大连理工大学教授学术丛书 '97 卷

一氧化碳分子激光器

林钧岫 于清旭 著

大连理工大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

The professors Academic Works Series
of the Dalian University of Technology '97

The Carbon Monoxide Laser

Lin Junxiu Yu Qingxu

Dalian University of Technology Press

图书在版编目(CIP)数据

一氧化碳分子激光器/林钧岫,于清旭著. —大连:大连理工大学出版社,1998.7
大连理工大学教授学术丛书'97卷
ISBN 7-5611-1508-3

Ⅰ.一… Ⅱ.①林…②于… Ⅲ.一氧化碳分子激光器-原理分析-研制 Ⅳ.TN248.2

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第16345号

大连理工大学出版社出版发行
(大连市凌水河 邮政编码 116024)
大连业发印刷厂印刷

开本:850×1168毫米 1/32 字数:163千字 印张:6.625 插页:4
印数:1—3000册
1998年7月第1版 1998年7月第1次印刷
责任编辑:王佳玉 责任校对:王 堇
封面设计:孙宝福 版式设计:石 佳
定价:20.00元

序

激光技术即将在世纪之末迎来它的问世 40 周年。40 年来，激光作为本世纪最重要的发明创造之一，迅速地与多种学科和应用技术交叉发展并已经或正在转化成为强大的生产力。在未来世界各国高科技以及经济与国防实力的较量中，激光技术必将占有重要的位置。

一氧化碳分子激光器是激光家族中的重要成员，国内外对它的研究与开发一直十分重视，因为这不仅具有重要的学术意义，而且在光谱分析、铀同位素分离以及工业加工等方面都有重要的应用价值。

大连理工大学林钧岫教授和他领导的研究集体长期致力于这一领域的研究，在理论和实践上都取得了许多有创造性的、高水平的研究成果。本书就是总结和反映这些研究成果的一本理论与实践相结合的专著，是林钧岫教授在这一领域内呕心沥血，潜心研究近 20 年的结晶，也是国内第一本有关一氧化碳分子激光器的专著，它的出版确是一件很有意义的事。

这本书的鲜明特点是理论与实践的紧密结合,既有一氧化碳分子激光器的工作原理、理论分析与计算,又有激光器设计加工的实例。作者力图使读者按书中给出的数据与技术就可以复制出自己所需要的一氧化碳分子激光器。

该书取材先进,实用性强。特别值得指出的是这本书包含了作者近20年来在这一领域内的大量创新研究成果,使它成为一本很有特色的科技专著。

相信本书的出版将会有力地促进我国激光技术在国民经济中发挥更大的作用,为科教兴国做出更大的贡献。

周炳琨,中国科学院院士,清华大学教授,国家自然科学基金委员会副主任,中国著名激光和光电子学专家。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

前　言

爱因斯坦(A. Einstein)早在 1917 年就提出了关于激光的理论,但从物理学上找到一个能够有效地产生粒子布居数反转的体系和从技术上制作出高 Q 值的光学谐振腔,进而实现光的受激放大和振荡却用了 43 年的时间。直到 1960 年美国的 Maiman 才研制成功了第一台激光器——红宝石固体激光器。正如周炳琨院士在本书的序中写到的:“激光是本世纪最重要的发明创造之一”。它的‘诞生’给测量技术、光谱技术、导航与制导技术、医学、生物学、工业加工技术和国防等领域带来了革命性变化。在不到 40 年的时间里,激光技术以其势如破竹的发展速度雄辩地证明了在未来的光产业中它的不可取代的作用。

一氧化碳分子激光器作为激光器家族中的重要成员,自 1964 年由 C.K.N.Patel 研制成功之后的 20 多年时间里,由于它具有大于 90% 的量子转换效率、宽的波段覆盖范围、较短的波长和潜在的应用可能性,一直是许多国家重点研究与开发的重要课题之一。欧洲尤里卡(EUREKA)计划早在 80 年代就把一氧化碳分子激光器的研究列入计划中的第 113 项和第 115 项,并由德国、法

国、英国和荷兰承担研究开发工作。美国、俄国、日本在这个研究领域中也都有自己杰出的工作。在中国，在国家自然科学基金委员会重大项目(9687003)的资助下，大连理工大学应用物理研究所于1993年研制成功了我国第一台三轴正交自持放电1kW的高效率一氧化碳分子激光器系统。

回顾一氧化碳分子激光器30多年的发展历程，可以说它已由幼年时代步入青年时代，从输出功率方面由几毫瓦发展到10千瓦！从脉冲输出能量方面由毫焦耳发展到千焦耳；在波段上它能覆盖2.7 μm～4.2 μm(双振动能级激光跃迁 $\Delta v = 2$, $\Delta J = -1$)；4.8 μm～8.4 μm(单振动能级跃迁 $\Delta v = 1$, $\Delta J = -1$)。迄今为止，在近、中红外波段内还没有任何一种分子激光器有这么宽的波段覆盖范围和这么高的量子转换效率。

这本书是作者和同事们自1979年以来，在国内、外从事一氧化碳分子激光器研究工作的总结。作者深感一氧化碳分子激光器是一种具有重要应用前途的激光器，并且已在红外激光光谱技术中得到了广泛应用。然而还有大量理论、实验和工程问题仍需同行们为之努力探索，使它能从青年时代走向成熟，更好地为人类服务。至此，说明了本书的写作目的有以下两个方面：

其一是介绍已步入青年时代的一氧化碳分子激光器成熟的一面，即可以为科学研究，尤其基础理论研究和工业加工应用服务的领域。在本书中作者用较长的篇幅介绍的各种小功率宽频带一氧化碳分子激光器是已成熟的技术了，它已被应用于光声光谱分析仪、激光磁共振(LMR)光谱分析仪和法拉第激光磁共振(FLMR)光谱分析仪中，并在计算机的控制下与数据采集和处理系统融为一体。读者可以根据本书中给出的参数和工艺制作自己所需要的一氧化碳分子激光器。

其二是力图说明一氧化碳分子激光器在步入光产业中尚有待解决的一些工程和理论问题。突出的问题是如何提高运行温度进

而降低运行费用以及如何在大体积高注入功率密度情况下提高放电的长期稳定性。如果这些问题得以解决，一氧化碳分子激光器将在自我成熟的征程上向前迈进一大步，在工业应用中更好地体现出其自身价值。

在基础理论和实验研究方面作者认为还有两个波段值得研究，即一氧化碳分子的 $A^1\Pi, X^1\Sigma$ 之间的跃迁，这是紫外波段；$B^1\Sigma, A^1\Pi$ 之间的跃迁，这是可见光波段。如果在这两个波段能够获得激光跃迁，那么一氧化碳分子作为激光的增益介质，便可以使其激光频率覆盖范围达到从紫外波段到中红外波段。这不论是在理论上，还是在应用方面都是十分有意义的。

由于作者水平和工作经历所限，本书难免有不当之处，希望同行们能够提出宝贵意见，作者为此表示衷心的感谢！

林钧岫　于清旭

1998 年 5 月于大连理工大学

目　　录

序

前　言

第一章　绪　论…… 1

1.1　概　述 …… 1

1.2　宽频带可调谐一氧化碳分子激光器及其在光谱分析中的应用 …… 4

1.2.1　$\Delta v = 1$ 的激光跃迁 …… 4

1.2.2　$\Delta v = 2$ 的激光跃迁 …… 5

1.3　射频激励和波导一氧化碳分子激光器 …… 5

1.3.1　射频激励 …… 6

1.3.2　波导一氧化碳分子激光器 …… 6

1.4　大功率一氧化碳分子激光器及其工业应用 …… 7

1.4.1　在工业加工方面的应用 …… 8

1.4.2　开辟新的应用领域 …… 9

参考文献 …… 10

第二章　一氧化碳分子激光器的工作原理 …… 14

2.1　一氧化碳分子…… 14

2.2　激发与粒子布居数反转…… 17

2.2.1　电子碰撞激发…… 18

2.2.2　非谐性振动态, 振动态(V-V)泵浦 …… 19

2.2.3　振动态的粒子布居数分布…… 21

2.2.4　转动态的粒子布居数分布…… 24

2.2.5　粒子布居数的反转条件和增益系数…… 26

2.3 一氧化碳分子各振动能级之间的级联效应…… 28
2.4 各种气体组分的作用…… 30
2.4.1 氦气的作用…… 30
2.4.2 氮气的作用…… 31
2.4.3 氙气的作用…… 32
2.4.4 氧气的作用…… 34
2.5 冷却的作用及常采用的冷却方法…… 35
2.5.1 采用液氮冷却…… 35
2.5.2 采用气动膨胀冷却…… 35
2.6 一氧化碳分子电子基态 $X^1\Sigma$ 中高振动激发态与电子激发态 $A^1\Pi$ 之间的 V-E 传能及电子基态长波端的极限值…… 36
参考文献 …… 42
第三章 一氧化碳分子激光器的数值计算理论模型 …… 44
3.1 几种理论模型综述…… 44
3.2 稳态近似理论模型…… 47
3.3 一维解析动力学模型及其自洽解方法…… 55
3.3.1 电子能量分布的 Boltzman 方程 …… 56
3.3.2 一维流体和分子动力学基本方程…… 59
3.4 数值计算实例…… 63
参考文献 …… 67
第四章 几种一氧化碳分子激光器及其中部分激光器的制作技术 …… 68
4.1 低温(77K)流动式真空谐振腔宽频带一氧化碳分子激光器系统的设计与制作…… 68
4.1.1 一氧化碳分子激光器谐振腔防振台的制作…… 68
4.1.2 频率范围与光学元件的选择…… 70
4.1.3 带有真空夹层的激光管的设计与制作…… 81

4.1.4　电源与检测、控制系统 …… 82
4.1.5　真空与混气系统 …… 83
4.2　低温(77K)流动式真空谐振腔双波长同时振荡宽频带一氧化碳分子激光器(Δv = 1)的设计与制作 …… 85
4.2.1　双波长同时振荡一氧化碳分子激光器的工作原理、设计与制作 …… 86
4.2.2　光学元件的布局与选频系统 …… 87
4.2.3　双波长检测系统 …… 92
4.3　低温(77K)流动式真空谐振腔双振动能级跃迁宽频带一氧化碳分子激光器(Δv = 2)的设计与制作 …… 92
4.3.1　光学系统的选择 …… 93
4.3.2　检测系统 …… 94
4.4　三轴正交千瓦级横向流动直流自持放电一氧化碳分子激光器的设计与制作[15] …… 98
4.4.1　总体结构 …… 98
4.4.2　单程腔与三程腔光学系统设计 …… 98
4.4.3　测试系统 …… 100
4.4.4　电激励系统 …… 101
4.4.5　循环致冷系统的设计、制作 …… 104
4.4.6　输出特性 …… 106
4.5　低温(77K)纵向流动射频(RF)激励一氧化碳分子激光器的设计与制作 …… 109
4.5.1　射频电源 …… 110
4.5.2　匹配器的计算与制作 …… 111
4.5.3　射频激励纵向流动低温一氧化碳分子激光器的系统结构 …… 115
4.5.4　激光器系统的输出特性 …… 117
4.6　其他类型的一氧化碳分子激光器 …… 119

需要全本请访问 www.ertongbook.com

4.6.1 气动冷却超音速一氧化碳分子激光器 …… 119
4.6.2 电子束控制(EBC)直流放电激励方式大功率一氧化碳分子激光器 …… 120
参考文献 …… 121
第五章 一氧化碳分子激光器的应用实例 …… 124
5.1 作为光声光谱分析仪的可调谐光源 …… 124
5.1.1 应用于大气中有害气体分析 …… 126
5.1.2 用于生物学基础研究 …… 130
5.2 作为激光磁共振(LMR)光谱分析仪的分步可调谐光源 …… 134
5.2.1 激光磁共振(Laser Magnetic Resonance)的工作原理 …… 134
5.2.2 激光磁共振(LMR)光谱仪实验装置 …… 136
5.3 作为法拉第激光磁共振(FLMR)光谱分析仪的分步可调谐光源 …… 138
5.4 作为铀同位素分离的激发光源 …… 140
5.5 作为工业加工的射线工具 …… 143
5.5.1 激光在工业加工中应用概述 …… 143
5.5.2 一氧化碳分子激光器与二氧化碳激光器在金属切割加工中的比较 …… 148
参考文献 …… 152
第六章 使用激光器的安全与防护 …… 155
6.1 来自激光束的危害与防护 …… 156
6.2 来自加工过程产生的有害气体的危害与防护 …… 159
6.3 来自强激光作用下的光学元件的危害与防护 …… 160
参考文献 …… 161
附录Ⅰ 一氧化碳分子激光器谱线理论计算数值表

($\Delta v = 2, \Delta J = 1$)* …… 162
附录 II　宽频带一氧化碳分子激光器谱线图…… 183
后记 …… 187

Contents

Foreword
Preface
Chapter 1 Introduction ····· 1
1.1 General remarks ····· 1
1.2 Tunable broad-band CO laser applied to spectroscopic analysis ····· 4
1.2.1 $\Delta v = 1$ laser transitions ····· 4
1.2.2 $\Delta v = 2$ laser transitions ····· 5
1.3 Radio frequency excited CO lasers and waveguide CO lasers ····· 5
1.3.1 Radio frequency excitation ····· 6
1.3.2 Waveguide CO lasers ····· 6
1.4 High power CO lasers for industrial applications ····· 7
1.4.1 Industrial processing applications ····· 8
1.4.2 Developing new application fields ····· 9
References ····· 10
Chapter 2 Principles of CO Molecular Lasers ····· 14
2.1 CO molecule ····· 14
2.2 Excitation and population inversion ····· 17
2.2.1 Electron impact excitation ····· 18
2.2.2 Anharmonic vibrational- vibrational (V-V) pumping ····· 19
2.2.3 Distribution of CO vibrational state populations ····

21

2.2.4 Distribution of CO rotational state populations … 24

2.2.5 Population inversion and gain coefficients …… 26

2.3 Cascade effect of CO vibrational transitions …… 28

2.4 The roles of other laser gases …… 30

2.4.1 Helium …… 30

2.4.2 Nitrogen …… 31

2.4.3 Xenon …… 32

2.4.4 Oxygen …… 34

2.5 Functions and techniques of cooling …… 35

2.5.1 Liquid nitrogen cooling …… 35

2.5.2 Gas dynamic expanding cooling …… 35

2.6 Energy transfer between $X^1\Sigma$ state and $A^1\Pi$ state: limitation of long wavelength transitions …… 36

References …… 42

Chapter 3 Theoretical Models of CO lasers …… 44

3.1 Overview of theoretical models of CO lasers …… 44

3.2 Steady state kinetic model …… 47

3.3 One-dimensional analytical model and numerical solving method …… 55

3.3.1 The electron Boltzman equation …… 56

3.3.2 One-dimensional flow and molecular kinetic equations …… 59

3.4 An example of numerical calculation …… 63

References …… 67

Chapter 4 Design and Manufacturing Techniques of CO Laser Systems …… 68

4.1 Design of the longitudinal flow LN_2 cooled broad-band CO laser …… 68
4.1.1 Vibration isolated table …… 68
4.1.2 Selection of the optical elements and frequency coverage …… 70
4.1.3 Discharge tube with a vacuum jacket …… 81
4.1.4 Power supply, control and measurement system …… 82
4.1.5 Vacuum and gas mix system …… 83
4.2 Design of the simultaneous double-wavelength operating CO laser …… 85
4.2.1 Mechanism and design of the double-wavelength CO laser …… 86
4.2.2 The arrangement of the optical elements: wavelength selection system …… 87
4.2.3 Double-wavelength measurement system …… 92
4.3 Design of the CO-overtone laser $\Delta v = 2$ …… 92
4.3.1 Selection of the optical elements …… 93
4.3.2 Measurement system …… 94
4.4 Design of the kilo-watts order LN_2 cooled transverse DC excited CO laser …… 98
4.4.1 The general structure …… 98
4.4.2 Single pass and multi-pass optical resonant cavity …… 98
4.4.3 Measurement system …… 100
4.4.4 Electrical excitation system …… 101
4.4.5 Design of the gas circulation and cooling system …… 104

4.4.6 Characteristics of the laser output …… 106
4.5 Design of the RF excited longitudinal flow LN_2 cooled CO laser …… 109
4.5.1 RF power supply …… 110
4.5.2 Design of the RF adapter …… 111
4.5.3 System structure of the RF excited longitudinal flow CO laser …… 115
4.5.4 Output characteristics of the laser system …… 117
4.6 Other forms of CO lasers …… 119
4.6.1 Gas dynamic cooled supersonic CO lasers …… 119
4.6.2 Electron beam controlled DC excited high power CO lasers …… 120
References …… 121
Chapter 5 Application Examples of CO Lasers …… 124
5.1 As a tunable source of the photoacoustic spectrometer …… 124
5.1.1 Harmful trace gases analysis …… 126
5.1.2 Biological fundamental research …… 130
5.2 As a tunable source of laser magnetic resonant (LMR) spectroscopic analysis …… 134
5.2.1 Mechanism of LMR spectroscopic analysis … 134
5.2.2 An experimental setup of the LMR spectrometer …… 136
5.3 As a tunable source of Faraday LMR spectrometer …… 138
5.4 As an excitation source of uranium isotope separation …… 140
5.5 Applied to industrial processing …… 143

需要全本请访问 www.ertongbook.com