

# 高功率连续CO<sub>2</sub>激光器 Continuous-Wave High Power CO<sub>2</sub> Lasers

徐启阳 王新兵 编著

国防工业出版社

# 高功率连续 CO<sub>2</sub> 激光器

## Continuous-Wave High Power CO<sub>2</sub> Lasers

徐启阳 王新兵 编著

国防工业出版社

·北京·

## 图书在版编目(CIP)数据

高功率连续 CO<sub>2</sub> 激光器/徐啓阳,王新兵编著. —北京:国防工业出版社,2000.7

ISBN 7-118-02219-5

I. 高… II. ①徐… ②王… III. 二氧化碳激光器  
IV. TN248.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 55427 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 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 6 $\frac{1}{8}$  170 千字

2000 年 7 月第 1 版 2000 年 7 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:17.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

## 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,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,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。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 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,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防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,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,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,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业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。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业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 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎

秘 书 长 崔士义

委 员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成  
(以姓氏笔划为序)

刘 仁 朱森元 朵英贤 宋家树

杨星豪 吴有生 何庆芝 何国伟

何新贵 张立同 张汝果 张均武

张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安

侯正明 莫梧生 崔尔杰

## 前 言

目前,激光器技术已发展到相当高的程度。激光输出波长覆盖了 X 射线到毫米波段,其中相当部分可以连续调谐;连续输出功率可达百万瓦,脉冲的输出功率密度超过了  $10^{19} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ;最短的光脉冲达  $6 \times 10^{-15} \text{s}$ 。激光器件已在军事、工业、科学研究、医疗和娱乐等各个领域有了广泛的应用。但是,激光技术和激光器件及其应用的研究仍然在深入发展。

$\text{CO}_2$  激光器可以多种方式激励,无化学毒害和污染,制作简便,其发射波长正处于大气窗口,特别是转换效率高,能产生连续高功率激光输出。由于这些独特优点,使之在军事、工业和科学技术各个领域占据重要地位和越来越广泛的应用。我国汽车、机械、航空航天、造船、钢铁、纺织和轻工很多行业采用了高功率连续  $\text{CO}_2$  激光器。除国内提供技术和产品外,全国已从国外进口高功率连续  $\text{CO}_2$  激光器达 1800 多台。从技术上讲,近十年来高功率连续  $\text{CO}_2$  激光器又有了新的重大发展。例如,扩散冷却千瓦级  $\text{CO}_2$  激光器、约束放电激励高功率连续  $\text{CO}_2$  激光器、放电激励气动冷却  $\text{CO}_2$  激光器和高频放电激励无氮运行高功率连续  $\text{CO}_2$  激光器等,都有新的研究成果和技术上的重大突破。有关高功率连续  $\text{CO}_2$  激光器的激励机理、光学谐振腔等方面论述,在理论上有了新的发展。然而,为了使高功率连续  $\text{CO}_2$  激光器在各个领域里,特别是在军事上得到应用,必须要进一步提高器件的输出功率和转换效率,缩小体积,减轻重量,提高可靠性。高功率连续  $\text{CO}_2$  激光器技术必将进一步发展。为此,根据国内外的情况,编著和出版这本书,对于总结高功率连续  $\text{CO}_2$  激光器研究成果,推动其在

军事、工业和科学研究等各个方面的应用,充实和发展高功率连续 CO<sub>2</sub> 激光器技术和激光领域的理论是十分有益的。

随着激光技术的发展,特别是 70 年代和 80 年代一系列有成效的基础性研究,使 CO<sub>2</sub> 激光器连续输出功率不断提高。现可从毫瓦级到几百千瓦数量级,最高为 400 千瓦。本书论述和研究的对象是连续输出功率为千瓦级及其以上的高功率连续 CO<sub>2</sub> 激光器。

全书分为七章。第一章至第五章由徐启阳教授撰写;第六、七两章由王新兵博士撰写。作者特别要感谢干福熹和姚建铨两位院士对本书的具体指导。作者要感谢程祖海教授、陈清明教授、李正佳教授、许德胜高工、孙义秀等同志为本书提出宝贵意见和提供一些有用的资料。

由于作者的水平有限,本书难免存在一些缺点和不足之处,请读者批评指正。

作 者



# 目 录

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| 第一章 绪论 .....                                                  | 1  |
| 1.1 CO <sub>2</sub> 激光器技术的发展 .....                            | 1  |
| 1.1.1 CO <sub>2</sub> 激光器的诞生 .....                            | 1  |
| 1.1.2 CO <sub>2</sub> 激光器技术的发展 .....                          | 1  |
| 1.1.3 高功率连续 CO <sub>2</sub> 激光器的出现 .....                      | 2  |
| 1.2 高功率连续 CO <sub>2</sub> 激光器的应用 .....                        | 3  |
| 1.2.1 在工业上的应用 .....                                           | 4  |
| 1.2.2 在军事上的应用 .....                                           | 4  |
| 1.2.3 在科学研究上的应用 .....                                         | 5  |
| 1.3 高功率连续 CO <sub>2</sub> 激光器的特点 .....                        | 6  |
| 1.3.1 连续 CO <sub>2</sub> 激光器输出功率等级的划分 .....                   | 6  |
| 1.3.2 高功率连续 CO <sub>2</sub> 激光器的特点 .....                      | 7  |
| 参考文献 .....                                                    | 9  |
| 第二章 电激励高功率连续 CO <sub>2</sub> 激光器物理特性 .....                    | 10 |
| 2.1 高功率连续 CO <sub>2</sub> 激光器放电等离子体特性 .....                   | 10 |
| 2.1.1 气体放电等离子体的主要参数 .....                                     | 10 |
| 2.1.2 CO <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> -He 混合气体放电中电子能量分布 ..... | 12 |
| 2.1.3 气体辉光放电区的 $E/N$ 值 .....                                  | 17 |
| 2.2 CO <sub>2</sub> 激光器电激励物理 .....                            | 24 |
| 2.2.1 CO <sub>2</sub> 激光能级 .....                              | 24 |
| 2.2.2 CO <sub>2</sub> 激光器中混合气体化学反应 .....                      | 25 |
| 2.2.3 高功率连续 CO <sub>2</sub> 激光器放电稳定性 .....                    | 28 |
| 2.3 高功率连续 CO <sub>2</sub> 激光器光束特性 .....                       | 32 |
| 2.3.1 光束质量 .....                                              | 33 |

|                                               |           |
|-----------------------------------------------|-----------|
| 2.3.2 激光束对应用效果的影响 .....                       | 38        |
| 2.3.3 高功率连续 CO <sub>2</sub> 激光谐振腔 .....       | 41        |
| 2.3.4 高功率连续 CO <sub>2</sub> 激光束发散角的测量 .....   | 44        |
| 参考文献 .....                                    | 46        |
| <b>第三章 横流电激励连续 CO<sub>2</sub> 激光器</b> .....   | <b>48</b> |
| 3.1 横流电激励连续 CO <sub>2</sub> 激光器结构 .....       | 48        |
| 3.1.1 总体结构 .....                              | 48        |
| 3.1.2 电极结构和放电区 .....                          | 52        |
| 3.1.3 谐振腔 .....                               | 53        |
| 3.1.4 气体循环流动系统 .....                          | 55        |
| 3.2 横流电激励 CO <sub>2</sub> 激光器激励电源 .....       | 56        |
| 3.2.1 直流电源工作原理 .....                          | 56        |
| 3.2.2 脉冲放电预电离 .....                           | 58        |
| 3.2.3 光电离脉冲增强激励(PIE) .....                    | 60        |
| 3.3 直流电激励连续 CO <sub>2</sub> 激光器放电特性 .....     | 61        |
| 3.3.1 放电特性 .....                              | 61        |
| 3.3.2 直流电激励连续 CO <sub>2</sub> 激光器放电的稳定性 ..... | 63        |
| 3.4 直流电激励连续 CO <sub>2</sub> 激光器输出特性 .....     | 67        |
| 3.4.1 功率输出特性 .....                            | 67        |
| 3.4.2 模式输出特性 .....                            | 70        |
| 3.5 无 He 运行高功率连续 CO <sub>2</sub> 激光器 .....    | 73        |
| 3.5.1 热力学计算及措施 .....                          | 74        |
| 3.5.2 无 He 运行特性 .....                         | 76        |
| 3.6 约束放电激励千瓦级基模 CO <sub>2</sub> 激光器 .....     | 78        |
| 3.6.1 约束放电激励原理 .....                          | 78        |
| 3.6.2 约束放电激励千瓦级 CO <sub>2</sub> 激光器 .....     | 86        |
| 参考文献 .....                                    | 89        |
| <b>第四章 轴快流高功率 CO<sub>2</sub> 激光器</b> .....    | <b>91</b> |
| 4.1 引言 .....                                  | 91        |
| 4.2 结构及工作原理 .....                             | 91        |
| 4.2.1 总体结构 .....                              | 91        |
| 4.2.2 放电区结构 .....                             | 93        |

|                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.3 光学谐振腔 .....                                           | 98  |
| 4.2.4 气体循环流动系统 .....                                        | 102 |
| 4.3 激励方式及电源 .....                                           | 104 |
| 4.3.1 直流放电激励 .....                                          | 104 |
| 4.3.2 射频放电激励 .....                                          | 109 |
| 4.3.3 微波放电激励 .....                                          | 112 |
| 4.4 轴快流 $\text{CO}_2$ 激光器运行特性 .....                         | 115 |
| 4.4.1 气动特性 .....                                            | 115 |
| 4.4.2 湍流运行 .....                                            | 117 |
| 4.4.3 功率与模式输出特性 .....                                       | 119 |
| 4.4.4 脉冲运行特性 .....                                          | 121 |
| 参考文献 .....                                                  | 122 |
| <b>第五章 高频和无声放电(SD)激励 <math>\text{CO}_2</math> 激光器</b> ..... | 124 |
| 5.1 高频放电和 SD 理论 .....                                       | 124 |
| 5.1.1 高频和 SD 电极介质镇流效应 .....                                 | 124 |
| 5.1.2 高频电场和高频放电 .....                                       | 125 |
| 5.1.3 高频场介质中电流及功耗 .....                                     | 127 |
| 5.1.4 SD 参量 .....                                           | 127 |
| 5.1.5 SD 激励效率和振荡功率 .....                                    | 131 |
| 5.2 SD 激励 $\text{CO}_2$ 激光器 .....                           | 134 |
| 5.2.1 SD 激励 $\text{CO}_2$ 激光器结构 .....                       | 134 |
| 5.2.2 SD 激励 $\text{CO}_2$ 激光器振荡特性 .....                     | 136 |
| 5.2.3 SD 与直流激励 $\text{CO}_2$ 激光器性能比较 .....                  | 137 |
| 5.3 无声放电预电离直流激励(SAGE) $\text{CO}_2$ 激光器 .....               | 138 |
| 5.3.1 SAGE 方式 .....                                         | 138 |
| 5.3.2 20kW SAGE 激励 $\text{CO}_2$ 激光器 .....                  | 139 |
| 5.4 1500W 高频激励 $\text{CO}_2$ 激光器 .....                      | 141 |
| 5.4.1 激光器结构 .....                                           | 141 |
| 5.4.2 具有介质的电极 .....                                         | 142 |
| 5.4.3 阻抗匹配 .....                                            | 144 |
| 5.4.4 高频横流 $\text{CO}_2$ 激光器的运行特性 .....                     | 145 |
| 参考文献 .....                                                  | 146 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| <b>第六章 扩散冷却千瓦级 CO<sub>2</sub> 激光器</b> | 147 |
| 6.1 面积放大与射频放电激励技术                     | 147 |
| 6.1.1 面积放大概念                          | 147 |
| 6.1.2 射频放电激励技术                        | 150 |
| 6.2 平板波导型扩散冷却 CO <sub>2</sub> 激光器     | 151 |
| 6.2.1 平板波导 CO <sub>2</sub> 激光器谐振腔     | 151 |
| 6.2.2 高功率平板波导 CO <sub>2</sub> 激光器     | 159 |
| 6.2.3 多通道板条结构                         | 161 |
| 6.3 同轴结构扩散冷却 CO <sub>2</sub> 激光器      | 162 |
| 6.3.1 复曲面镜倾斜非稳定谐振腔                    | 162 |
| 6.3.2 螺旋型反射镜构成的混合腔                    | 163 |
| 6.3.3 螺旋角向非稳腔的几何光学分析                  | 164 |
| 6.4 二维阵列波导 CO <sub>2</sub> 激光器        | 167 |
| 参考文献                                  | 168 |
| <b>第七章 气动 CO<sub>2</sub> 激光器</b>      | 170 |
| 7.1 热激励气动 CO <sub>2</sub> 激光器         | 170 |
| 7.1.1 热激励气动 CO <sub>2</sub> 激光器的工作特性  | 171 |
| 7.1.2 两代气动 CO <sub>2</sub> 激光器        | 174 |
| 7.1.3 热激励气动 CO <sub>2</sub> 激光器的实例    | 176 |
| 7.2 放电激励气动冷却 CO <sub>2</sub> 激光器      | 180 |
| 7.2.1 放电激励后混合气动冷却 CO <sub>2</sub> 激光器 | 180 |
| 7.2.2 直接电激励气动冷却 CO <sub>2</sub> 激光器   | 185 |
| 7.3 气动窗口                              | 187 |
| 7.3.1 气动激光窗口的真空密封原理及其分子扩散方程           | 189 |
| 7.3.2 引射式气动窗口的性能                      | 195 |
| 参考文献                                  | 198 |

# Contents

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Chapter 1 Introduction</b>                                                                      | 1  |
| 1.1 The Development of CO <sub>2</sub> Laser Technology                                            | 1  |
| 1.1.1 The Emergence of CO <sub>2</sub> Lasers                                                      | 1  |
| 1.1.2 The Development of CO <sub>2</sub> Laser Technology                                          | 1  |
| 1.1.3 High Power CW CO <sub>2</sub> Lasers                                                         | 2  |
| 1.2 Applications of The High Power CW CO <sub>2</sub> Lasers                                       | 3  |
| 1.2.1 Applications in The Industry                                                                 | 4  |
| 1.2.2 Applications in The Military                                                                 | 4  |
| 1.2.3 Applications in The Science Research                                                         | 5  |
| 1.3 The Characteristics of High Power CW CO <sub>2</sub> Lasers                                    | 6  |
| 1.3.1 The Classification of CW CO <sub>2</sub> Lasers on The Output<br>Power                       | 6  |
| 1.3.2 The Characteristics of High Power CW CO <sub>2</sub> Lasers                                  | 7  |
| Reference                                                                                          | 9  |
| <b>Chapter 2 Physical Properties of High Power CW CO<sub>2</sub> Lasers</b>                        |    |
| Excited By Discharge                                                                               | 10 |
| 2.1 The Characteristics of Discharge Plasma in High Power<br>CW CO <sub>2</sub> Lasers             | 10 |
| 2.1.1 Parameters of Gas Discharge Plasma                                                           | 10 |
| 2.1.2 Electron Energy Distribution of CO <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> -He Mixture Gas<br>Discharge | 12 |
| 2.1.3 $E/N$ Value in The Glow Discharge                                                            | 17 |
| 2.2 Gas Discharge Physics of CO <sub>2</sub> Lasers                                                | 24 |
| 2.2.1 Energy Level of CO <sub>2</sub> Lasers                                                       | 24 |
| 2.2.2 Chemical Reaction of Mixture Gas in The CO <sub>2</sub> Lasers                               | 25 |

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.3 Gas Discharge Stability of High Power CW CO <sub>2</sub> Lasers .....    | 28 |
| 2.3 Laser Beam Characteristics of High Power CW CO <sub>2</sub>                |    |
| Lasers .....                                                                   | 32 |
| 2.3.1 Laser Beam Quality .....                                                 | 33 |
| 2.3.2 Effects of Applied Results on Laser Beam .....                           | 38 |
| 2.3.3 Resonators of High Power CW CO <sub>2</sub> Lasers .....                 | 41 |
| 2.3.4 Measurement of Divergence Angle of High Power CW CO <sub>2</sub>         |    |
| Laser Beam .....                                                               | 44 |
| References .....                                                               | 46 |
| <b>Chapter 3 Transverse Flow Electric Excited CW CO<sub>2</sub> Lasers</b> ... | 48 |
| 3.1 Structure of Transverse Flow Electric Excited CW                           |    |
| CO <sub>2</sub> Lasers .....                                                   | 48 |
| 3.1.1 General Structure .....                                                  | 48 |
| 3.1.2 Electrode Structure and Discharge Area .....                             | 52 |
| 3.1.3 Resonator .....                                                          | 53 |
| 3.1.4 Gas Circulation and Flow System .....                                    | 55 |
| 3.2 Power Supplies of Transverse Flow Electric Excited                         |    |
| CW CO <sub>2</sub> Lasers .....                                                | 56 |
| 3.2.1 Principle of DC Power Supply .....                                       | 56 |
| 3.2.2 Pre-Ionization of Pulse Discharge .....                                  | 58 |
| 3.2.3 Photo-Ionization-Enhanced Excitation(PIE) .....                          | 60 |
| 3.3 Gas Discharge Characteristics of DC Excited CW                             |    |
| CO <sub>2</sub> Lasers .....                                                   | 61 |
| 3.3.1 Discharge Characteristics .....                                          | 61 |
| 3.3.2 The Stability of DC Excited CW CO <sub>2</sub> Lasers .....              | 63 |
| 3.4 Output Characteristics of DC Excited CW CO <sub>2</sub>                    |    |
| Lasers .....                                                                   | 67 |
| 3.4.1 The Characteristics of Laser Power .....                                 | 67 |
| 3.4.2 The Characteristics of Laser Beam .....                                  | 70 |
| 3.5 Helium-Free High Power CW CO <sub>2</sub> Lasers .....                     | 73 |
| 3.5.1 Calculation of Thermal Mechanics and Adoption                            |    |

|                                                                                                          |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| of Measures .....                                                                                        | 74         |
| 3.5.2 Operating Characteristics with Helium-Free .....                                                   | 76         |
| 3.6 Kilowatts CO <sub>2</sub> Lasers Excited By Magnetic Confined<br>Discharge .....                     | 78         |
| 3.6.1 Physics of Magnetic Confined Discharge .....                                                       | 78         |
| 3.6.2 Kilowatts CO <sub>2</sub> Lasers Excited by Magnetic Confined<br>Discharge .....                   | 86         |
| References .....                                                                                         | 89         |
| <b>Chapter 4 Axial Fast Flow High Power CW CO<sub>2</sub> Lasers .....</b>                               | <b>91</b>  |
| 4.1 Introduction .....                                                                                   | 91         |
| 4.2 Structure and Principle .....                                                                        | 91         |
| 4.2.1 General Structure .....                                                                            | 91         |
| 4.2.2 Structure of Discharge Area .....                                                                  | 93         |
| 4.2.3 Optical Resonator .....                                                                            | 98         |
| 4.2.4 Gas Circulation and Flow System .....                                                              | 102        |
| 4.3 Excited Ways and Power Supplies .....                                                                | 104        |
| 4.3.1 Excitation of DC Discharge .....                                                                   | 104        |
| 4.3.2 Excitation of RF Discharge .....                                                                   | 109        |
| 4.3.3 Excitation of Micro-Wave Discharge .....                                                           | 112        |
| 4.4 Operating Characteristics of Axial Fast Flow CW<br>CO <sub>2</sub> Lasers .....                      | 115        |
| 4.4.1 Gas Dynamic Characteristics .....                                                                  | 115        |
| 4.4.2 Operation of The turbulence .....                                                                  | 117        |
| 4.4.3 Lasers Beam and Output Power Characteristics .....                                                 | 119        |
| 4.4.4 Pulse Operating Characteristics .....                                                              | 121        |
| References .....                                                                                         | 122        |
| <b>Chapter 5 CO<sub>2</sub> Lasers Excited By High Frequency and Silence<br/>    Discharge(SD) .....</b> | <b>124</b> |
| 5.1 Principle of High Frequency and SD .....                                                             | 124        |
| 5.1.1 Dielectric Ballast Effects of The Electrode in The High<br>Frequency and SD .....                  | 124        |

|       |                                                                                          |     |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1.2 | High Frequency Electrical Field and High Frequency Discharge .....                       | 125 |
| 5.1.3 | Current and Power Loss of The Dielectric in The High Frequency Electrical Field .....    | 127 |
| 5.1.4 | Parameters of SD .....                                                                   | 127 |
| 5.1.5 | SD Excitation Efficiency and Oscillating Power .....                                     | 131 |
| 5.2   | CO <sub>2</sub> Lasers Excited By SD .....                                               | 134 |
| 5.2.1 | Structure of CO <sub>2</sub> Lasers Excited By SD .....                                  | 134 |
| 5.2.2 | Oscillating Characteristics of CO <sub>2</sub> Lasers Excited By SD .....                | 136 |
| 5.2.3 | Comparison of CO <sub>2</sub> Lasers Excited By DC and By SD .....                       | 137 |
| 5.3   | SAGE Excited CO <sub>2</sub> Lasers .....                                                | 138 |
| 5.3.1 | SAGE Method .....                                                                        | 138 |
| 5.3.2 | 20kW SAGE Excited CO <sub>2</sub> Lasers .....                                           | 139 |
| 5.4   | 1500W CO <sub>2</sub> Lasers Excited By High Frequency Discharge .....                   | 141 |
| 5.4.1 | Structure of The Lasers .....                                                            | 141 |
| 5.4.2 | Electrode Covered With Dielectric .....                                                  | 142 |
| 5.4.3 | Impedance Matching .....                                                                 | 144 |
| 5.4.4 | Operating Characteristics of High Frequency Transverse Flow CO <sub>2</sub> Lasers ..... | 145 |
|       | References .....                                                                         | 146 |
|       | <b>Chapter 6 Kilowatts Diffusion-Cooled CO<sub>2</sub> Lasers</b> .....                  | 147 |
| 6.1   | Area Scaling and RF Discharge Technology .....                                           | 147 |
| 6.1.1 | Concept of Area Scaling .....                                                            | 147 |
| 6.1.2 | RF Discharge Technology .....                                                            | 150 |
| 6.2   | Planar Wave-guide Diffusion-Cooled CO <sub>2</sub> Lasers .....                          | 151 |
| 6.2.1 | Resonator of Planar Waveguide CO <sub>2</sub> Lasers .....                               | 151 |
| 6.2.2 | High Power Planar Waveguide CO <sub>2</sub> Lasers .....                                 | 159 |
| 6.2.3 | Multi-Channel Slab CO <sub>2</sub> Lasers .....                                          | 161 |
| 6.3   | Coaxial Diffusion-Cooled CO <sub>2</sub> Lasers .....                                    | 162 |
| 6.3.1 | Unstable Resonator With Tilted Complex Mirror .....                                      | 162 |
| 6.3.2 | Spiral Mirror Mixed Resonator .....                                                      | 163 |



|                                                                                                     |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.3.3 Geometric Optical Analysis of Unstable Resonator with Spiral Azimuth Mirror .....             | 164        |
| 6.4 Two-Dimension Array Wave-guide CO <sub>2</sub> Lasers .....                                     | 167        |
| References .....                                                                                    | 168        |
| <b>Chapter 7 Gas Dynamic CO<sub>2</sub> Lasers</b> .....                                            | <b>170</b> |
| 7.1 Thermal Excited Gas Dynamic CO <sub>2</sub> Lasers .....                                        | 170        |
| 7.1.1 Characteristics of Thermal Excited Gas Dynamic CO <sub>2</sub> Lasers .....                   | 171        |
| 7.1.2 Two Generations of Thermal Excited Gas Dynamic CO <sub>2</sub> Lasers .....                   | 174        |
| 7.1.3 Example of Thermal Excited Gas Dynamic CO <sub>2</sub> Lasers .....                           | 176        |
| 7.2 Gas Dynamic Cooling CO <sub>2</sub> Lasers Excited by Discharge .....                           | 180        |
| 7.2.1 Mixed Gas Dynamic Cooling CO <sub>2</sub> Lasers Excited by Discharge .....                   | 180        |
| 7.2.2 Gas Dynamic Cooling CO <sub>2</sub> Lasers Excited by Gas Discharge .....                     | 185        |
| 7.3 Aerodynamic Window .....                                                                        | 187        |
| 7.3.1 The Vacuum Sealed Principle of Aerodynamic Window and Its Molecular Diffusion Equations ..... | 189        |
| 7.3.2 Characteristics of Jet Injecting Aerodynamic Window .....                                     | 195        |
| References .....                                                                                    | 198        |