



© 郭 劲 谢冀江 阮 鹏 等著

# 放电引发非链式脉冲 氟化氙激光器

Electric Discharge Non-Chain  
Pulsed DF Laser



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

# 放电引发非链式脉冲 氟化氙激光器

Electric Discharge Non - chain Pulsed DF Laser

郭 劲 谢冀江 阮 鹏



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

放电引发非链式脉冲氟化氙激光器/郭劲等著.

—北京:国防工业出版社,2017.7

ISBN 978-7-118-11253-5

I. ①放… II. ①郭… III. ①脉冲激光器

IV. ①TN248

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 140925 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 710×1000 1/16 印张 15¼ 字数 270 千字

2017 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 79.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

## 致 读 者

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就,国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金  
评审委员会

# 国防科技图书出版基金

## 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 赵伯桥

秘书长 赵伯桥

副秘书长 许西安 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

# 前 言

化学激光器是激光器家族中发展较早的一类可实现高功率输出的激光器件,基于链式化学反应的连续波氟化氘(DF)激光器也是较早为人们所关注和研究的重要化学激光器之一。而基于放电引发技术的非链式脉冲 DF 化学激光器则是近年来,特别是进入 21 世纪以来由于自引发放电等新技术的采用才得以迅速发展的一种具有高功率输出潜质的中红外脉冲激光器件。因为其兼顾了传统的放电激励气体激光器和基于气体反应的化学激光器的特点,具有高峰值功率的脉冲输出特性,以及化学反应可控、无污染和爆炸危险、光束质量好等优点,同时又具备与传统连续波 DF 激光器相同的处于大气窗口的输出波长( $3.5 \sim 4.2 \mu\text{m}$ ),因此在包括光谱学、激光雷达、环境监测、医学检查及军事科学等领域均具有十分广阔的应用前景和重要的实用价值。

本书分为 4 个部分,分别介绍了放电引发非链式脉冲 DF 激光器的基本理论、关键单元技术、主机结构设计及激光参量的测试方法,内容在总体上反映了目前该激光器的技术现状和发展趋势。书中所述内容,如“放电引发非链式脉冲 DF 激光器的反应动力学模型”“放电引发非链式脉冲 DF 激光器主机结构设计”“放电引发非链式脉冲 DF 激光器电激励技术”“放电引发非链式脉冲 DF 激光器放电生成物处理技术”等均为作者团队的原创技术。本书详细介绍了作者团队近年来取得的多项具有国际先进水平的相关研究成果。希望本书对推动我国该类激光器相关技术的发展能有所帮助。

本书作者团队均来自中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激光与物质相互作用国家重点实验室的科研人员。其中,第 1 章由郭劲研究员执笔,第 2 章由谢冀江研究员执笔,第 3 章、第 4 章由吉林师范大学阮鹏博士执笔,第 5 章由邵春雷研究员和邵明振博士执笔,第 6 章、第 7 章由潘其坤博士执笔,第 8 章由王春锐博士执笔,第 9 章由张来明副研究员执笔,谢冀江负责全书文字的初校和图片的初步处理,全书由郭劲研究员统稿。在编写的过程中谭改娟硕

士、王旭硕士和吉林大学孙福兴博士提供了部分技术资料,出版过程中陈飞副研究员给予了大力支持和帮助,在此一并表示诚挚的谢意。由于作者水平所限,书中难免存在错漏之处,望读者批评指正。

著者

2017年4月

# 目 录

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| 第1章 绪论 .....                             | 1  |
| 1.1 DF激光器的工作原理及分类 .....                  | 1  |
| 1.1.1 DF激光器工作原理 .....                    | 1  |
| 1.1.2 DF激光器的分类 .....                     | 3  |
| 1.2 非链式脉冲DF激光器的特点及应用 .....               | 7  |
| 1.2.1 非链式脉冲DF激光器的特点 .....                | 7  |
| 1.2.2 非链式脉冲DF激光器的应用 .....                | 8  |
| 1.3 非链式脉冲DF激光器的发展动态 .....                | 10 |
| 参考文献 .....                               | 12 |
| 第2章 非链式脉冲DF激光器自持体放电的基本原理 .....           | 16 |
| 2.1 自持体放电基本原理 .....                      | 16 |
| 2.2 非链式DF激光工作气体放电的基本物理过程 .....           | 17 |
| 2.3 自持体放电形式与预电离技术 .....                  | 19 |
| 2.3.1 自持体放电形式 .....                      | 19 |
| 2.3.2 实现非链式脉冲DF激光输出的预电离技术 .....          | 21 |
| 2.4 紫外预电离技术 .....                        | 24 |
| 2.4.1 火花针预电离 .....                       | 24 |
| 2.4.2 电晕预电离 .....                        | 25 |
| 2.4.3 半导体预电离 .....                       | 26 |
| 参考文献 .....                               | 27 |
| 第3章 F原子产生过程和SF <sub>6</sub> 气体击穿机理 ..... | 29 |
| 3.1 SF <sub>6</sub> 气体的基本性能 .....        | 29 |
| 3.1.1 SF <sub>6</sub> 气体的理化特性 .....      | 29 |
| 3.1.2 SF <sub>6</sub> 气体的电学特性 .....      | 30 |
| 3.2 SF <sub>6</sub> 气体与电子的作用过程 .....     | 31 |
| 3.2.1 SF <sub>6</sub> 碰撞解离过程 .....       | 31 |
| 3.2.2 SF <sub>6</sub> 碰撞电离过程 .....       | 33 |

|            |                                              |           |
|------------|----------------------------------------------|-----------|
| 3.2.3      | 电子吸附过程 .....                                 | 35        |
| 3.2.4      | 粒子复合过程 .....                                 | 39        |
| 3.3        | SF <sub>6</sub> 气体击穿机理 .....                 | 40        |
| 3.3.1      | SF <sub>6</sub> 气体击穿机理 .....                 | 40        |
| 3.3.2      | SF <sub>6</sub> 气体的临界击穿电场强度 .....            | 42        |
| 3.4        | SF <sub>6</sub> 气体对非链式脉冲 DF 激光器放电击穿的影响 ..... | 43        |
|            | 参考文献 .....                                   | 45        |
| <b>第4章</b> | <b>放电引发非链式脉冲 DF 激光器反应动力学模型 .....</b>         | <b>48</b> |
| 4.1        | 放电引发非链式脉冲 DF 激光产生机理 .....                    | 48        |
| 4.1.1      | 泵浦过程 .....                                   | 49        |
| 4.1.2      | 弛豫过程 .....                                   | 50        |
| 4.1.3      | 激光辐射跃迁 .....                                 | 52        |
| 4.2        | 放电引发非链式脉冲 DF 激光器动力学反应过程 .....                | 53        |
| 4.2.1      | F 原子产生过程选取 .....                             | 53        |
| 4.2.2      | DF 激光器动力学反应过程及反应速率系数 .....                   | 54        |
| 4.3        | 动力学模型 .....                                  | 56        |
| 4.3.1      | 激光器速率方程理论 .....                              | 56        |
| 4.3.2      | 非链式脉冲 DF 激光器动力学模型 .....                      | 57        |
| 4.4        | 动力学模型参数的确定 .....                             | 60        |
| 4.5        | 动力学模型计算结果及讨论 .....                           | 60        |
| 4.5.1      | 参与反应的各组分子数密度变化情况分析 .....                     | 60        |
| 4.5.2      | 工作气体比例对激光输出性能的影响 .....                       | 61        |
| 4.5.3      | 输出镜反射率对激光输出性能的影响 .....                       | 65        |
|            | 参考文献 .....                                   | 66        |
| <b>第5章</b> | <b>放电引发非链式脉冲 DF 激光器主机结构设计 .....</b>          | <b>67</b> |
| 5.1        | 主机结构组成与布局 .....                              | 67        |
| 5.1.1      | 主机组成与功能 .....                                | 68        |
| 5.1.2      | 风机选型 .....                                   | 69        |
| 5.1.3      | 换热器选型 .....                                  | 71        |
| 5.1.4      | 主机结构布局 .....                                 | 72        |
| 5.2        | 真空腔系统 .....                                  | 73        |
| 5.2.1      | 真空腔壳体 .....                                  | 73        |
| 5.2.2      | 真空腔的密封 .....                                 | 82        |
| 5.2.3      | 真空泵选型 .....                                  | 84        |

|            |                                      |            |
|------------|--------------------------------------|------------|
| 5.2.4      | 真空计与漏率 .....                         | 86         |
| 5.3        | 气体循环冷却系统 .....                       | 87         |
| 5.3.1      | 气体循环流场结构 .....                       | 87         |
| 5.3.2      | 附加导流装置 .....                         | 88         |
| 5.3.3      | 板翅式换热器 .....                         | 89         |
| 5.3.4      | 流场压力损失 .....                         | 98         |
| 5.3.5      | 风机参数确定 .....                         | 104        |
| 5.3.6      | 放电区气流均匀性 .....                       | 106        |
| 5.4        | 光学支架 .....                           | 113        |
| 5.5        | 主机装置与测试 .....                        | 114        |
| 5.5.1      | 设计结果与实物装置 .....                      | 114        |
| 5.5.2      | 放电区气流测试 .....                        | 115        |
|            | 参考文献 .....                           | 119        |
| <b>第6章</b> | <b>非链式脉冲 DF 激光器电激励技术 .....</b>       | <b>121</b> |
| 6.1        | 非链式脉冲 DF 激光器高压电源 .....               | 121        |
| 6.1.1      | 高压电源参数 .....                         | 121        |
| 6.1.2      | 触发开关 .....                           | 123        |
| 6.1.3      | 高压电源组成 .....                         | 124        |
| 6.2        | 火花针紫外预电离放电技术研究 .....                 | 126        |
| 6.2.1      | 紫外预电离放电电路 .....                      | 126        |
| 6.2.2      | 火花针紫外预电离 DF 激光器电极间静电场仿真 .....        | 128        |
| 6.2.3      | 放电特性测量 .....                         | 131        |
| 6.3        | 自引发放电技术研究 .....                      | 135        |
| 6.3.1      | 自引发放电电路 .....                        | 135        |
| 6.3.2      | 自引发放电 DF 激光器电极间静电场仿真 .....           | 140        |
| 6.3.3      | 放电特性测量 .....                         | 143        |
|            | 参考文献 .....                           | 147        |
| <b>第7章</b> | <b>放电引发非链式脉冲 DF 激光器光学谐振腔技术 .....</b> | <b>148</b> |
| 7.1        | 稳定谐振腔 .....                          | 148        |
| 7.1.1      | 平凹型稳定谐振腔参数设计 .....                   | 148        |
| 7.1.2      | 稳定谐振腔模式分析 .....                      | 153        |
| 7.2        | 非稳定谐振腔 .....                         | 160        |
| 7.2.1      | 非稳定谐振腔参数设计 .....                     | 160        |
| 7.2.2      | 非稳定谐振腔模式分析 .....                     | 162        |

|                                            |            |
|--------------------------------------------|------------|
| 7.2.3 非稳定谐振腔的实验研究与参数优化 .....               | 165        |
| 7.3 色散腔 .....                              | 168        |
| 参考文献 .....                                 | 171        |
| <b>第8章 放电引发非链式脉冲 DF 激光器放电生成物处理技术 .....</b> | <b>172</b> |
| 8.1 放电生成物的主要成分及其危害 .....                   | 172        |
| 8.1.1 工作物质的放电产物 .....                      | 173        |
| 8.1.2 放电产物间的化学反应 .....                     | 174        |
| 8.1.3 气体放电生成物的危害 .....                     | 175        |
| 8.2 分子筛吸附技术在 DF 激光器中的应用 .....              | 176        |
| 8.2.1 分子筛吸附的基本原理 .....                     | 177        |
| 8.2.2 专用分子筛的设计和制造 .....                    | 182        |
| 8.2.3 分子筛吸附装置设计 .....                      | 186        |
| 8.2.4 分子筛吸附实验及结果分析 .....                   | 188        |
| 8.3 非链式脉冲 DF 激光器尾气处理技术 .....               | 193        |
| 8.3.1 激光器尾气成分的采集 .....                     | 193        |
| 8.3.2 激光器尾气成分的测试方法 .....                   | 194        |
| 8.3.3 激光器尾气处理方法 .....                      | 196        |
| 8.3.4 激光器尾气处理装置 .....                      | 198        |
| 参考文献 .....                                 | 201        |
| <b>第9章 激光器输出参量测试技术 .....</b>               | <b>204</b> |
| 9.1 激光功率 .....                             | 204        |
| 9.1.1 平均功率检测 .....                         | 204        |
| 9.1.2 脉冲功率测试 .....                         | 206        |
| 9.1.3 功率不稳定性 .....                         | 206        |
| 9.2 激光能量测试 .....                           | 207        |
| 9.2.1 单脉冲能量 .....                          | 207        |
| 9.2.2 重频放电能量 .....                         | 208        |
| 9.2.3 能量密度 .....                           | 209        |
| 9.2.4 能量不稳定性 .....                         | 210        |
| 9.3 激光器效率 .....                            | 210        |
| 9.3.1 电光转换效率 .....                         | 210        |
| 9.3.2 插头效率 .....                           | 211        |
| 9.4 激光光谱检测 .....                           | 211        |
| 9.4.1 经济型 DF 激光光谱仪检测波长 .....               | 212        |

|       |                |     |
|-------|----------------|-----|
| 9.4.2 | 光纤光谱仪 .....    | 213 |
| 9.5   | 激光脉冲宽度 .....   | 214 |
| 9.5.1 | 激光脉冲宽度 .....   | 214 |
| 9.5.2 | 激光重复频率 .....   | 215 |
| 9.6   | 激光光束发散角 .....  | 216 |
| 9.6.1 | 光斑尺寸 .....     | 216 |
| 9.6.2 | 近场发散角 .....    | 218 |
| 9.6.3 | 远场发散角 .....    | 219 |
| 9.6.4 | 激光束指向稳定性 ..... | 221 |
| 9.7   | 小信号增益测量 .....  | 222 |
| 9.7.1 | 理论分析 .....     | 222 |
| 9.7.2 | 实验测试方法 .....   | 223 |
|       | 参考文献 .....     | 224 |

# Contents

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Chapter 1 Introduction</b>                                                              | 1  |
| 1.1 Working principles and types of DF lasers                                              | 1  |
| 1.1.1 Working principles                                                                   | 1  |
| 1.1.2 Types of lasers                                                                      | 3  |
| 1.2 Characteristics and applications of non-chain pulsed DF laser                          | 7  |
| 1.2.1 Characteristics                                                                      | 7  |
| 1.2.2 Applications                                                                         | 8  |
| 1.3 Developments of non-chain pulsed DF laser                                              | 10 |
| References                                                                                 | 12 |
| <b>Chapter 2 Self-sustained volume discharge principle of non-chain pulsed DF laser</b>    | 16 |
| 2.1 Principle of self-sustained volume discharge                                           | 16 |
| 2.2 Basic physical processes of gas discharge in working gas of non-chain DF laser         | 17 |
| 2.3 Types of self-sustained volume discharge and pre-ionization technologies               | 19 |
| 2.3.1 Types of self-sustained volume discharge                                             | 19 |
| 2.3.2 Pre-ionization technologies used in non-chain pulsed DF laser                        | 21 |
| 2.4 UV pre-ionization technology                                                           | 24 |
| 2.4.1 Spark pre-ionization                                                                 | 24 |
| 2.4.2 Corona pre-ionization                                                                | 25 |
| 2.4.3 Semiconductor pre-ionization                                                         | 26 |
| References                                                                                 | 27 |
| <b>Chapter 3 Processes of F atom generation and breakdown principles of SF<sub>6</sub></b> | 29 |
| 3.1 Basic characteristics of SF <sub>6</sub>                                               | 29 |

|       |                                                                                   |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.1 | Physical and chemical properties of $\text{SF}_6$                                 | 29 |
| 3.1.2 | Electrical properties of $\text{SF}_6$                                            | 30 |
| 3.2   | $\text{SF}_6$ Interactions with Electrons                                         | 31 |
| 3.2.1 | Electron-impact dissociation of $\text{SF}_6$                                     | 31 |
| 3.2.2 | Electron-impact ionization of $\text{SF}_6$                                       | 33 |
| 3.2.3 | Electron attachment to $\text{SF}_6$                                              | 35 |
| 3.2.4 | Particle recombination process                                                    | 39 |
| 3.3   | Breakdown principles of $\text{SF}_6$                                             | 40 |
| 3.3.1 | Breakdown principles of $\text{SF}_6$                                             | 40 |
| 3.3.2 | Critical breakdown electric field of $\text{SF}_6$                                | 42 |
| 3.4   | Influence of $\text{SF}_6$ on discharge breakdown of non-chain pulsed<br>DF laser | 43 |
|       | References                                                                        | 45 |

## **Chapter 4 Dynamical model of electric discharge non-chain pulsed**

|       |                                                                               |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------|----|
|       | <b>DF laser</b>                                                               | 48 |
| 4.1   | Mechanism of electric discharge non-chain pulsed DF laser                     | 48 |
| 4.1.1 | Pumping processes                                                             | 49 |
| 4.1.2 | De-excitation processes                                                       | 50 |
| 4.1.3 | Stimulated radiation                                                          | 52 |
| 4.2   | Kinetic reaction processes of electric discharge non-chain pulsed<br>DF laser | 53 |
| 4.2.1 | F atoms formation processes                                                   | 53 |
| 4.2.2 | Kinetic reaction processes and rate coefficients of<br>DF laser               | 54 |
| 4.3   | Dynamic model                                                                 | 56 |
| 4.3.1 | Laser rate equations theory                                                   | 56 |
| 4.3.2 | Dynamic model of non-chain pulsed DF laser                                    | 57 |
| 4.4   | Parameters in dynamic model                                                   | 60 |
| 4.5   | Numerical calculations and discussion of dynamic model                        | 60 |
| 4.5.1 | Analysis of particle number density changes in reactions                      | 60 |
| 4.5.2 | Effect of working mixture ratio on laser performance                          | 61 |
| 4.5.3 | Effect of output mirror reflectivity on laser performance                     | 65 |
|       | References                                                                    | 66 |

## **Chapter 5 Host structure design of electric discharge non-chain pulsed**

|     |                                          |    |
|-----|------------------------------------------|----|
|     | <b>DF laser</b>                          | 67 |
| 5.1 | Composition and layout of host structure | 67 |

|         |                                                                |     |
|---------|----------------------------------------------------------------|-----|
| 5. 1. 1 | Components and functions of host structure .....               | 68  |
| 5. 1. 2 | Selected blower for non-chain pulsed DF laser .....            | 69  |
| 5. 1. 3 | Heat exchanger for non-chain pulsed DF laser .....             | 71  |
| 5. 1. 4 | Layout of host structure .....                                 | 72  |
| 5. 2    | Vacuum chamber system .....                                    | 73  |
| 5. 2. 1 | Vacuum chamber shell .....                                     | 73  |
| 5. 2. 2 | Seal of the vacuum chamber .....                               | 82  |
| 5. 2. 3 | Selected Vacuum chamber for non-chain pulsed<br>DF laser ..... | 84  |
| 5. 2. 4 | Vacuum gauge and leakage rate .....                            | 86  |
| 5. 3    | Gas circulation and cooling system .....                       | 87  |
| 5. 3. 1 | Gas circulation flow structure .....                           | 87  |
| 5. 3. 2 | Additional guiding device .....                                | 88  |
| 5. 3. 3 | Plate fin heat exchanger .....                                 | 89  |
| 5. 3. 4 | Flow field pressure loss .....                                 | 98  |
| 5. 3. 5 | Fun parameters .....                                           | 104 |
| 5. 3. 6 | Flow uniformity in discharging area .....                      | 106 |
| 5. 4    | Optical bracket .....                                          | 113 |
| 5. 5    | Host device and test .....                                     | 114 |
| 5. 5. 1 | Design results and physical device .....                       | 114 |
| 5. 5. 2 | Flow field tests in discharging area .....                     | 115 |
|         | References .....                                               | 119 |

## **Chapter 6 Electric excitation technology of non-chain pulsed**

|         |                                                                                 |     |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
|         | <b>DF laser</b> .....                                                           | 121 |
| 6. 1    | High voltage power supply of non-chain pulsed DF laser .....                    | 121 |
| 6. 1. 1 | The parameters of high power supply .....                                       | 121 |
| 6. 1. 2 | Trigger switch .....                                                            | 123 |
| 6. 1. 3 | The composition of high voltage power supply .....                              | 124 |
| 6. 2    | Spark pin UV pre-ionization electric discharge technology .....                 | 126 |
| 6. 2. 1 | The discharging circuit of UV pre-ionization .....                              | 126 |
| 6. 2. 2 | Electrostatic field simulation of spark pin UV pre-ionization<br>DF laser ..... | 128 |
| 6. 2. 3 | Discharge characteristics test .....                                            | 131 |
| 6. 3    | Self-sustained volume discharge technology .....                                | 135 |

|                                                                                                  |                                                                                     |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.3.1                                                                                            | The discharging circuit of self-sustained volume<br>discharge .....                 | 135 |
| 6.3.2                                                                                            | Electrostatic field simulation of self-sustained volume<br>discharge DF laser ..... | 140 |
| 6.3.3                                                                                            | Discharge characteristics test .....                                                | 143 |
|                                                                                                  | References .....                                                                    | 147 |
| <b>Chapter 7 Optical resonator technology of non-chain pulsed<br/>DF laser .....</b>             |                                                                                     |     |
| 7.1                                                                                              | Stable resonator .....                                                              | 148 |
| 7.1.1                                                                                            | Parameters design of the plano-concave resonator .....                              | 148 |
| 7.1.2                                                                                            | Mode analysis of stable resonator .....                                             | 153 |
| 7.2                                                                                              | Unstable resonator .....                                                            | 160 |
| 7.2.1                                                                                            | Parameters design of the unstable resonator .....                                   | 160 |
| 7.2.2                                                                                            | Mode analysis of unstable resonator .....                                           | 162 |
| 7.2.3                                                                                            | Experimental study and parameters optimization of unstable<br>resonator .....       | 165 |
| 7.3                                                                                              | Chromatic resonator .....                                                           | 168 |
|                                                                                                  | References .....                                                                    | 171 |
| <b>Chapter 8 Discharge products treatment of electric discharge<br/>non-chain DF laser .....</b> |                                                                                     |     |
| 8.1                                                                                              | Composition and its harm of the discharge products .....                            | 172 |
| 8.1.1                                                                                            | Discharge products of the active medium .....                                       | 173 |
| 8.1.2                                                                                            | Chemical reaction of between discharge products .....                               | 174 |
| 8.1.3                                                                                            | The harm of the gas discharge products .....                                        | 175 |
| 8.2                                                                                              | The application of molecular sieve adsorption technology within<br>DF laser .....   | 176 |
| 8.2.1                                                                                            | The base theory of molecular sieve adsorption .....                                 | 177 |
| 8.2.2                                                                                            | Design and manufacture of special molecular sieve .....                             | 182 |
| 8.2.3                                                                                            | Design of the adsorption device for molecular sieve .....                           | 186 |
| 8.2.4                                                                                            | The experiments of molecular sieve adsorption and results<br>analysis .....         | 188 |
| 8.3                                                                                              | Tail gas treatment of electric discharge non-chain DF laser .....                   | 193 |
| 8.3.1                                                                                            | The tail gas collection of the laser .....                                          | 193 |
| 8.3.2                                                                                            | The test methods of the tail gas composition .....                                  | 194 |

|                                                                    |                                                           |            |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------|
| 8.3.3                                                              | The treatment methods of the tail gas .....               | 196        |
| 8.3.4                                                              | The tail treatment devise of the laser .....              | 198        |
| References .....                                                   |                                                           | 201        |
| <b>Chapter 9 The parameters test technology of the laser .....</b> |                                                           | <b>204</b> |
| 9.1                                                                | Laser power .....                                         | 204        |
| 9.1.1                                                              | Average power test .....                                  | 204        |
| 9.1.2                                                              | Pulsed power test .....                                   | 206        |
| 9.1.3                                                              | Instability of the laser power .....                      | 206        |
| 9.2                                                                | Laser energy test .....                                   | 207        |
| 9.2.1                                                              | Single energy test .....                                  | 207        |
| 9.2.2                                                              | Frequency rate discharge energy .....                     | 208        |
| 9.2.3                                                              | Energy density .....                                      | 209        |
| 9.2.4                                                              | Instability of the laser energy .....                     | 210        |
| 9.3                                                                | Efficiency of the laser .....                             | 210        |
| 9.3.1                                                              | Electronic-optic conversion efficiency .....              | 210        |
| 9.3.2                                                              | Wall-plug efficiency .....                                | 211        |
| 9.4                                                                | The test of laser spectrum .....                          | 211        |
| 9.4.1                                                              | Test wavelength with economic DF laser spectrometer ..... | 212        |
| 9.4.2                                                              | Fiber spectrometer .....                                  | 213        |
| 9.5                                                                | Pulsed width of the laser .....                           | 214        |
| 9.5.1                                                              | Pulsed width of the laser .....                           | 214        |
| 9.5.2                                                              | Frequencyrate of the laser .....                          | 215        |
| 9.6                                                                | The divergence angle of the laser .....                   | 216        |
| 9.6.1                                                              | Laser spot size .....                                     | 216        |
| 9.6.2                                                              | Near field divergence angle .....                         | 218        |
| 9.6.3                                                              | Far field divergence angle .....                          | 219        |
| 9.6.4                                                              | Pointing stability of laser beam .....                    | 221        |
| 9.7                                                                | The test of the small signal gain .....                   | 222        |
| 9.7.1                                                              | Theoretical analysis .....                                | 222        |
| 9.7.2                                                              | Experimental test method .....                            | 223        |
| References .....                                                   |                                                           | 224        |