns 展宽到 575ns，最大峰值功率小于 2kW^[19]；之后，采用大模场直径光纤获得了高脉冲能量和高峰值功率的输出，但是这样的光源需要分立元器件，无法实现全光纤化。2006 年，M. Savage-Leuchs 等人报道了一台全光纤 MOPA 激光系统，其脉冲宽度为 4.4ns，重复频率为 200kHz，获得了峰值功率 6kW 的脉冲激光输出^[20]。2007 年，M. Bello-Jimenez 等人对纳秒脉冲两级级联 Er^{3+} 掺杂光纤放大器进行了研究，给出了详细的数值模拟过程，获得了 55dB 的增益^[21]。同年，段云锋等人结合双包层掺 Yb^{3+} 光纤和 MOPA 技术，实验研究了全光纤结构的脉冲光纤放大器^[22]，通

过放大器的输出光谱对剩余抽运光和受激拉曼散射光进行了修正,同时对脉冲的时域特性和脉宽压缩进行了研究;随后,2009年,该课题组又实验研究了两级级联、全光纤结构的窄线宽双包层光纤放大器^[23]。同年,伍波等研制了高功率窄线宽光纤放大器,该放大器采用双级结构,第一级预放大器为掺 Er^{3+} 光纤放大器,第二级功率放大器采用10m长的 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤,获得了放大后输出激光的功率为1.94W^[24]。2009年,我们课题组的高存孝等研究了一台基于MOPA技术的全光纤脉冲激光器,重复频率100kHz~10MHz连续可调谐,在重复频率100kHz、脉冲宽度5ns时,采用该结构,激光器获得了平均功率1.2W,对应峰值功率2.4kW的单横模脉冲激光输出^[18];同时还进行了3.3ns脉冲输出的人眼安全、高能量、单模、全光纤激光器的研究,重复频率30kHz~50MHz连续可调谐,在30kHz重复频率下获得了25μJ的脉冲能量输出,峰值功率达到7.5kW,但是主放大器输出光谱中出现了较强的非线性效应^[4]。同年,B. Peng,等人报道了一台全光纤、人眼安全、 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ 共掺、多级级联脉冲光纤激光器,功率放大器使用了纤芯直径为25μm的大模场面积光纤,获得了脉冲宽度为2ns的脉冲激光输出^[25]。2010年,J. Swiderski等人报道了一台重复频率和脉冲宽度可调谐的 Yb^{3+} 掺杂光纤放大器,利用MOPA技术和大模场面积光纤,获得了8.5ns到250ns的脉冲输出,输出平均功率达到22W^[26]。2010年,周洁等报道了一台全光纤化 Yb^{3+} 掺杂纳秒脉冲MOPA结构光纤激光器,输出激光平均功率达到20W,获得了0.1mJ的脉冲能量输出,重复频率从10kHz~200kHz可调^[27]。关于MOPA结构光纤激光器还有许多相关的报道,主要研究特点集中在窄脉冲宽度、高平均功率、高峰值功率、高能量以及重复频率可调谐等几个方面,根据实际应用对光源的不同要求激光器设计的各个参数指标也各有不同^[28,29]。

MOPA结构脉冲光纤激光器,已经成为高能量、高峰值功率脉冲激光输出的主要方式^[17]。随着光纤器件技术的发展,采用光纤熔接的方法,实现了激光器的全光纤化,使得激光器结构紧凑、稳定可靠,非常适合作为激光雷达的光源^[17]。随着MOPA技术的发展,脉冲激光的单脉冲能量和脉冲峰值功率也越来越高。近年来,MOPA结构光纤激光器的研究工作主要集中在如何抑制主放大级系统中的非线性效应,从而进一步提高输出激光的峰值功率,以及窄线宽、短脉冲激光的

获得^[28,29]。同时,使用大模场面积掺杂双包层光纤来有效地降低非线性效应、提高输出激光的峰值功率也成为了研究的热点^[28]。关于MOPA结构光纤激光器更多的研究工作集中在实现全光纤化和工程化,在满足应用需求的前提下降低成本,提高实用性,以便广泛地应用在激光雷达、光学遥感、工业制造和军事应用等领域。

1.5 本论文的主要研究内容和思路

本论文主要致力于 MOPA 结构的高峰值功率、窄脉冲宽度、全光纤脉冲激光器技术的研究,以及其在激光雷达、激光测距、激光三维成像中的应用。主要的研究内容分为:

第二章主要进行了 MOPA 结构脉冲光纤激光器和放大器的理论研究及数值模拟。包括光纤放大器的能级结构、跃迁特性及传输方程等基本理论,并在此理论基础上进行了掺 Yb^{3+} 光纤放大器的数值模拟。同时还对掺 Er^{3+} 光纤放大器的基本性质和原理进行了理论研究。

第三章主要对全光纤激光器的种子源进行了研究,给出了种子源结构和组成部分,并采用 TO 封装的半导体激光器作为种子源进行了实验研究,以及对百皮秒脉冲种子源激光产生技术进行了研究。

第四章主要进行了高峰值功率全光纤脉冲激光器的实验研究,并对实验结果进行了详细的分析。

第五章主要进行了全光纤脉冲激光器的工程化研究。首先对激光器种子光源的脉宽、温控及输出功率进行了工程化设计;然后对光纤放大器进行了工程化实现,并阐述了光纤拉锥技术的研究,在此基础上实现了激光器的工程样机。

第六章主要介绍了三维成像激光雷达的结构和组成部分,并将设计的激光器用于激光雷达进行了三维成像实验,通过实验结果验证了激光器的性能。

第七章主要对 MOPA 结构全光纤脉冲激光器的研究进行了总结,对出现的问题进行了阐述,提出了解决的思路和方法,为今后进一步研究提供参考。

第二章 MOPA 结构脉冲光纤激光器的基本理论及数值模拟

2.1 引言

MOPA 结构脉冲光纤激光器由种子源和光纤放大器组成, 其中种子源通常产生中心波长为 1064nm 或 1550nm 附近的脉冲激光输出, 然后分别通过掺 Yb³⁺ 光纤放大器或掺 Er³⁺ 光纤放大器来进行功率放大。因此, 我们对掺 Yb³⁺ 光纤的能级结构、粒子跃迁特性以及掺 Yb³⁺ 光纤放大器的速率方程和传输方程进行了理论研究, 采用二能级系统模型, 对两级级联掺 Yb³⁺ 光纤放大器进行了数值模拟。主要计算了最佳泵浦功率和最佳增益光纤长度, 以及相应的 ASE 传播情况, 另外, 还在输入不同功率信号光条件下, 研究了放大器输出功率的变化情况, 为实验中种子源输出功率的选取提供理论依据。对两级级联式光纤放大器的基本原理和特性进行了一定的研究。

通过掺 Er³⁺ 光纤放大器可以获得工作波长在 1550nm 附近的脉冲激光输出, 非常适合用于研制具有人眼安全特性的高峰值功率全光纤脉冲激光器。且该波段的激光器具有穿透能力强的特性。而且 Er³⁺ 离子可以提供较宽的信号光波长范围; 可以通过改变纤芯掺杂组分来获得所需的截面谱。掺 Er³⁺ 光纤放大器的这些优越特性决定了我们研究的重要性。因此, 我们研究了掺 Er³⁺ 光纤放大器的基本理论, 对掺 Er³⁺ 光纤放大器的能级结构、粒子跃迁特性以及速率方程和传输方程进行了理论研究, 详细的阐述了从三能级系统模型到二能级系统模型的简化条件和过程, 给出了稳态条件下的粒子数方程和简化后的功率传输方程。这些系统模型和理论方程使我们可以很好地理解掺 Er³⁺ 光纤放大器的基本性质和原理, 为实验中设计高峰值功率全光纤激光器打下了很好的理论基础。

2.2 掺 Yb³⁺ 光纤激光器的理论

2.2.1 掺 Yb³⁺ 光纤的特性

镱离子能级结构图如图 2.1 所示。镱离子的能级结构由一个基态 $^2F_{7/2}$ 和一个激发态 $^2F_{5/2}$ 构成, 消除能级简并, 其中基态含 4 个 stark 子能级, 上激发态含有 3 个 stark 子能级^[30], 镱离子有很长的上能级寿命。

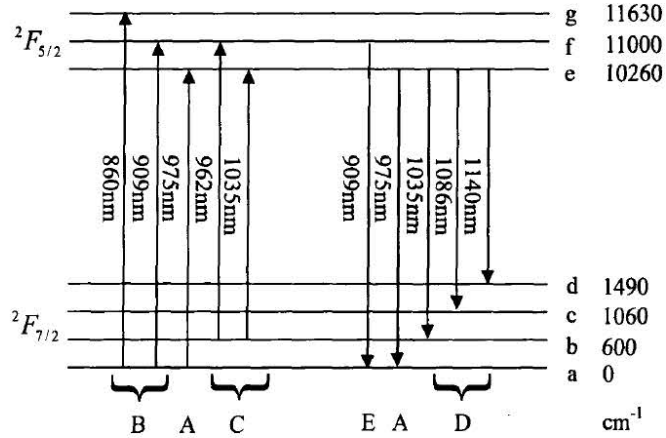
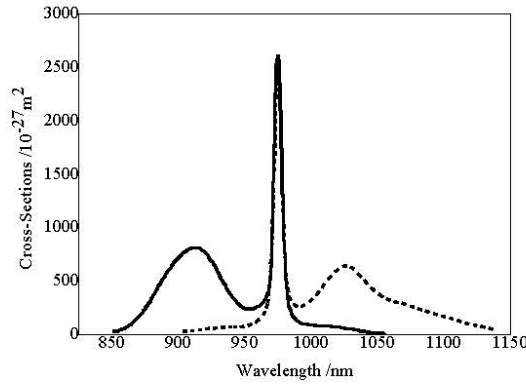


图 2.1 镱离子能级结构示意图

掺 Yb^{3+} 光纤的吸收和发射谱如图 2.2 所示。选用中心波长为 976nm 的泵浦源激光器可以提高泵浦效率和有效地被增益光纤吸收^[17]。


 图 2.2 掺 Yb^{3+} 光纤的吸收和发射截面图

2.2.2 掺 Yb^{3+} 光纤放大器的传输方程

掺 Yb^{3+} 光纤放大器可以用二能级系统模型来研究^[30]。在单模掺 Yb^{3+} 光纤中，设光线沿 z 方向传播，总粒子数密度和上下能级的粒子数密度分别为 N_{Yb} 、 N_1 、 N_2 ，则速率方程为^[31-33]：

$$\frac{dN_1(r, z)}{dt} = -[R_{pa}(r, z) + W_{sa}(r, z)]N_1 + [R_{pe}(r, z) + W_{se}(r, z) + A_e]N_2 \quad (2.1)$$

$$\frac{dN_2(r, z)}{dt} = [R_{pa}(r, z) + W_{sa}(r, z)]N_1 - [R_{pe}(r, z) + W_{se}(r, z) + A_e]N_2 \quad (2.2)$$

$$N_1(r, z) + N_2(r, z) = N_{\text{Yb}}(r) \quad (2.3)$$

式中 $A_e = 1/\tau_e$ 为自发辐射几率， τ_e 为上能级寿命。 $W_{pa}(r, z)$ 、 $W_{pe}(r, z)$ 、 $R_{pa}(r, z)$ 和

$R_{pe}(r, z)$ 分别为信号光和抽运光的受激吸收和受激发射跃迁几率，表达式分别为：

$$R_{pa}(r, z) = \sigma_{pa} \frac{\Gamma_p P_p(z)}{h\nu_p A_{core}} \quad (2.4)$$

$$R_{pe}(r, z) = \sigma_{pe} \frac{\Gamma_p P_p(z)}{h\nu_p A_{core}} \quad (2.5)$$

$$W_{sa}(r, z) = \sigma_{sa} \frac{\Gamma_s P_s(z)}{h\nu_s A_{core}} \quad (2.6)$$

$$W_{se}(r, z) = \sigma_{se} \frac{\Gamma_s P_s(z)}{h\nu_s A_{core}} \quad (2.7)$$

式中 σ_{pa} , σ_{pe} , σ_{sa} , σ_{se} 是抽运光、信号光波长处的吸收和发射截面； $P_p(z)$ 、 $P_s(z)$ 为功率； h 为普朗克常熟； $\nu_{s, p, j}$ 是信号光、抽运光和 ASE 频率； $\Gamma_{s, p, j}$ 为信号光、抽运光和 ASE 重叠因子； A_{core} 为纤芯面积， a 为纤芯半径。

若速率方程在稳态条件下（即 $dt/dN_1 = dt/dN_2 = 0$ ）进行求解，其稳态解为：

$$N_2(r, z) = \frac{\frac{\tau_e \sigma_{sa} \Gamma_s P_s(z)}{h\nu_s A_{core}} + \frac{\tau_e \sigma_{pa} \Gamma_p P_p(z)}{h\nu_p A_{core}} + \sum_j \frac{\tau_e \sigma_{ja} \Gamma_j P_{ASE}(v_j)}{h\nu_j A_{core}}}{\frac{\tau_e (\sigma_{sa} + \sigma_{se}) \Gamma_s P_s(z)}{h\nu_s A_{core}} + \frac{\tau_e (\sigma_{pa} + \sigma_{pe}) \Gamma_p P_p(z)}{h\nu_p A_{core}} + \sum_j \frac{\tau_e (\sigma_{ja} + \sigma_{je}) \Gamma_j P_{ASE}(v_j)}{h\nu_j A_{core}} + 1} N_{vb}(r) \quad (2.8)$$

稳态条件下，抽运光、信号光和 ASE 沿 z 轴的传输方程为：

$$\frac{dP_p}{dz} = (N_2 \sigma_{pe} - N_1 \sigma_{pa}) \Gamma_p P_p - \alpha_p P_p \quad (2.9)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = (N_2 \sigma_{se} - N_1 \sigma_{sa}) \Gamma_s P_s - \alpha_s P_s \quad (2.10)$$

$$\frac{dP_{ASE}^+(v_j)}{dz} = (N_2 \sigma_{je} - N_1 \sigma_{ja}) \Gamma_s P_{ASE}^+(v_j) + 2N_2 \sigma_{je} \Gamma_s h\nu_j \Delta v_j - \alpha_j P_{ASE}^+(v_j) \quad (2.11)$$

$$\frac{dP_{ASE}^-(v_j)}{dz} = -(N_2 \sigma_{je} - N_1 \sigma_{ja}) \Gamma_s P_{ASE}^-(v_j) + 2N_2 \sigma_{je} \Gamma_s h\nu_j \Delta v_j + \alpha_j P_{ASE}^-(v_j) \quad (2.12)$$

其中 α_s , α_p , α_j 为信号光、抽运光和 ASE 的不饱和损失系数。

为了方便进行数值模拟，将变量进行简化后得到的新变量可以表示为^[21]：

$$A(\lambda) = \frac{\tau\sigma_p^{(a)}}{ah\nu_p} \Gamma_p \quad (2.13)$$

$$B(\lambda) = N\sigma_p^{(a)} \Gamma_p \quad (2.14)$$

$$C(\lambda) = \frac{\tau\sigma_s^{(a)}}{ah\nu_s} \Gamma_s \quad (2.15)$$

$$D(\lambda) = N\sigma_s^{(a)} \Gamma_s \quad (2.16)$$

2.3 掺 Yb³⁺ 光纤放大器的数值模拟

到目前为止，前人对光纤放大器的特性进行过很多数值模拟和分析，在放大器的优化和设计方面也进行过很多理论模拟，这些理论模拟结果为研究人员理解光纤放大器的基本原理和实验中设计研究光纤放大器起到了很好的指导作用。为了能很好的指导实验研究，我们以 MOPA 结构两级级联掺 Yb³⁺ 光纤放大器为依据，进行了一些数值模拟的研究。

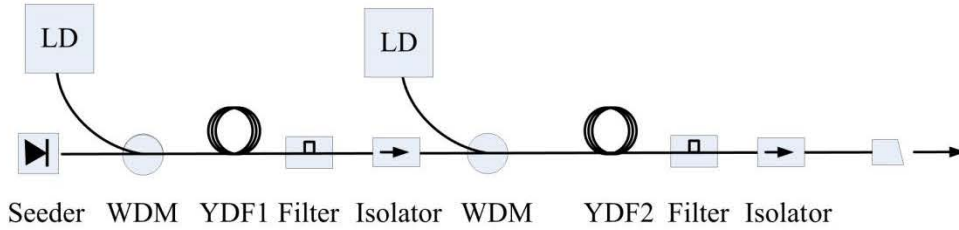


图 2.3 掺 Yb³⁺ 光纤放大器结构

基于 MOPA 技术，对两级掺 Yb³⁺ 光纤放大器进行了数值模拟。图 2.3 为两级级联掺 Yb³⁺ 光纤放大器的结构图。模拟计算参数选择为种子光源的中心波长为 1064nm，重复频率 10MHz，脉冲宽度 10ps，信号输入功率 20μW。通过计算确定出了每一级的最佳增益光纤长度和泵浦功率。

利用上一节给出的基本公式，我们对两级级联掺 Yb³⁺ 光纤放大器进行了数值模拟。这里的参数选择以典型的 Yb³⁺ 掺杂光纤为基础：860nm 的截止波长，0.13 的数值孔径，5μm 光纤纤芯直径，0.84ms 的能级寿命。在 1000 ppm 的 Yb³⁺ 掺杂浓度下，获得了数值模拟结果。图 2.4 为信号光中心波长 1064nm 时，不同抽运光功率下，增益随光纤长度的变化关系，图 2.5 为确定了第一级的最佳长度后，不同泵浦光功率下相应的放大输出功率。

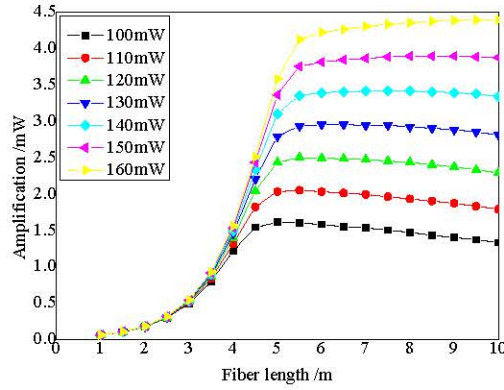


图 2.4 增益随光纤长度的变化

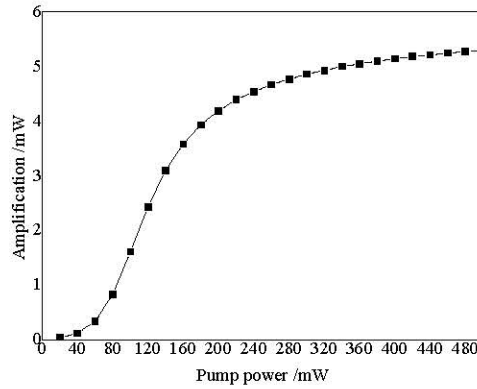


图 2.5 增益随抽运功率的变化

由以上两图可知，放大器的增益光纤存在一个最佳长度，超过这个长度之后，放大的信号光功率又会被吸收而损耗掉。在光纤长度固定不变时，随着抽运功率的增加，增益曲线会出现拐点，产生饱和现象。这些数值模拟结果可以为放大器实验中选取最佳增益光纤长度和最佳抽运光功率提供一定的参考。由图可知，第一级最佳的增益光纤长度是 5m。抽运光功率从 140mW 增加到 160 mW，增益只增加了 0.63 dB (0.48 mW)。而且当抽运光功率达到 160 mW 时，增益曲线开始渐渐产生饱和，导致放大效率下降。由此我们将第一级的最佳抽运光功率确定为 140 mW，这样在较低的泵浦功率下确保了较高的泵浦光转化效率。另外，我们还计算了相应的泵浦功率下，放大器中的 ASE 功率随光纤长度而变化的曲线，结果如图 2.6 所示，从计算结果可知，在小信号输入光纤情况下，放大器中的 ASE 很强，且 ASE 的强度明显高于信号光的增益，在实验

中需要使用滤波器来滤除 ASE。

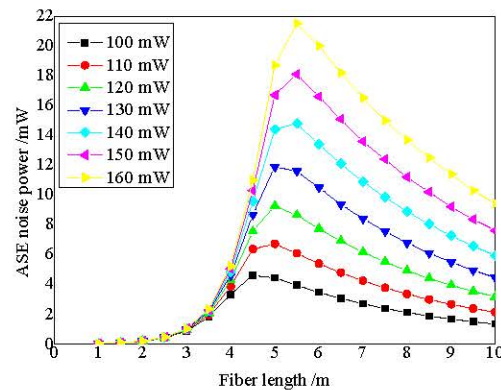


图 2.6 ASE 随光纤长度的变化

将第一级放大器的最佳增益光纤长度和泵浦功率确定，并用滤波器滤除 ASE 后，对第二级放大器进行了同样的计算。图 2.7 为信号增益随光纤长度的变化，图 2.8 为信号增益随抽运功率的变化。经过计算之后确定出第二级的最佳增益光纤长度为 4.5m。在两级总共 300mW 的抽运光功率下，第二级放大器达到了 18dB 的增益。经过两级放大器之后总增益达到了 39.89dB，信号强度达到 196 mW。同时，对 ASE 随光纤长度的变化进行了计算，考察了第二级的 ASE 强度，图 2.9 为第二级放大器中 ASE 随光纤长度的变化情况。从计算结果可以看出，经过两级放大后，信号光产生了较大的增益，相应的 ASE 强度也变得较小。数值计算确定出的每一级的最佳光纤长度和所需的泵浦功率可以为实验中设计两级级联掺 Yb^{3+} 光纤放大器提供参考。

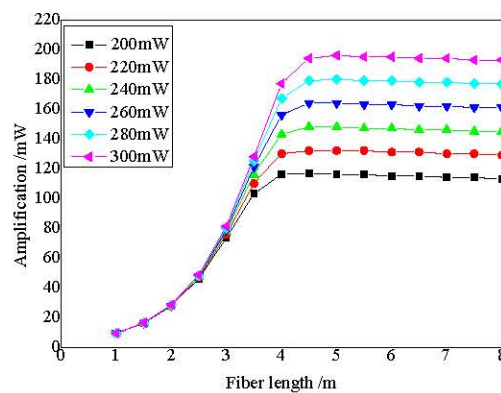


图 2.7 信号增益随光纤长度的变化

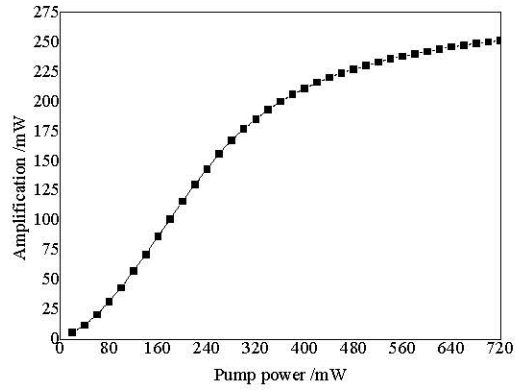


图 2.8 信号增益随抽运功率的变化

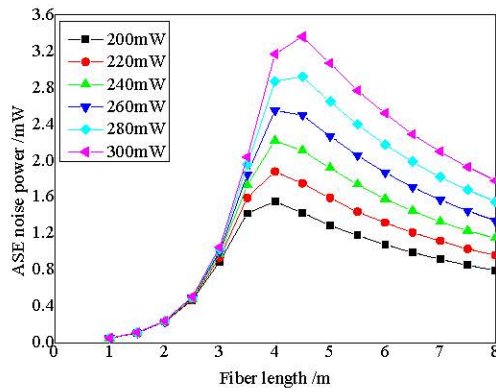


图 2.9 ASE 随光纤长度的变化

进一步对两级输出功率随不同输入功率的变化情况进行了计算，图 2.12 (a) 和(b) 给出了计算结果。由图可知，在只有一级放大器时输出功率随输入功率是线性变化的，而信号经过两级放大器之后，随着输入信号强度的增加输出信号出现了饱和现象，说明对于两级级联掺 Yb^{3+} 光纤放大器，输入放大器光纤中的信号强度需要在一定的范围内做出选择。这为我们在设计放大器选择种子源输出功率的时候提供了参考，以防在实验中出现饱和现象。

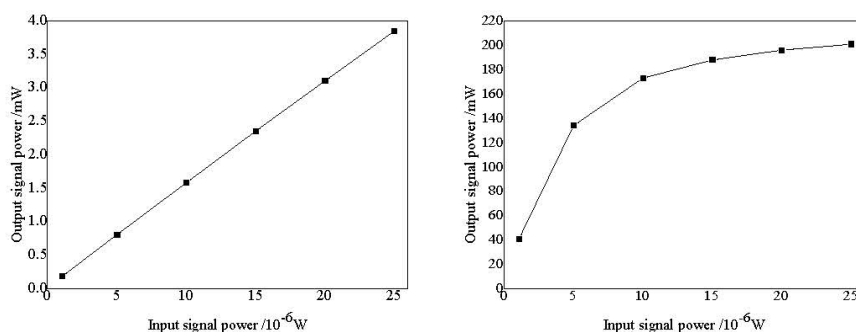
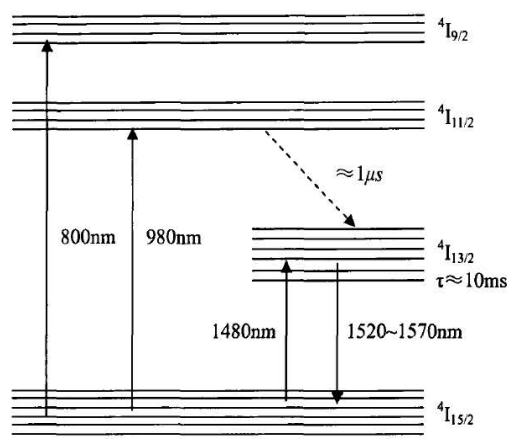
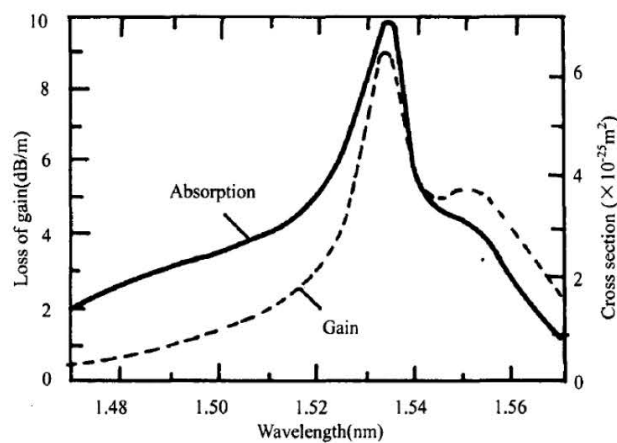


图 2.10 输出功率随输入功率的变化(a)一级放大器, (b)两级放大器

2.4 掺 Er^{3+} 光纤激光器的理论

2.4.1 掺 Er^{3+} 光纤的特性

通常的掺 Er^{3+} 光纤工作波长位于 1550nm 附近, 图 2.11 给出了掺 Er^{3+} 光纤的能级结构。图 2.12 为 Er^{3+} 离子的吸收截面和发射截面谱^[17,34,35]。


 图 2.11 掺 Er^{3+} 光纤的能级结构

 图 2.12 Er^{3+} 离子的吸收截面和发射截面谱

2.4.2 掺 Er^{3+} 光纤放大器的传输方程

设 n_t 为总的 Er^{3+} 离子浓度, n_1 , n_2 , n_3 分别为能级 $^4\text{I}_{15/2}$ 、 $^4\text{I}_{13/2}$ 、 $^4\text{I}_{11/2}$ 的粒子数分布, 则速率方程为^[17]:

$$n_t = n_1 + n_2 + n_3 \quad (2.17)$$

$$\frac{dn_1}{dt} = -(R_{13} + W_{12})n_1 + (W_{21} + A_{21}^R)n_2 + R_{31}n_3 \quad (2.18)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = W_{12}n_1 - (W_{21} + A_{21}^R)n_2 + R_{32}^{NR}n_3 \quad (2.19)$$

$$\frac{dn_3}{dt} = R_{13}n_1 - (R_{31} + A_{32}^{NR})n_3 \quad (2.20)$$

考虑稳态情况, 并取 $a = R_{31} + A_{32}^{NR}$, $b = W_{21} + A_{21}^R$, 则可从方程(2.19)和(2.20)得到:

$$W_{12}n_1 - bn_2 + A_{32}^{NR}n_3 = 0 \quad (2.21)$$

$$R_{13}n_1 - an_3 = 0 \quad (2.22)$$

联立(2.17), (2.18)和(2.22)得:

$$n_1 = n_t \frac{ab}{b(a + R_{13}) + aW_{12} + R_{13}A_{32}^{NR}} \quad (2.23)$$

$$n_2 = n_t \frac{R_{13}A_{32}^{NR} + aW_{12}}{b(a + R_{13}) + aW_{12} + R_{13}A_{32}^{NR}} \quad (2.24)$$

将 a , b 的定义式带入(2.23), (2.24)得到稳态下粒子数分布方程:

$$n_1 = n_t \frac{(1 + W_{21}\tau)(1 + \frac{R_{31}}{A_{32}^{NR}})}{(1 + W_{21}\tau)(1 + \frac{R_{31} + R_{13}}{A_{32}^{NR}}) + W_{12}\tau(1 + \frac{R_{31}}{A_{32}^{NR}}) + R_{13}\tau} \quad (2.25)$$

$$n_2 = n_t \frac{R_{13}\tau + W_{21}\tau(1 + \frac{R_{31}}{A_{32}^{NR}})}{(1 + W_{21}\tau)(1 + \frac{R_{31} + R_{13}}{A_{32}^{NR}}) + W_{12}\tau(1 + \frac{R_{31}}{A_{32}^{NR}}) + R_{13}\tau} \quad (2.26)$$

考虑非辐射衰减占主导, 则(2.25), (2.26)可改写为:

$$n_1 = n_t \frac{1 + W_{21}\tau}{1 + \tau(W_{21} + W_{12} + R_{13})} \quad (2.27a)$$

$$n_2 = n_t \frac{R_{13}\tau + W_{21}\tau}{1 + \tau(W_{21} + W_{12} + R_{13})} \quad (2.27b)$$

将 980nm 抽运的 EDFA 近似为二能级系统, 则波长 λ_s 处强度为 I_s 的信号光强的纵向分布为:

$$\frac{dI_s}{dz} = [\sigma_e(\lambda_s)n_2 - \sigma_a(\lambda_s)n_1]I_s = \sigma_e(\lambda_s)[\eta(\lambda_s)n_2 - n_1]I_s \quad (2.28)$$

式中 $\sigma_e(\lambda_s)$ 、 $\sigma_a(\lambda_s)$ 分别为 λ_s 处的受激发射截面和受激吸收截面。定义 $\eta(\lambda_s) = \sigma_e(\lambda_s)/\sigma_a(\lambda_s)$, 则功率传输方程为:

$$\frac{dP_s}{dz} = \sigma_a(\lambda_s) \int_s [\eta(\lambda_s)n_2 - n_1] I_s(r, \theta) r dr d\theta \quad (2.29)$$

将 I_s 与 P_s 联系起来:

$$I_s(z) = P_s(z) \frac{\psi_s(r, \theta)}{\int_s \psi_s(r, \theta) r dr d\theta} = P_s(z) \bar{\psi}_s(r, \theta) \quad (2.30)$$

式中 $\psi_s(r, \theta)$ 为信号光的模场包络, $\bar{\psi}_s(r, \theta) = \psi_s(r, \theta) / \int_s \psi_s(r, \theta) r dr d\theta$ 为归一化模场包络, 考虑 n_1 、 n_2 的空间效应, 积分后可得:

$$\frac{dP_s}{dz} = \sigma_a(\lambda_s) P_s \int_s [\eta(\lambda_s)n_2 - n_1] \bar{\psi}_s(r, \theta) r dr d\theta \quad (2.31)$$

定义模场半径

$$\omega_s = \left[\frac{1}{\pi} \int_s \psi_s(r, \theta) r dr d\theta \right]^{1/2} \quad (2.32)$$

并利用光纤的角向对称性, 可将式 (2.31) 改写为:

$$\frac{dP_s}{dz} = \sigma_a(\lambda_s) P_s \cdot 2\pi \int_s [\eta(\lambda_s)n_2 - n_1] \bar{\psi}_s(r, \theta) r dr d\theta = P_s \frac{2\sigma_a(\lambda_s)}{\omega^2} \int_s [\eta(\lambda_s)n_2 - n_1] \psi_s(r) r dr d\theta \quad (2.33)$$

抽运光的功率传输方程为：

$$\frac{dP_s}{dz} = -\sigma_a(\lambda_p)P_p \cdot 2\pi \int_s \bar{n}_1 \bar{\psi}_p(r, \theta) r dr = -P_p \frac{2\sigma_a(\lambda_p)}{\omega_p^2} \int_s n_1(r, z) \psi_p(r) r dr \quad (2.34)$$

考虑噪声因素后功率传输方程为：

$$\frac{dP_s}{dz} = \frac{2\sigma_a(\lambda_s)}{\omega_s^2} \int_s \{ \eta(\lambda_s) n_2(r, z) [P_s(\lambda_s + 2P_0)] - n_1(r, z) P_s(\lambda_s) \} \psi_s(r) r dr \quad (2.35)$$

式中 $P_0 = h\nu\Delta\nu$ 。

沿光纤 z 方向的受激辐射几率 W_{21} 为：

$$W_{21}(r, z) = \frac{\sigma_e(\nu_s)}{h\nu_s} I_s(r, z) = \frac{\sigma_e(\nu_s)}{h\nu_s \pi \omega_s^2} P_s(z) \psi_s(r) \quad (2.36)$$

$$W_{12}(r, z) = \frac{\sigma_a(\nu_s)}{h\nu_s \pi \omega_s^2} P_s(z) \psi_s(r) \quad (2.37)$$

抽运速率为：

$$R(r, z) = \frac{\sigma_a(\nu_p)}{h\nu_p \pi \omega_p^2} P_p(z) \psi_p(r) \quad (2.38)$$

定义饱和强度 $I_{sat}(\nu_{s,p})$ ：

$$I_{sat}(\nu_{s,p}) = \frac{h\nu_{s,p}}{[\sigma_a(\nu_{s,p}) + \sigma_e(\nu_{s,p})]\tau} = \frac{h\nu_{s,p}}{\sigma_a(\nu_{s,p})[1 + \eta(\nu_{s,p})]\tau} \quad (2.39)$$

对应的饱和功率 $P_{sat}(\nu_{s,p})$ 为：

$$P_{sat}(\nu_{s,p}) = \frac{h\nu_{s,p} \pi \omega_{s,p}^2}{[\sigma_a(\nu_{s,p}) + \sigma_e(\nu_{s,p})]\tau} = \frac{h\nu_{s,p} \pi \omega_{s,p}^2}{\sigma_a(\nu_{s,p})[1 + \eta(\nu_{s,p})]\tau} \quad (2.40)$$

定义功率的归一化变量为： $P_s(z) = P_s(z)/P_{sat}(\nu_s)$ ， $P_p(z) = P_p(z)/P_{sat}(\nu_p)$ ，

$P_0(z) = P_0(z)/P_{sat}(\nu_s)$ ，在一般情况下，信号光是多波长谱分布的，ASE 和抽运光的传输有前向和后向两种。则式 (2.27a) 和 (2.27b) 的粒子数将变为：

$$n_1(r, z) = n_t(r) \frac{1 + \sum_j \frac{\eta_j(P_j^+ + P_j^-)}{1 + \eta_j} \psi_{sj}(r)}{1 + (P_p^+ + P_p^-) \psi_p(r) + \sum_j (P_j^+ + P_j^-) \psi_{sj}(r)} \quad (2.41)$$

$$n_2(r, z) = n_t(r) \frac{(q^+ + q^-) \psi_p(r) + \sum_j \frac{(P_j^+ + P_j^-)}{1 + \eta_j} \psi_{sj}(r)}{1 + (q^+ + q^-) \psi_p(r) + \sum_j (P_j^+ + P_j^-) \psi_{sj}(r)} \quad (2.42)$$

将部分参数简化且只考虑前向抽运，则功率传输方程可表示为：

$$\frac{dP_p}{dz} = -\alpha_p \frac{P_s + 1}{1 + 2P_s + P_p} P_p \quad (2.43)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = -\alpha_s \frac{P_p - 1}{1 + 2P_s + P_p} P_s \quad (2.44)$$

式中 $\alpha_p = \Gamma_p \sigma_{ap} n_t$ ， $\alpha_s = \Gamma_s \sigma_{as} n_t$ 称为 Er^{3+} 掺杂吸收系数。

从以上基本理论可以看出，在光纤中注入足够强的波长为 976nm 的抽运光后，就会形成粒子数反转，当有信号光经过光纤时，就会通过受激辐射效应将信号光放大。光纤放大器的输出功率与粒子数浓度、吸收和发射截面、纤芯模场直径、掺 Er^{3+} 光纤直径、 Er^{3+} 离子掺杂浓度等物理量有关，这些参数在一定程度上决定了光纤放大器的输出特性。将参数简化成实验中比较容易测得的量，在只考虑前向泵浦的条件下，可以获得简化后的抽运光与信号光相互作用的功率传输方程。这些特性和参数共同决定了光纤放大器的基本性质，很好地理解以上参数之间的关系是实验中研究掺 Er^{3+} 光纤激光器的基础。

第三章 全光纤激光器种子源的研究

3.1 引言

用于激光雷达、激光测距、激光三维成像的光源要求具有高峰值功率、窄脉冲宽度和较好的输出光束质量。高重频、窄脉冲、单模光纤输出的固体激光器、光纤激光器以及半导体激光器均可作为MOPA结构全光纤激光器的种子源,但由于输出功率较低,需要通过光纤放大系统来获得较高的输出功率。上述三种激光器中,半导体激光器具有体积小、寿命长、功耗低、可靠性高、波长范围宽等优点,是其它激光器所不能比拟的,被广泛地用于MOPA结构全光纤激光器的种子源。因此研制一种采用半导体激光器作为种子源的MOPA结构全光纤脉冲激光器具有很重要的实用价值。

半导体激光器在直流电流注入时可以单波长振荡,但是当注入电流以高频率来进行调制时,就会出现多纵模同时振荡的多波长振荡状态。为了在高速调制下也能获得单波长振荡,选用了分布反馈(DFB)型半导体激光器^[17]。DFB激光器的不同之处是内置了布拉格光栅(Bragg Grating),属于侧面发射的半导体激光器。其主要优点是(1)有很高的长期稳定性和可靠性;(2)单色性好(即光谱纯度),它的线宽普遍可以做到1MHz以内,由光栅的间距选择出射的激光波长;(3)能在730nm至2800nm的波长范围内得到10mW到150mW的功率输出;(4)边模抑制比非常高,目前可高达40-50dB以上。

在实验中我们对两种1550nm种子光源DFB半导体激光器(LD)进行了研究:(1)TO封装的光谱宽度为2nm的种子LD,中心波长为1546.8nm;(2)14针蝶形封装、光谱宽度为0.1nm的种子LD,中心波长为1550.087nm。14针蝶形封装、光谱宽度0.1nm的DFB半导体激光器响应速度快、稳定性好,输出激光的脉冲宽度、光谱比较窄,可以方便的使用温控模块控制波长的漂移,以便在光纤放大器中使用窄带滤波器来有效地减小放大系统中的ASE,从而有效地提高整个激光系统的性能。1550nm窄线宽半导体激光器的主要特点有:采用14针蝶形封装,内置温控单元,单模光纤输出,调制速率高。该激光器内置光纤布拉格光栅保证稳定的激光波长输出,具有较窄的输出光谱线宽和出色的边模抑制比。

3.2 激光器种子源结构

激光器种子源结构示意图如图3.1所示。种子源由半导体激光器、驱动电路模块、温度控制模块以及信号发生器组成。信号发生器主要用于实现产生电信号、控制脉冲的重复频率、控制驱动电流的幅度和宽度等功能，驱动电路模块起到放大电信号进而驱动激光器工作的作用，温度控制模块用于控制半导体激光器的工作温度，实现激光器的长时间稳定工作^[36]。

激光器用于脉冲激光输出方式工作时，信号发生器产生脉冲信号，通过驱动电路模块将信号放大后为激光器提供电脉冲，进而使激光器以脉冲方式工作，光脉冲经过光纤放大器放大后获得高峰值功率的脉冲激光输出。激光器用于连续激光输出方式工作时，控制电路模块控制信号发生器输出连续的调制信号，经驱动电路模块放大后为激光器提供调制电信号，使激光器输出连续的光信号，再经过光纤放大器之后获得连续的激光输出。

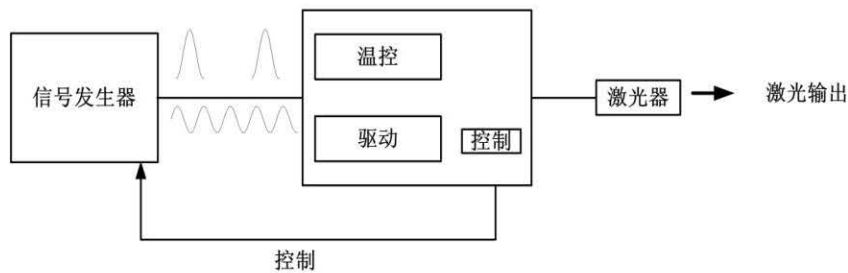


图 3.1 激光器种子源结构

3.3 采用 TO 封装的半导体激光器种子源输出结果

对 TO 封装的 DFB 半导体激光器进行直接的脉冲调制，在重复频率 50kHz 时，输出激光的平均功率为 $3.93\mu\text{W}$ ，中心波长为 1546.8nm，脉冲宽度为 1.5ns。通过使用 45GHz 探测器和 6GHz 示波器获得了种子源输出的光脉冲单次波形和多次叠加波形，以及 50kHz 时输出激光的光谱。图 3.2 为种子源的输出时间波形，图 3.3 为多次叠加时间波形，图 3.4 为种子源的输出光谱。从时间波形的叠加效果可以看出输出激光波形很稳定，说明种子源稳定性可以满足实际使用的要求。

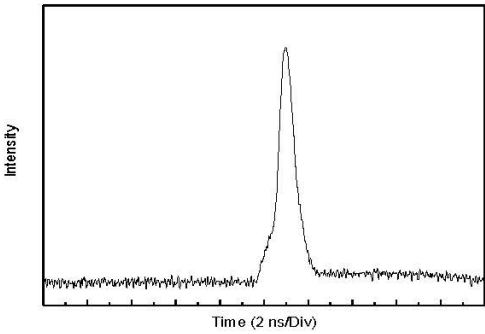


图 3.2 种子源的输出时间波形

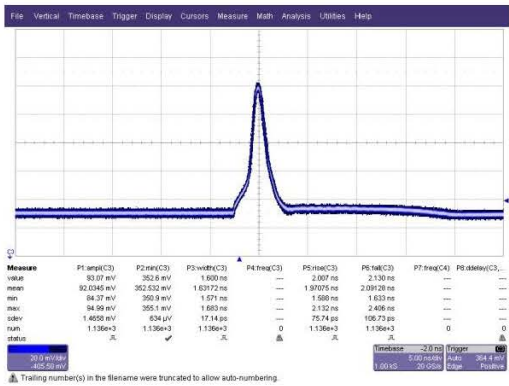


图 3.3 种子源的输出时间波形多次叠加

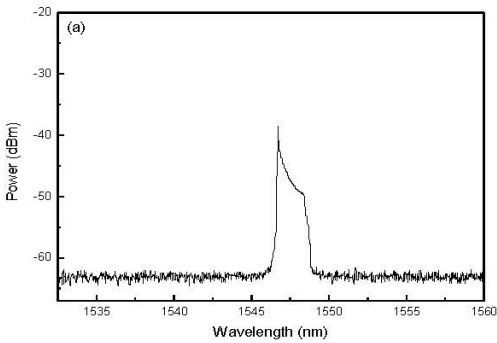
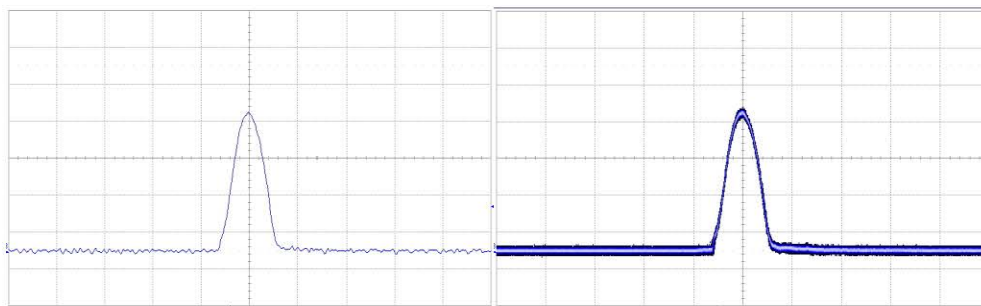


图 3.4 种子源的输出光谱

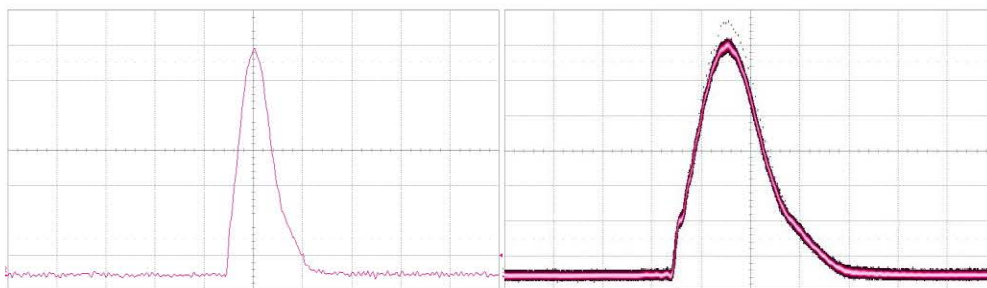
3.4 百皮秒脉冲种子源激光技术的研究

采用调制电路板来获得电脉冲输出，进而驱动和控制种子源激光器，可以方便地对种子源的脉冲宽度、重复频率和输出功率进行调节，以便用来获得较高光束质量的光脉冲输出，用于满足实际应用对光源的不同要求。我们使用光谱宽度为 0.1nm 的高质量 DFB 半导体激光器，对不同重复频率和脉冲宽度下种

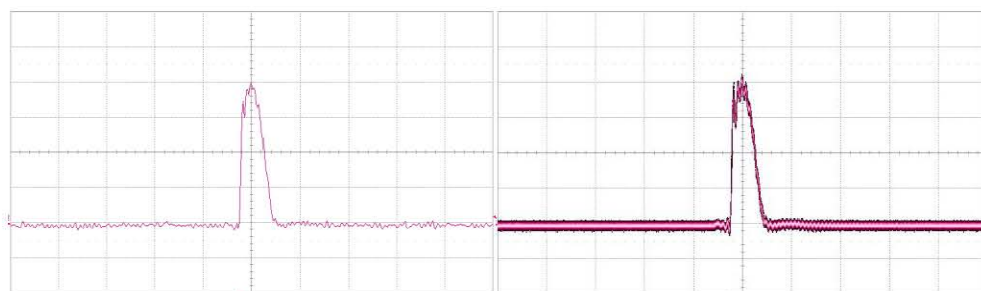
子源的脉冲激光输出进行了实验研究。在重复频率 30kHz 和 50kHz 条件下, 分别获得了脉冲宽度为 1.5ns、965ps 和 841ps 的脉冲激光输出, 图 3.5 为输出的时间波形。这些实验结果和技术为研究高峰值功率、窄脉冲宽度、MOPA 结构脉冲全光纤激光器打下了坚实的基础。



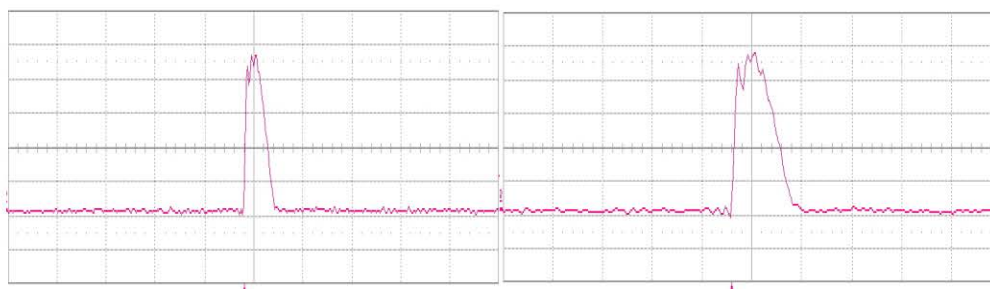
(1) 重复频率 30kHz 时, 激光器输出 1.5ns 脉冲



(2) 重复频率 50kHz 时, 激光器输出 1.5ns 脉冲



(3) 重复频率 50kHz 时, 激光器输出 965ps 脉冲



(4) 重复频率 50kHz 时, 激光器输出 841ps 脉冲

图 3.5 激光器种子源输出时间波形

第四章 高峰值功率全光纤激光器的实验研究

4.1 引言

激光测距技术具有测量精度高、准直性好、抗干扰能力强等一系列优点^[37], 激光测距仪是最简单的激光雷达系统。目前激光测距技术主要分为脉冲激光测距和相位激光测距两大类^[37]。脉冲激光测距是利用发射和接收激光脉冲信号的时间差来实现被测目标的距离测量^[38], 激光器采用脉冲激光输出方式工作时, 能获得较高的单脉冲能量和峰值功率, 传输距离远, 但容易造成较大的距离误差, 测距分辨率只能达到厘米级, 适合于远距离测量^[39]。相位激光测距是利用发射的调制光和被测目标反射的接收光之间光强的相位差包含的距离信息来实现对被测目标距离的测量^[38], 相位激光测距具有测距快、精度高的特点, 测距精度可以达到毫米级, 但由于峰值功率低, 只适合于近距离测量^[39]。

对激光测距来说, 要求激光器具有高峰值功率、窄脉冲宽度和较快的上升沿。窄脉冲的获得可以有效地提高输出激光的峰值功率, 提高测量距离。激光脉冲上升沿上升的越快越有利于提高时刻鉴别精度、减小时间延迟造成的距离误差, 进而提高测距精度。人眼安全是激光测距仪另一个重要的要求, 1.5 μm 波段是对人眼安全的激光波段。为满足人眼安全激光测距系统对激光发射源的要求, 目前大部分激光器均采用全光纤结构的基于1550nm种子源的主振荡功率放大(MOPA)的工作方式来获得激光输出^[40]。

结合两种激光测距技术的特点, 基于 MOPA 技术, 实验研究了人眼安全、单模全光纤激光器。激光器可同时实现脉冲激光输出和连续激光输出两种工作模式。由于 1550nm 高峰值功率全光纤激光系统是具有人眼安全特性的激光雷达的重要光源, 因此我们选用了中心波长在 1550nm 附近的 DFB 半导体激光器作为种子源, 采用单模掺 Er^{3+} 光纤作为前两级预放大器的增益光纤, 使用单模 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤来进行功率放大, 通过光纤熔接技术实现了单模掺 Er^{3+} 光纤放大器和双包层光纤放大器的级联, 获得了单横模脉冲激光输出。激光器用于脉冲激光输出时, 在重复频率 50kHz 时, 获得了脉冲宽度 1.7ns、峰值功率 5.1kW 的单模脉冲激光输出, 对应的脉冲上升沿为 370ps。用于连续激光输出时, 产生了功率为 0.5W 的连续调制信号激光输出。激光器能同时以两种

输出方式工作，用来满足两种激光测距技术的要求。

4.2 实验装置

MOPA 结构全光纤激光器的实验装置如图 4.1 所示。种子源激光器采用 DFB 半导体激光器，其输出激光的中心波长为 1550nm。光纤放大器包括两级预放大器和一级主放大器，前两级预放大器的每一级使用 12m 长 5.8/125 μm 单模掺 Er^{3+} 光纤作为增益光纤。预放大器的抽运源为 255mW、976nm 的半导体激光器。通过一个 980nm 的 40:60 光纤分束器分给两级放大器，分别和两个 980nm/1550nm 的 WDM 相连，将泵浦光耦合进两级放大器的单模掺 Er^{3+} 增益光纤中。在每一级放大器，输出端连接带通滤波器，用来滤除放大器中产生的 ASE，以防造成饱和而使光放大效率下降。使用光纤隔离器将放大器各级之间隔离开来，防止反馈光对前级系统造成干扰。

主放大器的增益光纤使用 4.5m 的 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤，纤芯直径为 7.5 μm ，内包层直径为 125 μm 。多模泵浦源是波长为 976nm 的多模光纤耦合输出的激光器，纤芯直径为 105 μm 。通过一个(2+1) $\times$ 1 的光纤合波器连接双包层增益光纤，合波器的光纤和与之相连接的光纤的纤芯直径、数值孔径相近，可以做到模式匹配、熔接损耗小，保证单模激光输出。在主放大器的输出端熔接高功率隔离器，防止光纤端面的反射，减小反射光对放大器的影响。

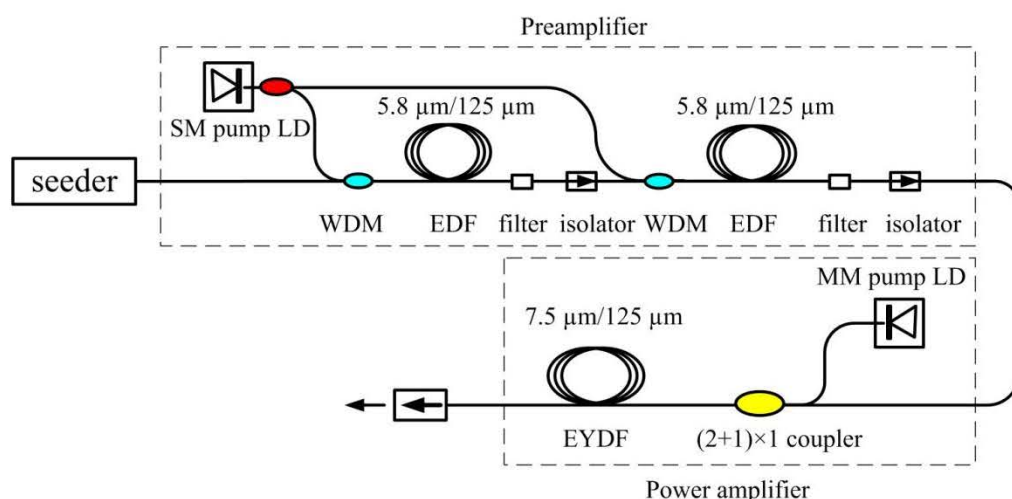


图 4.1 高功率纳秒脉冲全光纤 MOPA 激光系统

4.3 实验结果及分析

4.3.1 激光器用于脉冲激光输出时的实验结果

在不同的增益光纤长度下对第一级预放大器的输出功率随泵浦功率的变化情况进行了细致的实验研究，确定出了该级放大器的最佳增益光纤长度。如图 4.2 所示为第一级放大器中不同光纤长度下输出功率随抽运功率的变化情况。由图可知，在增益光纤为 12 米时放大效果最好，获得了较大的增益，所以第一级放大器的最佳长度确定为 12 米。对第二级放大器也进行了同样的最佳长度确定实验研究。

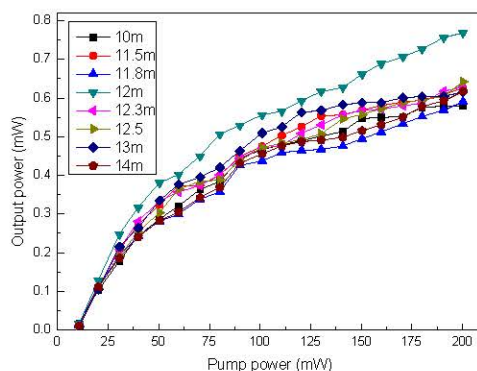


图 4.2 第一级放大器中输出功率随抽运功率的变化

在激光器的重复频率为 50 kHz、脉冲宽度为 1.7ns 时，预放大器的输出功率和泵浦功率成线性关系，说明放大器没有饱和，如图 4.3 所示。信号光经过预放大器后获得了最大 42mW 的平均功率输出，对应的峰值功率为 560W，相应的信号增益达到了 40dB。

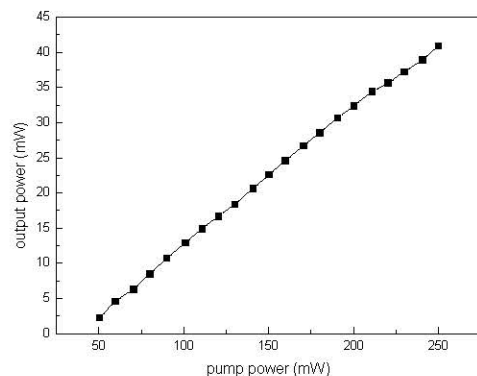


图 4.3 不同抽运功率下预放大器的输出功率

经过主放大器之后输出激光脉冲的平均功率随抽运功率的变化曲线如图

4.4 所示,在最大泵浦功率达到 4W 时,获得了平均功率 0.44 W,对应峰值功率 5.1kW 的单横模脉冲激光输出。

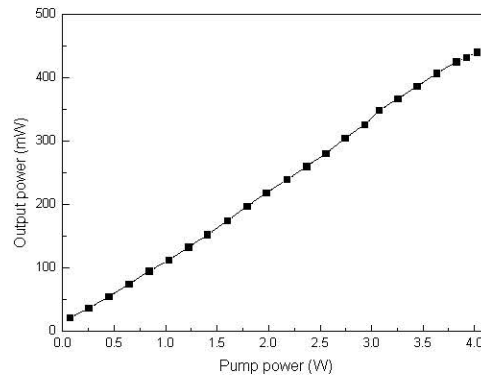


图 4.4 主放大器输出功率随抽运功率的变化

在重复频率 50kHz 时,测量了主放大器输出的光脉冲时域波形。如图 4.5 所示,激光器输出激光的脉冲宽度为 1.7ns,相应的脉冲上升沿为 370ps。窄脉冲的获得可以有效地提高输出激光的峰值功率,增加测量距离,脉冲上升沿的快速上升可以提高测距精度。

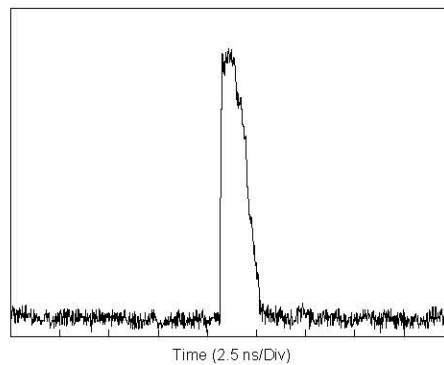
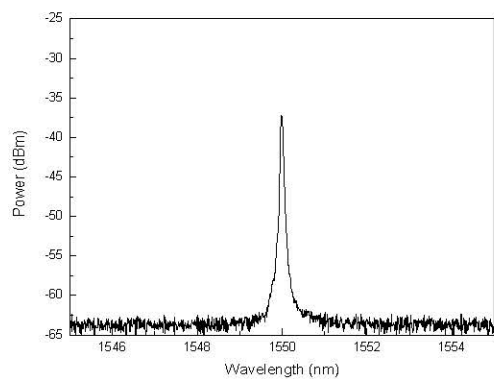
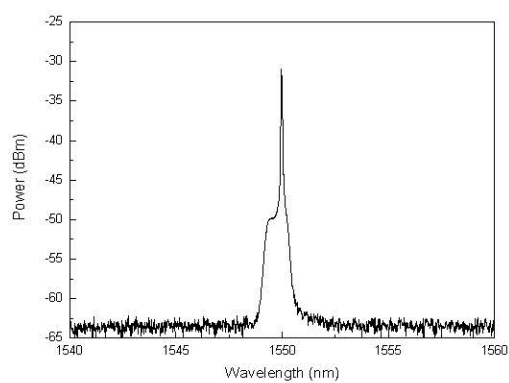


图 4.5 主放大器输出的光脉冲时域波形

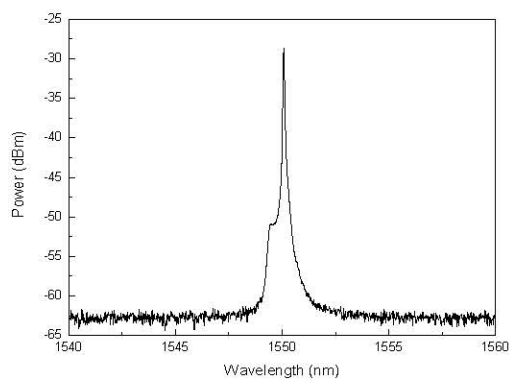
激光器输出激光脉冲的光谱如图 4.6 所示,光谱的信噪比大于 20 dB,底部的基座是滤波器带宽内的 ASE 经过放大器后造成的。在光纤放大系统实验中,有效地抑制了光纤中的非线性效应。通过使用单模掺 Er^{3+} 光纤和单模 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤,确保了单模激光输出,避免了脉冲光谱的变形。激光器输出的光脉冲基本可以满足脉冲激光测距的要求。



(a) 种子源



(b) 预放大器



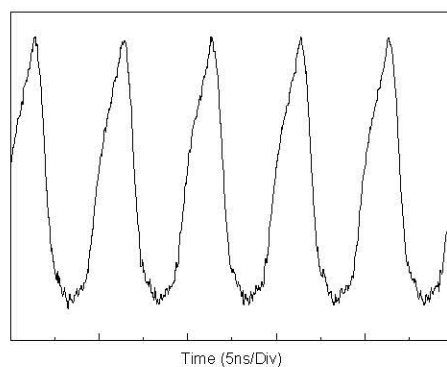
(c) 功率放大器

图 4.6 输出激光脉冲的光谱

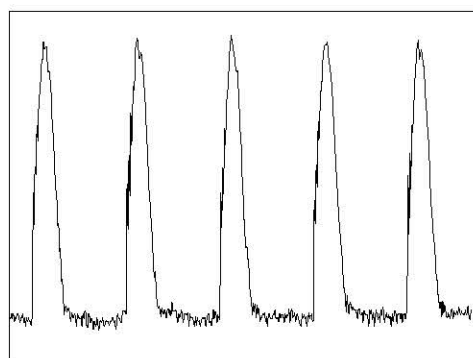
4.3.2 激光器用于连续激光输出时的实验结果

激光器用于相位激光测距时，种子源以连续调制方式工作，输出了平均功

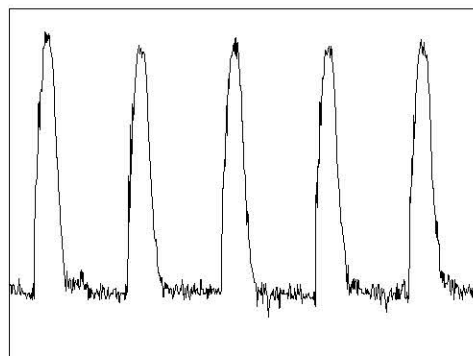
率为 1.06mW 的连续光信号,经过光纤放大器放大之后最大输出功率达到 0.5W。图 4.7 所示为激光器种子源和功率放大器输出的连续调制电信号和光信号时域波形。由图可知,激光器基本可以满足激光相位测距的要求。图 4.8 为连续调制下,种子源和主放大器输出的光谱。



(a) 电信号



(b) 种子源



(c) 功率放大器

图 4.7 输出的电信号与光信号时域波形

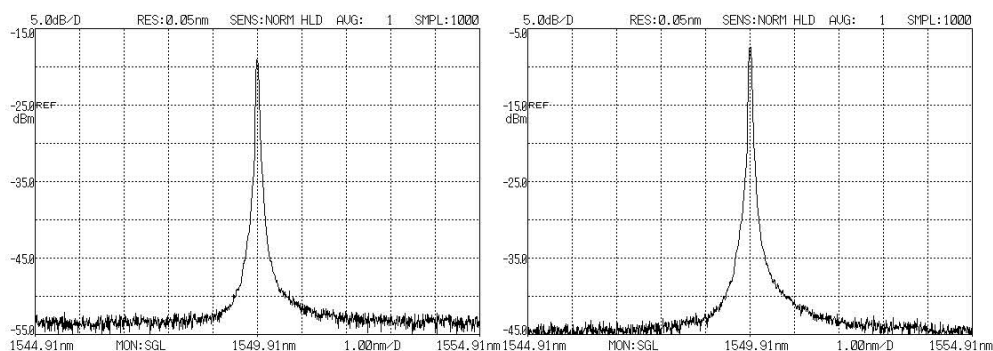


图 4.8 连续调制下种子源和主放大器输出的光谱

4.4 本章小结

在光纤放大系统中，非线性效应会限制输出激光的峰值功率。因此，使用纤芯直径较粗的增益光纤或者减小光纤的长度可以有效的降低非线性效应。然而，增加光纤的纤芯直径会增加输出激光的模式数，不能保证单模激光输出，这会对激光测距、激光三维成像产生影响。所以我们对增益光纤的纤芯直径进行了选择，通过实验进行了比较和研究，最后确定使用纤芯直径为 $7.5\mu\text{m}$ 的双包层光纤。减小增益光纤的长度同样会减小非线性效应，但是输出激光的峰值功率也会随之降低，无法提供高峰值功率的激光输出。在不改变增益光纤长度和纤芯直径的情况下，采用掺杂浓度较高的光纤是另一种降低非线性效应、提高输出激光峰值功率的有效方法。选用纤芯直径较小、掺杂浓度较高的单模双包层增益光纤可以保证单模激光输出的情况下，降低非线性效应进而提高峰值功率，获得高峰值功率的单模激光输出，以满足高分辨率激光雷达系统的要求。

我们实验研究了高峰值功率、人眼安全、单模、纳秒脉冲 MOPA 结构全光纤激光器，中心波长为 1550nm ，在 50kHz 时，获得了脉冲宽度 1.7ns 、峰值功率 5.1kW 的脉冲激光输出。放大器包括两级预放大器和一级主放大器，主放大器使用 Er:Yb 共掺双包层光纤作为增益介质。在实验中，我们有效地减小了非线性效应，获得了较长时间的稳定的单模激光输出。

为满足工程要求，激光器的峰值功率、脉冲宽度、光谱特性等参数还有待于进一步提高，以及需要在实验基础上进行工程化的实现。可以使用高掺杂的

Er:Yb 共掺双包层光纤来降低非线性效应并同时提高输出激光的峰值功率，需要调节种子源温控使输出激光的中心波长和滤波器带宽匹配，进而使用窄带滤波器来减少放大器中的 ASE，以便获得更好的激光输出。

第五章 高峰值功率全光纤激光器的工程化

5.1 激光器种子源的工程化

5.1.1 种子源脉宽调节

将种子源的温控设为 25 度，测试了种子 LD 和抽运 LD 的温控特性，保证温控电路模块能对激光器产生温控作用，以便后续进一步对种子源温控的调节。在重复频率 2kHz 时种子源输出的激光脉冲宽度为 3.8ns，为了减小脉冲宽度以提高种子源激光器的性能，首先将种子源脉宽调节到了 3ns。图 5.1 和图 5.2 为调节前后的脉冲时间波形。

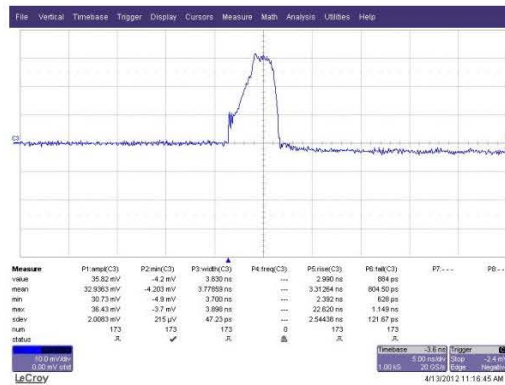


图 5.1 调节前脉宽 3.8ns 的时间波形

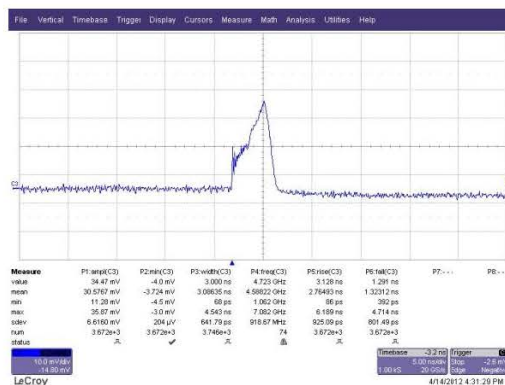


图 5.2 调节后脉宽 3ns 的时间波形

5.1.2 种子源温控调节

种子源温控模块的作用是防止激光器输出脉冲中心波长的漂移，以便使用窄带通滤波器，这样可以有效地减少放大器中的 ASE。放大器中所使用的带通滤波器中心波长为 1550 nm、带宽为 ± 0.5 nm，种子源温控的初始值设为 25

度, 可以通过调节种子激光器工作温度来与滤波器带宽匹配, 使激光器输出光脉冲的中心波长位于滤波器带宽的中间位置。图 5.3 为温控调节前后预放大器输出光谱图。由图可知, 温控调节前预放大器输出光谱中心波长为 1549.46nm, 温控调节之后中心波长为 1549.98nm, 基本可以和滤波器匹配。

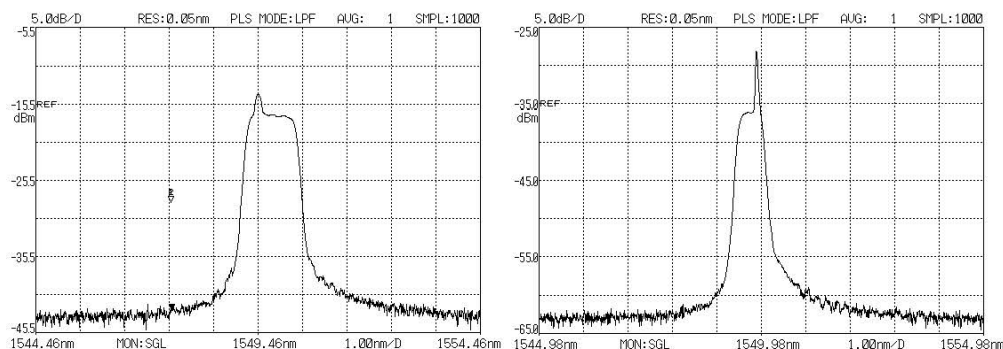


图 5.3 (1) 温控调节前预放大器输出光谱, (2) 温控调节之后输出光谱

5.1.3 种子源输出功率调节

种子源激光器输出的功率必须达到一定程度才能保证信号经过放大器后输出光谱的信噪比在 20dB 以上, 以满足实际使用的要求, 如果输入光纤的信号太弱, 将会产生较强的 ASE, 而放大后输出的信号光很弱, 同时光纤放大器的放大效率也会很低。首先通过提高电信号的电流强度, 来提高种子激光器输出激光的平均功率。电脉冲的脉冲宽度、电流强度直接决定种子源光脉冲的脉冲宽度和输出功率。图 5.4 (1) 为电路板输出的电信号脉冲。如图所示, 在重复频率为 2kHz 时, 电信号脉冲宽度为 4.6ns, 此时相应的种子源光脉冲的脉宽为 3.8ns, 如图 5.4 (2) 所示, 两者之间的变化与半导体激光器的响应速度有关, 不同的激光器响应速度会对驱动电路的电脉冲宽度产生相应的响应变化, 导致输出激光的脉冲宽度的不同, 但脉冲形状基本不发生变化。

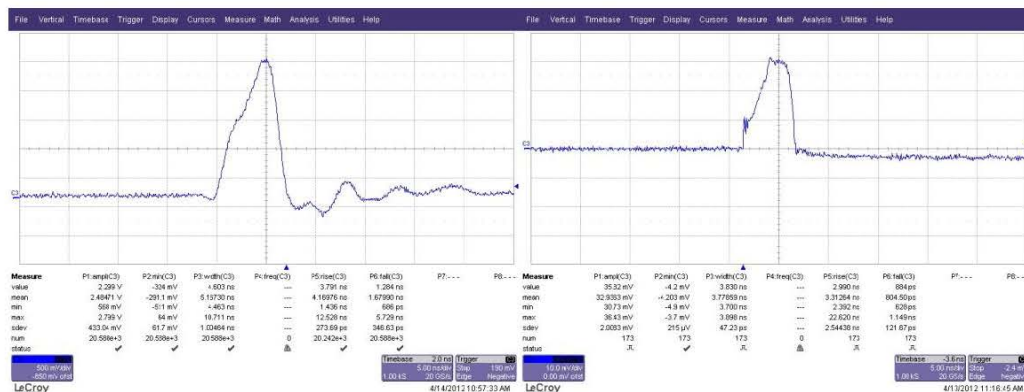
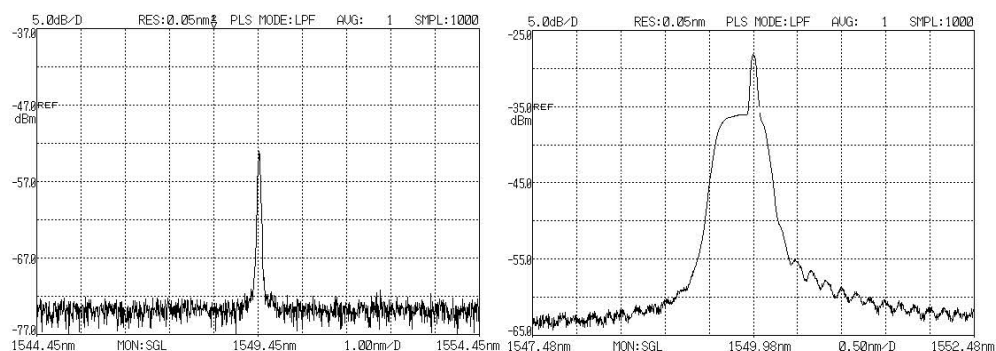
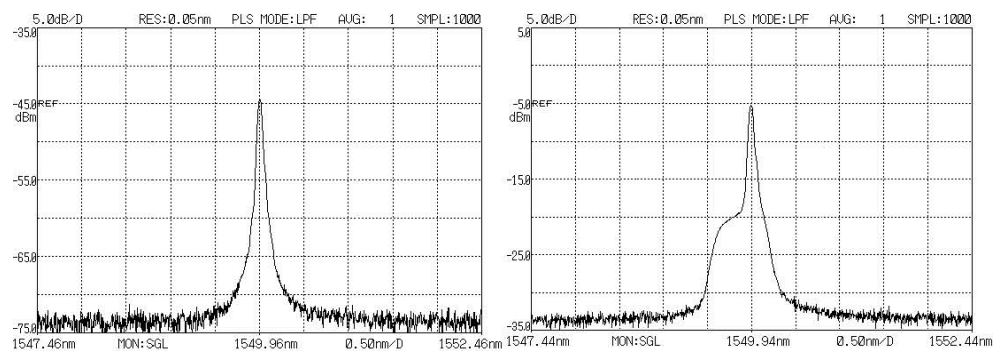


图 5.4 (1) 2kHz 时输出的电信号脉冲 (2) 2kHz 时脉宽 3.8ns 的光脉冲

在不同的种子光功率下对种子源和预放大器输出的光谱进行了研究，目的是通过提高种子源功率来提高放大器输出光谱的信噪比，来获得良好质量的激光输出。在重复频率 50kHz 条件下，将种子源输出功率调节到了 $2.7\mu\text{W}$ ，获得了比较好的激光输出。图 5.5 为不同种子源功率下的种子源和预放大器输出的光谱图。



(1) 重复频率 2kHz、功率 20nW 时输出光谱



(2) 重复频率 50kHz、功率 220nW 时输出光谱

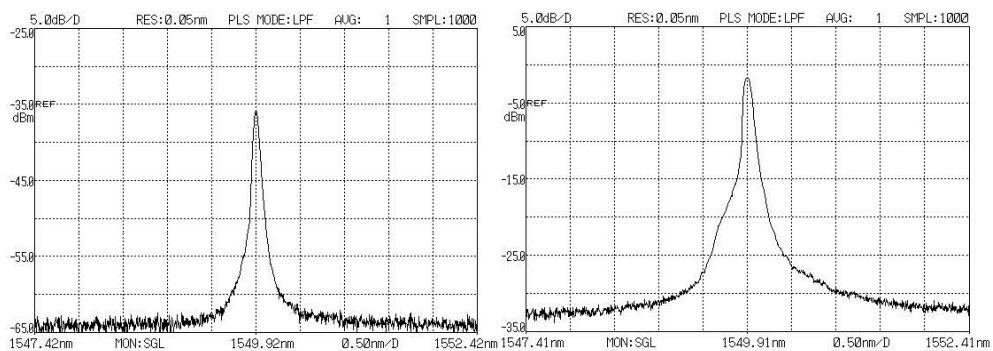
(3) 重复频率 50kHz、功率 $2.7\mu\text{W}$ 时输出光谱

图 5.5 不同种子源功率下的种子源和预放大器输出的光谱

5.2 光纤放大器的工程化

激光器工程化研究时的结构示意图如图 5.6 所示。工程化实验中使用了光谱宽度为 0.1nm 的 DFB 半导体激光器，输出激光的脉宽和光谱比较窄，加上温控的作用，可以使用线宽 1.6nm 的窄带通滤波器，这样可以有效地减少放大器中的 ASE，提高放大信号的输出功率和输出光束质量。种子源激光器调节温控后输出激光的中心波长为 1549.98nm，可以很好的和滤波器匹配。

功率放大器的增益光纤为 2.3m 高掺杂的 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤，纤芯直径为 $6\mu\text{m}$ ，包层直径为 $125\mu\text{m}$ ，数值孔径为 0.18，在 915nm 处的吸收系数为 0.83 dB/m。使用高掺杂浓度的双包层增益光纤，这样就可以在较短长度下既可以降低非线性效应的阈值，又可以提高增益饱和功率，有效地降低非线性效应的限制，进而提高输出激光的峰值功率。并采用与增益光纤匹配的 SMF-28 单模光纤输入的高功率隔离器，这样可以通过光纤匹配来有效地减小焊接损耗。

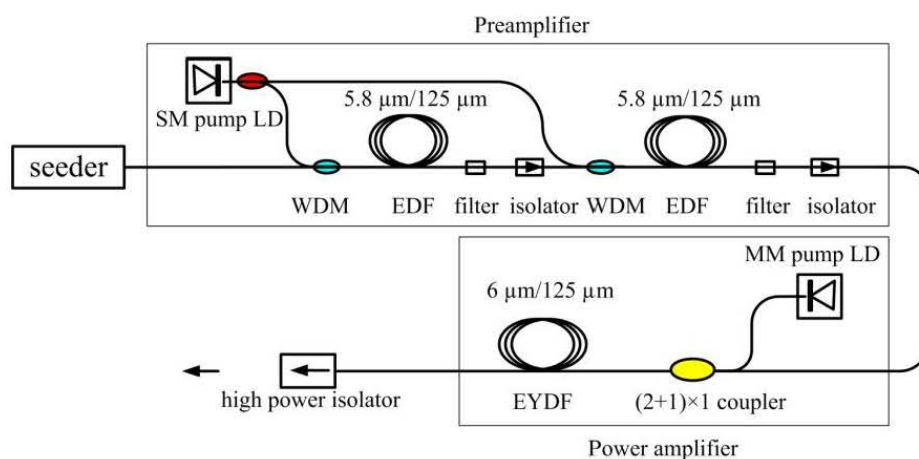


图 5.6 激光器工程化时的结构

5.3 光纤拉锥技术的研究

在高峰值功率全光纤激光器中，随着功率的增高，使用纤芯较粗的光纤可以有效地降低非线性效应，所以不同的光纤放大器中纤芯直径和数值孔径很可能会不同。使用大模场面积的双包层光纤来进行主放大器的功率放大，进而降低非线性效应、提高峰值功率是目前 MOPA 结构全光纤激光器的研究热点。因此，在激光器工程化实现过程中，我们也对纤芯直径为 $20\mu\text{m}$ 的双包层光纤进行了研究。通常预放大器使用单包层光纤输出，纤芯直径在 $6\mu\text{m}$ 左右，数值孔径大约为 0.23，而主放大器常使用大模场面积的双包层光纤，纤芯直径很可能

在 $20\mu\text{m}$ 以上, 数值孔径在 0.2 左右。这样的两种光纤直接熔接在一起会使损耗加大也会增加输出激光的模式数, 因此会出现所谓的模式不匹配问题。相应的也出现了许多对模式匹配问题的研究工作, 采用光纤拉锥技术来实现模式匹配是解决这一问题的有效方法之一。光纤拉锥技术实现模式匹配的原理为: 将光纤的拉锥部分看成一个模式匹配器^[18]。

由于纤芯直径和数值孔径不同, 从单模光纤输出的部分信号光并不会耦合到双包层光纤的纤芯中, 而是会进入到包层中, 这部分能量在双包层增益光纤中是会被放大的, 只会沿包层传输, 进而在通过高功率隔离器的时候损失掉, 这样在主放大器中被放大的就只有进入纤芯中的那一部分信号光, 所以造成了极大的能量损失。有研究表明两种纤芯直径和数值孔径相差较大的光纤直接熔接在一起会有近一半的功率损失掉, 而使用熔融光纤拉锥技术焊接不同纤芯直径的光纤, 效率可以达到 90% 以上, 除了正常的插入损耗之外其它损耗很小, 而且可以做到模式匹配^[15]。

因为激光器要求高峰值功率, 为了既满足要求又能有效地降低非线性, 获得较好的光谱输出, 在主放大器中尝试使用纤芯直径 $20\mu\text{m}$ 的 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤。因此研究了光纤熔融拉锥技术来克服损耗和模式匹配问题。通过调整 PM4.0 熔接机的放电位置和拉锥时间等参数, 来获得较好的拉锥熔接方法, 尽量降低损耗。进行了大量的拉锥实验, 测量了输出功率损耗情况。将直径较小的光纤放在右侧, 直径较大的光纤放在左侧, 在右-50 放电位置、800ms 拉锥时间的参数设定下获得了较好的实验结果, 几乎 85% 的能量很好地耦合到了纤芯中。图 5.7 为实验中的拉锥效果图。

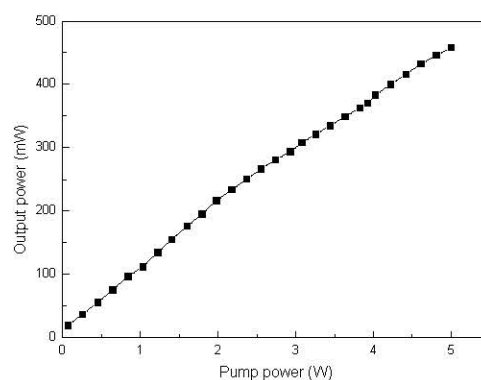




图 5.7 光纤拉锥焊接实验

5.4 全光纤激光器工程化后的结果

在重复频率 50kHz 时，激光器种子源最终输出的脉冲宽度为 1.2ns、平均功率为 4.2μW，经过预放大器后输出激光的平均功率达到 46mW，对应的峰值功率为 0.76kW，预放大器获得了大于 40dB 的增益。经过主放大器后输出激光脉冲的平均功率和峰值功率随抽运功率的变化曲线如图 5.8 所示，在抽运光功率达到 5W 时，获得了平均功率 458mW，对应峰值功率 7.6 kW 的单横模脉冲激光输出。



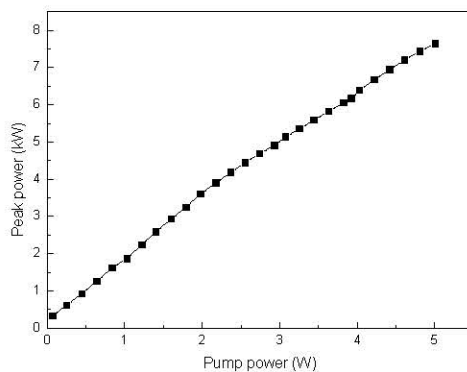


图 5.8 重复频率 50kHz 时激光器输出功率随抽运功率变化

通过使用 45GHz 探测器和 6GHz 示波器，在 50kHz 重复频率时，获得了种子源和主放大器输出的光脉冲时域波形。图 5.9 为时域波形图，输出激光脉冲的形状与种子光脉冲的形状没有发生太大的变化。

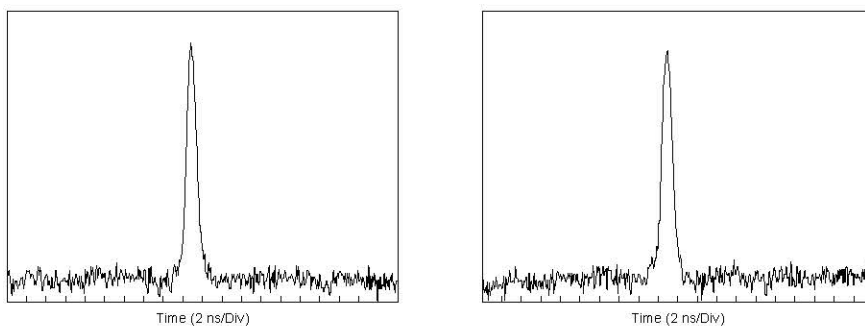
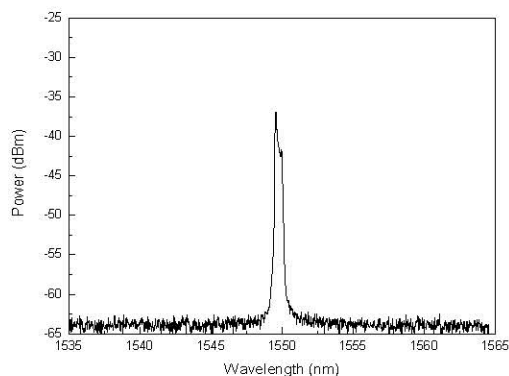
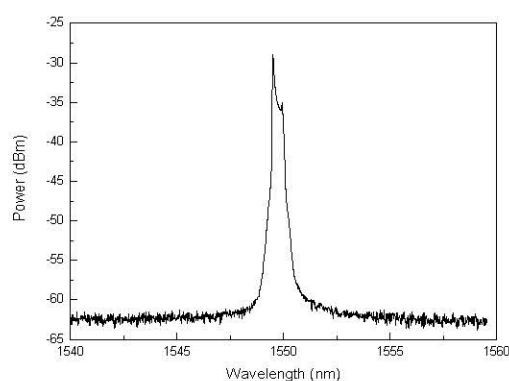


图 5.9 种子源和主放大器输出的光脉冲时域波形

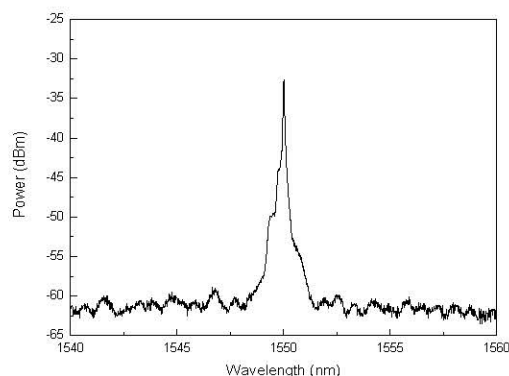
输出激光的光谱如图 5.10 所示，光谱的信噪比大于 20 dB，光谱底部的变宽是滤波器带宽内的 ASE 经过放大器后造成的。



(a) 种子源



(b) 预放大器



(c) 功率放大器

图 5.10 输出激光脉冲的光谱

选用掺杂浓度较高的增益光纤，可以有效地抑制光纤中的非线性效应，提高输出激光的峰值功率。通过使用 2.3m 纤芯直径为 $6\mu\text{m}$ 、在 915nm 处的泵浦吸收为 0.83dB/m 的单模 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤，确保了单模激光输出，避免了由于非线性效应的作用使脉冲光谱变形或展宽，有效提高峰值功率的同时获得了良好的输出光束质量。

将激光器调试好之后，进行了工程样机的装配。激光器机械结构上采用了紧凑性和稳定性的设计，装配过程中，对电路芯片、种子激光器、单模泵浦激光器和多模泵浦激光器等器件进行了良好的散热处理。如图 5.11 为激光器工程化样机。



图 5.11 激光器工程化样机

第六章 激光器用于高分辨率三维成像激光雷达实验

6.1 三维成像激光雷达系统组成

基于我们自己研制的高峰值功率、窄脉冲宽度、单模脉冲激光输出的全光纤激光器，结合光机二维扫描系统，采用了一种测距精度高、实现方法简单的数字门延时测距原理，很好的实现了高分辨率三维成像激光雷达。可以实现高精度稳定的时间间隔测量，测距分辨率可达 125ps、时间间隔测量范围最大可以达到 200ms。由于时刻鉴别是测距精度高低的主要影响因素之一，所以我们采用了一种抗噪声能力强、鉴别稳定的方法来实现时刻鉴别，使得触发时刻不受信号脉冲幅度和脉冲宽度的影响。使用脉冲宽度较窄，脉冲上升沿上升较快的脉冲激光器，可以有效地减小时刻鉴别造成的测距误差，进而提高测距精度。在此基础之上，进行了测距精度验证性实验，实验结果表明测距精度可以达到 $\pm 7.5\text{cm}$ 。该方法采用测距系统和单点二维扫描系统相结合的方法来实现激光三维成像的功能，扫描成像结果表明基于全光纤激光器的高分辨率三维成像激光雷达可以实现三维成像的功能。

我们研制的三维成像激光雷达系统包括全光纤激光器、振镜扫描系统、发射和接受光学系统、测距及补偿系统、信号处理及控制系统等。激光雷达的系统结构如图 6.1 所示。其中激光发射系统采用高峰值功率、单模、全光纤激光器，在重复频率为 50kHz 时，输出激光的峰值功率达到 7.6kW，脉冲宽度为 1.2ns。光机扫描系统采用 XY 振镜实现二维扫描，结合 APD 探测系统和 TDC-GP1 测距系统在控制模块的控制下构成了三维成像激光雷达的主要组成部分，实现了三维成像的功能。

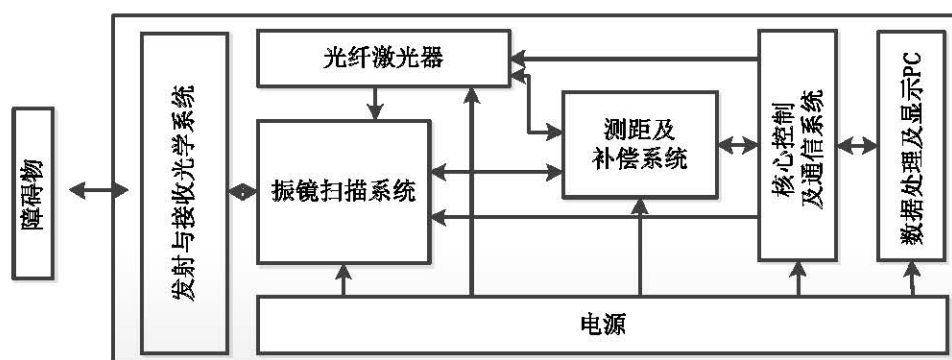


图 6.1 三维成像激光雷达的系统结构

6.2 激光雷达三维成像实验结果及分析

基于以上各模块的性能，对目标空间进行了扫描成像实验。图 5.2 显示了扫描数据在 Matlab 环境下呈现出的二维彩图和三维立体图，图中不同的颜色代表不同的探测距离。图像表明如电脑屏幕、地板和钢管之类的对光有较强反射的物体，图像中呈现出深蓝色的部分，接收系统没能探测到或者探测到的信号很弱；像木板、纸盒、塑料、泡沫等对光反射较弱的物体接收系统都可以探测到，而且从图像质量上可以看出成像效果基本可以满足要求。

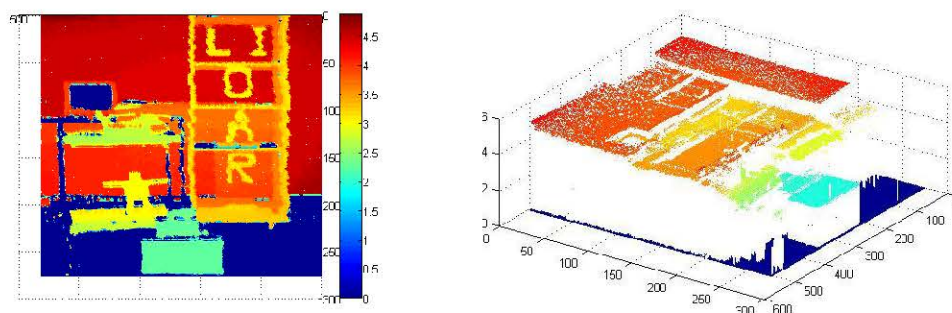
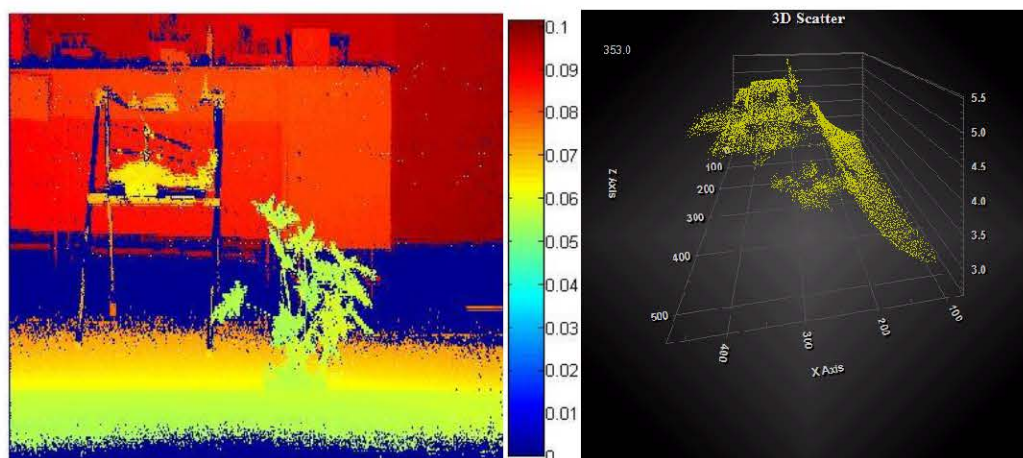


图 6.2 扫描成像结果

在采用了专业的图像显示软件后，又对人、植物、模型、桌子等物体进行了成像实验，给出了扫描成像结果二维和三维图。通过对静止目标的成像实验结果表明，探测到的三维图像与目标外形轮廓一致，基本实现了三维成像的功能。图 6.3 显示了激光雷达对目标空间有三维成像的能力，可以同时获得方位、俯仰和距离信息，如果再采集幅度信息同时也可以采集到目标的灰度信息。



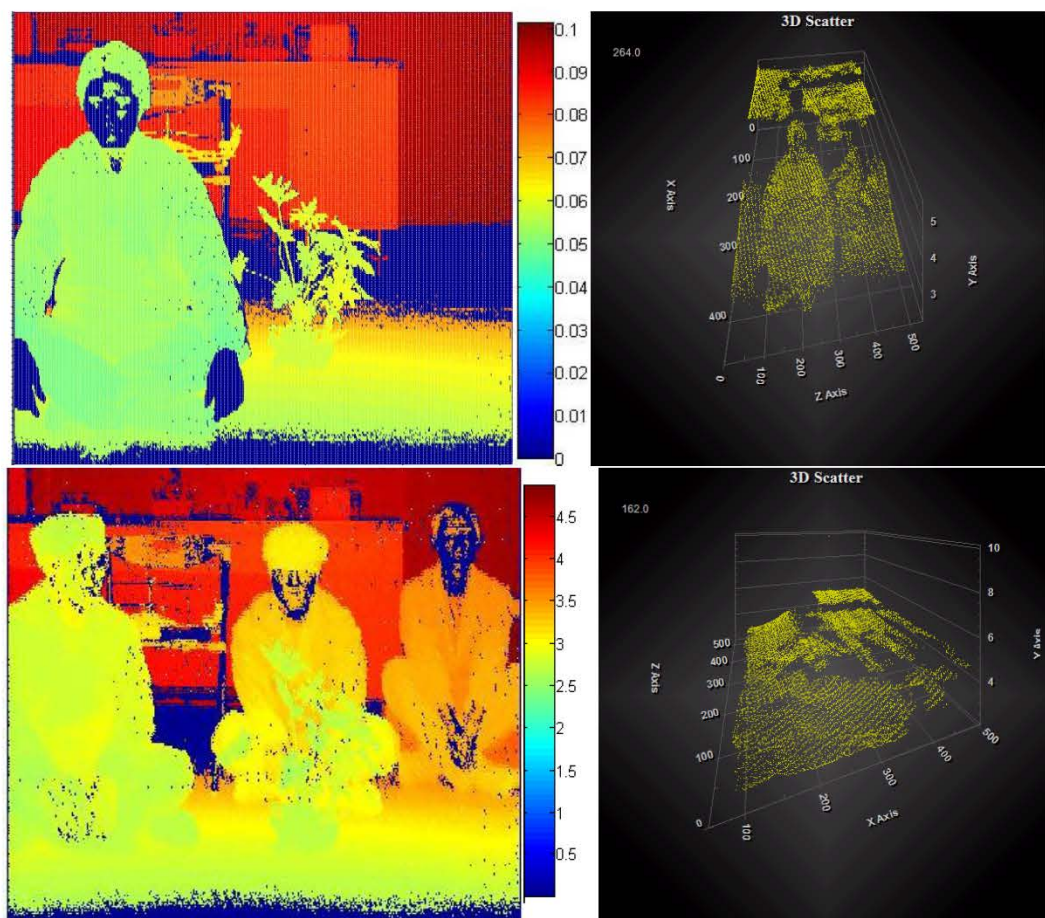


图 6.3 目标空间扫描成像结果

采用独立设计的全光纤激光器、单点二维振镜扫描机构、APD 接收系统、TDC-GP1 测距系统和显示控制软件构成了三维成像激光雷达样机。扫描实验结果证明所研制的三维成像激光雷达实现了对目标三维成像的功能，并且为实现扫描距离更远，精度更高的三维扫描实验提供了设计参考。采用合适的方法进行了验证性实验，获得了很好的扫描图像，从图像质量上可以看出基本可以分辨出目标物，说明我们研制的全光纤激光器性能很好，可以满足激光雷达的使用要求。

第七章 总结与展望

本论文主要致力于种子光主振荡功率放大(MOPA)结构高峰值功率、全光纤脉冲激光器技术的研究, 以及其在激光雷达、激光测距、激光三维成像领域的应用。

在脉冲光纤激光器基本理论的基础上, 首先对全光纤激光器的种子源进行了研究, 给出了种子源的结构和组成部分, 并进行了采用 TO 封装的半导体激光器作为种子源的实验研究, 以及对百皮秒脉冲种子源激光技术进行了研究, 获得了不同脉冲宽度的激光输出, 脉宽最窄达到 841ps。

对高峰值功率全光纤脉冲激光器进行了实验研究, 给出了实验结果及分析。选用 1550nm 附近的 DFB 半导体激光器作为种子源, 预放大器采用单模掺 Er^{3+} 光纤作为增益介质, 使用纤芯直径为 $7.5\mu\text{m}$ 、包层直径为 $125\mu\text{m}$ 的 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤来进行功率放大, 获得了中心波长 1549.8nm, 脉冲宽度 1.7ns 的脉冲激光输出, 在重复频率为 50kHz 时, 峰值功率达到 5.1 kW。激光器能同时以两种输出方式工作, 用于连续激光输出时, 产生了功率为 0.5W 的连续调制信号激光输出。

为满足工程要求, 将激光器在实验基础上进行了工程化实现。首先对激光器种子源的脉宽、温控及输出功率进行了调节; 然后对光纤放大器进行了工程化设计, 使用高掺杂的 $\text{Er}:\text{Yb}$ 共掺双包层光纤来降低非线性效应, 提高峰值功率; 进一步阐述了光纤拉锥技术对不同纤芯直径的光纤进行熔接的研究, 实验表明几乎 85% 的能量很好地耦合到了纤芯中; 最后给出了激光器工程化后的结果, 以及工程化样机的实现。

将自行研制的高峰值功率、窄脉冲宽度、单模脉冲激光输出的全光纤激光器用于高分辨率三维成像激光雷达, 进行了三维成像实验, 给出了实验结果, 验证了激光器的性能。

激光器的峰值功率、脉冲宽度、输出脉冲和光谱质量等特性是 MOPA 结构全光纤脉冲激光器的关键参数, 对于激光雷达、激光测距、激光三维成像系统的整体性能起到至关重要的作用, 所以进一步提高激光器的性能显得尤为重要, 这是我们今后努力的方向也是需要克服的难题。

参考文献

- [1] B. Koetz, F. Morsdorf, G. Sun, K. J. Ranson, K. Itten, B. Allgöwer, “Inversion of a Lidar Waveform Model for Forest Biophysical Parameter Estimation”, IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS, 3(1), 2006, p.49-53.
- [2] 倪树新, 李一飞. 军用激光雷达的发展趋势. 红外与激光工程, 2003, 32(2): 111 ~114.
- [3] C. G 巴克曼. 激光雷达系统与技术. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [4] Gao Cunxiao Zhu Shaolan, et al. Eye-safe, high-energy, single-mode all-fiber laser with widely tunable repetition rate. Chinese Optics Letters, 2009, 7(7): 611-613.
- [5] Y. Liu, J. Liu, and W. Chen, “Eye-safe, single-frequency pulsed all-fiber laser for Doppler wind lidar”, Chin. Opt. Lett. 9, 09064, 2011.
- [6] J. E. Koroshetz, “Fiber lasers for lidar”, in *Proceedings of OFC 2005* OFJ4.
- [7] 孟庆季, 张续严, 周凌, 王超, 机载激光 3D 探测成像系统的关键技术, 中国光学, 4 (3): 327-339, 2011.
- [8] 胡春生, 脉冲半导体激光器高速三维成像激光雷达研究, 国防科技大学博士学位论文, 2005.
- [9] J. J. Zayhowski, A. L. Wilson Jr., Miniature eye-safe laser system for high-resolution three-dimensional lidar, OSA/ASSP 2007.
- [10] Robert C. Stoneman, Andrew I. R. Malm, High-power Er:YAG laser for coherent laser radar, OSA/CLEO 2004.
- [11] G. Canat, L. Lombard, A. Dolfi, M. Valla, C. Planchat, B. Augere, P. Bourdon, V. Jolivet, C. Besson, Y. JaouÄen, S. Jetschke, S. Unger, J. Kirchhof, E. Gueorguiev, and C. Vitre, High brightness 1.5 μ m pulsed fiber laser for lidar: from fibers to systems, Fiber Integrated Opt. 27, 422, 2008.
- [12] 刘源, 刘继桥, 陈卫标, 人眼安全相干多普勒测风激光雷达全光纤单频激光器, 中国激光, 2009, 36 (7): 1857-1860.
- [13] 潘洪涛, 红外/激光双模制导中激光雷达技术研究, 哈尔滨工业大学硕士论

- 文, 2009.
- [14] V. N. Philippov, C. Codemard, C. Alegria, J. K. Sahu, J. Nilsson, and G. N. Pearson, High-energy in-fiber pulse amplification for coherent lidar application, *Opt. let.* 29, 22, 2004.
- [15] G. Canat, L. Lombard, A. Dolfi, M. Valla, C. Planchat, B. Augere, P. Bourdon, V. Jolivet, C. Besson, Y. JaouÄen, S. Jetschke, S. Unger, J. Kirchhof, E. Gueorguiev, and C. Vitre, High brightness 1.5 μ m pulsed fiber laser for lidar: from fibers to systems, *Fiber Integrated Opt.* 27, 422, 2008.
- [16] Y. Feng, J. Zhou, S. Du, W. Chen, All-fiber pulsed laser transmitter for space-based 3D imaging lidar, *CLEO Pacific Rim* 2009.
- [17] 高存孝, 脉冲光纤激光器和放大器技术的研究, 中国科学院研究生院博士学位论文, 2008.
- [18] 高存孝, 朱少岚, 曹宗英等, 高重复频率、单模纳秒脉冲全光纤激光器, *光子学报*, 2009, 38(10): 2481-2484.
- [19] V. N. Philippov, J. K. Sahu, C. Codemard, W. A. Clarkson, J. N. Jang, J. Nilsson, and G. N. Pearson, "All-fiber 1.15 mJ pulsed eye-safe optical source", in *Proc. of SPIE* (2004) 5335, 2004.
- [20] M. Savage-Leuchs, E. Eisenberg, A. Liu, J. Henrie, and M. Bowers, "High pulse energy extraction with high peak power from short-pulse, eye safe all-fiber laser system", in *Proc. of SPIE* 2006, Vol. 6102, 2006.
- [21] M. B. Jimenez, E. A. Kuzin, B. I. Escamilla, et al. Two-Stage Single-Pump Er-Doped Fiber Amplifier with 55-dB Amplification ns-Long Pulses. *Proc. of SPIE*, 2007, 6453(22): 1-9.
- [22] 段云锋, 黄榜才, 张鹏等, 全光纤结构的脉冲光纤放大器, *中国激光*, 2007, 34 (10): 1379-1382.
- [23] 段云锋, 张鹏, 黄榜才等, 全光纤结构的两级分布式窄线宽双包层光纤放大器, *中国激光*, 2009, 36 (3): 640-642.
- [24] 伍波, 杜伟敏, 侯天晋等, 高功率窄线宽光纤放大器及放大线宽特性, 中

- 国激光, 2009, 36 (7): 1866-1869.
- [25] B. Peng, H. Zhang, M. Gong, and P. Yan, All-fiber eye-safe pulsed laser with Er-Yb co-doped multi-stage amplifier, *Laser Physics*. 19, No.10, 2009.
- [26] J. Swiderski, D. Dorosz, M. Skoreczakowski, et al. Ytterbium-Doped Fiber Amplifier with Tunable Repetition Rate and Pulse Duration. *Laser Physics*, 2010, 20(8): 1738-1743.
- [27] J. Zhou, P. Yan, S. Yin, D. Wang, and M. Gong, all-fiber cascaded ytterbium-doped nanosecond pulsed amplifier, *Chin. Opt. Lett.* 8, No. 5, 2010.
- [28] 陈爽, 高功率主振荡功率放大光纤激光系统主放大级关键技术理论与实验研究, 国防科学技术大学博士论文, 2009.
- [29] 林东风, 瓦级 MOPA 结构 ps 脉冲光纤激光器, 国防科学技术大学硕士论文, 2008.
- [30] R. Paschottar, J. Nilsson, C. A. Tropper, Ytterbium-Doped Fiber Amplifier. *IEEE J. Quantum Electron*, 1997, 33(7): 1049-1056.
- [31] 丁广雷, 超短脉冲光纤激光器和放大器的研究, 中国科学院研究生院博士学位论文, 2007.
- [32] 丁广雷, 沈华, 杨玲珍, 王屹山, 赵卫, 陈国夫, 高重复频率飞秒掺镱光纤放大器, *强激光与粒子束*, 18 (6): 886-889, 2006.
- [33] 卢秀权, 陈绍和, Yb³⁺光纤放大器, *中国激光*, 2001, 28 (3): 209-214
- [34] R. C. Giles, E. Desurvire, Modeling Erbium-Doped Fiber Amplifiers, *Journal of Light wave Technology*, 1991, 9(2): 271-283.
- [35] T. Georges, E. Deleuaque, Analytic Modeling of High-Gain Erbium-Doped Fiber Amplifier. *Optics Letters*, 1992, 17(16): 1113-1115.
- [36] 苏君, 邱琪, 谢军, 廖云, 史双瑾, 1.064 μm 半导体激光脉冲种子源的设计, *应用光学*, 2008, 29(6): 967-969.
- [37] 刘坤, 陈芳. 激光测距方法及激光器的发展. *科技信息*, 2008, 30: 387-388.
- [38] 程义涛, 杨进华. 相位激光测距发射系统实验研究. *长春理工大学学报 (自然科学版)*, 2010, 33 (1): 29-31.

- [39] 荆伟, 赵振明, 高峰. 测量范围可调的高精度激光相位测距系统研究. 科技创新导报, 2012, 5: 13-14.
- [40] 卢常勇, 王小兵, 郭延龙等. 1.5 μm 波长人眼安全的军用激光测距机及其进展, 激光与光电子学进展, 2005, 42(3): 32-35

在读期间发表的文章

1. Yun Jian, Gao Cunxiao, Zhu Shaolan, Sun Chuandong, Dong Lijun, Optimization of the High Repetition Rate All-Fiber Two-Stage Ytterbium-Doped Fiber Amplifier, OIT2011.
2. Jian Yun (云 剑), Cunxiao Gao (高存孝), Shaolan Zhu (朱少岚), Chuandong Sun (孙传东), Haodong He (何浩东), Li Fen (冯 莉), Lijun Dong (董利军), and Linqun Niu (牛林全). High-peak-power, single-mode, nanosecond pulsed, all-fiber laser for high resolution 3D imaging lidar. Chinese Optics Letters. (Accepted)

致谢

伴随着这篇文章的完成，我的学生时代也即将结束。回想起这几年的学习生活，想起的是曾经帮助和关心过我的人，在此表示衷心的感谢。

感谢我的导师孙传东老师和朱少岚老师三年来对我的关心和照顾。孙老师在工作和学习上给予了我极大的帮助，对我做人做事的方式产生了深远的影响。朱老师对待科研工作严谨认真的态度是我学习的榜样，对待生活积极乐观的心态给予了我极大地影响。作为导师，朱老师给我提供了良好的学习和科研环境，帮助我们把握发展的方向，在此表示衷心的感谢。

感谢高存孝师兄在课题研究中给予的帮助与指导，高师兄严谨认真的科研态度和工作作风给予了我极大的影响和帮助，是我学习的榜样和楷模，为我今后走上工作岗位产生了深远的影响。

感谢何浩东师兄、冯莉师姐、曹宗英师兄、张伟师兄、杨直师兄，你们不仅给予我学习和科研上的指导，也帮我指点人生的道路。

感谢牛林全师兄、董利军同学、李泽同学、李晓辉师兄、唐伟东师兄、王国玺同学、辛丽伟同学、段丽娜同学、刘凯同学、程攀同学、郭建邦同学，感谢你们对我的关心与帮助，让我愉快的学习和生活。感谢与我共同学习生活过的 2009 级所有同学。

感谢瞬态光学与光子技术国家重点实验室为我提供了良好的工作环境及实验条件和设备。

感谢先进光学仪器实验室水下课题组的何俊华老师。

感谢研究生部的李晋芳主任、张波主任、赵萍老师、王喆老师，感谢他们对我的培养和帮助。

最后，我要特别感谢我的家人，感谢父母一直以来的无私奉献和关爱，感谢女友丁瑞烨对我的悉心照顾和关心，你们是我求学路上最坚定的支持者，是我工作、学习中进取精神的源泉。

在此衷心感谢所有关心和支持过我的人，谢谢！