



国防工业出版社

> > > > >

程勇 著

# Adjust-free Solid State Laser

# 免调试固体激光器

本书是一部关于免调试固体激光器的专著,系统地总结了免调试固体激光器的理论、技术与工程应用研究成果。

本书可作为机械、电子、材料尤其是光电子领域的高年级本科生和研究生教材,也可供从事光电子、机械、电子等领域的人员参考。

**图书在版编目(CIP)数据**

免调试固体激光器 / 程勇著. —北京:国防工业出版社,

2012.8

ISBN 978 - 7 - 118 - 08045 - 2

I. ①免... II. ①程... III. ①固体激光器  
IV. ①TN248.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 170053 号

**免调试固体激光器**

著 者 程 勇

责任编辑 王 华

出版发行 国防工业出版社(010 - 88540776 010 - 88540717)

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号,100048

经 售 新华书店

印 刷 北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

开 本 710 × 960 1/16

印 张 34½

印 数 1 - 2000 册

字 数 595 千字

版 印 次 2012 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

定 价 166.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

# 前言

## FORE WORD

提高激光器在强振动、高温冲击等恶劣环境下的抗失调能力并改善光束质量,一直是从事激光器研究的科学家和工程师们孜孜以求的目标。

早在 1986 年我还在合肥工业大学应用物理系激光专业学习的时候,就被老师讲述的特殊反射镜所吸引。“美国人将角锥棱镜阵列通过‘阿波罗’登月飞船放置在月球表面,由地面上发出的激光经这个棱镜阵列反射,便能准确地测出月地之间的距离。”不论月地之间的相对位置如何变化,激光都能“自准直”返回测点。这是一个什么样的镜子?真神奇!1990 年一次偶然的的机会,我在重庆华光仪器厂(国营第 308 工厂)意外地发现了这个镜子,师傅叫它“正四面体棱镜”或“定向棱镜”。我第一次看到了这个神奇镜子的外形结构,并准确地了解了它的光学特性,就已爱不释手,虽然当时不知道它有什么用途,但我对它有一种强烈的好奇心!通过厂领导协调,我终于获得一块疵品,用于几何光学教学演示。1988 年—1997 年,我一直在武汉军械士官学校从事激光测距机维修教学,一个问题一直困惑着我,激光器的维修,对人员、设备和环境都有特殊要求,一般条件难以满足激光装备现场换件修理的需要。为了解决固体激光器快速修理问题,我想到了久违的“角锥棱镜”。利用它独特的“后向反射自准直特性”,可实现激光器“免调试”维修功能。免调试并非不要调试的意思,而是指激光器在较大的范围内不失调。由于受当时科研条件的限制,很快就将角锥棱镜拿到华中科技大学激光技术国家重点实验室,在脉冲固体激光器上做了“免调试”实验,实验结果很快就验证了免调试思想的正确性。

但由于角锥棱镜是一个疵品,至使激光阈值、模式和发散角等都较差。由于免调试特性的吸引,我没有被这些不良的表现感到失望,相反我充满信心地一头扎进“微型高精度”角锥棱镜的加工工作中。功夫不负有心人,通过反复研究与实践,汉南光学厂的周师傅终于为我们加工出  $\phi 8\text{mm} \times 8\text{mm}$ 、精度 2”的角锥棱镜。该棱镜通过螺纹旋转连接机构作为 Nd:YAG 激光器谐振腔的全反射镜,一次装机成功。

由此,我们发明了“免调试固体激光器”技术,将广为人知的角锥棱镜作为谐振腔的尾镜,利用其特有的自准直不失调功能、退偏特性、光学补偿特性、准相

位共轭特性和相干合成特性等一系列优点,解决了激光器在运动、强振动和低温环境中光束质量和可靠性差的难题,并在电光调 $Q$ 、光参量振荡DPL和光纤激光器相干合成等方面获得技术突破。

免调试固体激光器在激光测距、激光照射、光电对抗等方面取得了很好的实际应用效果。

随着“免调试固体激光器”技术研究与发展及其工程应用的不断深入,学术界与产业界对该技术的兴趣也不断浓厚,对于该技术的认识,同行们先后经历了怀疑、验证与使用的过程。期间,我曾赴中国科技大学、上海光学精密机械与物理研究所、安徽光学精密机械与物理研究所、应用光学研究所、华北光电研究所、中电集团第27所、西南技术物理研究所、中国工程物理研究院等单位请教、交流、合作与推广,我发现绝大多数学者与用户迫切需要激光工程技术方面的知识。为此,便产生了一个愿望,将研究成果进行总结,撰写一本专著——《免调试固体激光器》。

本书总结了作者及研究团队多年的研究成果,对免调试固体激光器进行了系统的阐述,并在参考大量国内外学者的研究成果的基础上撰写而成。本书由本人主笔,卢常勇、刘旭、万强、王会升、郭延龙和曹海源参与了部分内容的撰写,对本书做出了重要的贡献,他们同样享有著作权。

特别值得一提的是,本书中的主要核心内容和观点得到中国光学泰斗,中国科学院、中国工程院资深院士王大珩先生的高度评价和肯定,指出:免调试固体激光器在固体激光器方面做出了一项重要发明……不论军用、民用都有代替现有激光器的前景……;范滇元院士为本书作序;母国光院士主持了“免调试固体激光器”的科研成果的鉴定;姚建铨院士作为重点实验室的主任委员给予了本书的指导;总装备部综合计划部裴美成部长为本书的最终实现给予了支持;郑启光教授、胡雪金教授、毛少卿教授等为本书付出了辛勤劳动;另外,本研究团队王古常、王小兵、孙斌、刘洋等人也为本书内容的丰富和充实作出了贡献;在本书撰写过程中得到了研究团队年轻人朱孟真、陆益敏、杨雪、王淑云、黄国俊、米朝伟、谭朝勇、陈霞、韦尚方、黎伟、张广远、杨卓、初华、田方涛和王月年等人的大力帮助,加快了本书完成撰写的进程。对他们的贡献在此一并表示衷心地感谢。

在这里还要感谢我的爱人施炯在我身后默默地奉献,尤其是在我事业的艰辛攀登过程中给予的理解和支持,在此也深表谢意。

期望本书的出版能够对我国固体激光器技术的发展有一定帮助,并对该领域的人才培养有所裨益,最后诚挚地希望读者批评指正。

程 勇

2012年元月

# 目 录

CONTENTS

<b>第 1 章 免调谐固体激光器的物理基础</b>	<b>1</b>	<b>Chapter 1 Physical foundation of Adjust-free Solid State Laser</b>	<b>1</b>
1.1 激光的电磁辐射特性	3	1.1 The Electromagnetic Characteristics of Laser	3
1.1.1 激光具有波动性	3	1.1.1 The Wave Theory of Laser	3
1.1.2 激光具有粒子性	10	1.1.2 The Particle Theory of Laser	10
1.2 激光产生的基本原理	11	1.2 The Basic Theory of Laser Generation	11
1.2.1 原子结构和能级	11	1.2.1 Atomic Structure and Energy Level	11
1.2.2 爱因斯坦的辐射理论	12	1.2.2 Einstein Radiation Theory	12
1.2.3 粒子数反转分布	15	1.2.3 Population Inversion	15
1.2.4 激光增益与增益饱和	20	1.2.4 Gain and Saturation	20
1.3 线型函数与谱线加宽	21	1.3 Laser Spectrum Broadening and Lineshape Function	21
1.3.1 线型函数	22	1.3.1 The Lineshape Function	22
1.3.2 谱线均匀加宽	22	1.3.2 Homogeneous Broadening of Laser Spectrum	22
1.3.3 谱线非均匀加宽	24	1.3.3 Inhomogeneous Broadening of Laser Spectrum	24
1.4 速率方程	25	1.4 Rate Equation	25
1.4.1 激光三能级系统速率方程	25	1.4.1 The Three-level System	25
1.4.2 激光四能级系统速率方程组	28	1.4.2 The Four-level System	28
1.5 激光振荡与阈值条件	31	1.5 Laser Oscillator and Threshold	31
1.5.1 激光振荡	31	1.5.1 Laser Oscillator	31
1.5.2 谐振腔的损耗	32	1.5.2 Loss of Laser Resonator	32
1.5.3 激光振荡阈值条件	33	1.5.3 Threshold Condition of Laser Generation	33
1.6 光学谐振腔的模式特性	35	1.6 Mode Characteristics of Resonator	35
1.6.1 谐振腔的构成与种类	35	1.6.1 Configuration and Types of Resonator	35
1.6.2 光学谐振腔的作用	36	1.6.2 Resonator Function	36
1.6.3 腔模概念	36	1.6.3 Resonator Mode Conception	36
1.6.4 腔内驻波条件与纵模	37	1.6.4 Longitudinal Mode	37
1.6.5 横模	38	1.6.5 Transverse Mode	38
1.7 光学谐振腔的矩阵光学方法	46	1.7 Matrix Optical Method of Resonator	46
1.7.1 简单光学元件的光线矩阵	47	1.7.1 Matrix Method of Simple Optics Element	47
1.7.2 复杂系统的光线矩阵	48	1.7.2 Matrix Method of Complicated Optics System	48
1.7.3 腔内光线往返传播矩阵	49	1.7.3 Beam Transfer Matrix of Resonator	49
1.7.4 共轴球面镜谐振腔的等效	51	1.7.4 Equivalent of Coaxial Spherical Resonator	51
1.7.5 光波偏振的琼斯计算方法	52	1.7.5 Jones Matrix Method of Polarization	52
参考文献	57	Reference	57

<b>第 2 章 角锥棱镜的光学特性</b>	<b>58</b>	<b>Chapter 2 Optic Characteristics of Corner Cube Retroreflector</b>	<b>58</b>
2.1 角锥棱镜的反射特性	58	2.1 Reflection Characteristics of Corner Cube Retroreflector	58
2.1.1 角锥棱镜的形状与特性	58	2.1.1 The Shape and Characteristics of Corner Cube Retroreflector	58
2.1.2 角锥棱镜的有效反射面积	62	2.1.2 Effective Reflection Area of Corner Cube Retroreflector	62
2.1.3 角锥棱镜反射的数值模拟	68	2.1.3 Numeric Simulation of Corner Cube Retroreflector	68
2.2 角锥棱镜的偏振特性	78	2.2 Polarization Characteristics of Corner Cube Retroreflector	78
2.2.1 角锥棱镜偏振特性的描述	78	2.2.1 Description of Polarization Characteristics of Corner Cube Retroreflector	78
2.2.2 角锥棱镜的偏振特性	79	2.2.2 Calculation of Polarization State of Corner Cube Retroreflector	79
2.2.3 角锥棱镜的琼斯矩阵及其本征偏振态	85	2.2.3 Jones Matrix and Latent Vector of Corner Cube Retroreflector	85
2.2.4 斜入射至角锥棱镜的光偏振特性	91	2.2.4 Polarization Characteristics of Corner Cube Retroreflector on condition of Inclined Incidence	91
2.2.5 镀膜角锥棱镜反射光的偏振特性	95	2.2.5 Polarization Characteristics of Filmed Corner Cube Retroreflector	95
2.3 角锥棱镜的衍射特性	98	2.3 Diffraction Characteristics of Corner Cube Retroreflector	98
2.3.1 角锥棱镜的远场衍射特性	98	2.3.1 Diffraction Characteristics of Corner Cube Retroreflector in Far Field	98
2.3.2 偏振态对角锥棱镜远场衍射分布的影响	105	2.3.2 Influence of Polarization in Far Field Diffraction of Corner Cube Retroreflector	105
2.4 角锥棱镜阵列的光学特性	110	2.4 Optic Characteristics of Corner Cube Array	110
2.4.1 角锥棱镜阵列结构与特征	110	2.4.1 Configuration and Characteristics of Corner Cube Array	110
2.4.2 角锥棱镜阵列的反射特性	111	2.4.2 Reflection Characteristics of Corner Cube Array	111
2.4.3 角锥棱镜阵列的衍射特性	114	2.4.3 Diffraction Characteristics of Corner Cube Array	114
2.5 角锥棱镜及其阵列的准相位共轭特性	118	2.5 Quasi Phase Conjugate Characteristics of Corner Cube Retroreflector and Array	118
2.5.1 相位共轭波的定义及其性质	118	2.5.1 Definition and Property of Phase Conjugate Wave	118
2.5.2 角锥棱镜阵列的准相位共轭特性	120	2.5.2 Quasi-phase Conjugate Characteristics of Corner Cube Array	120
2.5.3 角锥棱镜阵列的保真度分析	121	2.5.3 Fidelity Analysis of Corner Cube Array	121

2.5.4	角锥棱镜阵列结构及制造误差对准共轭波面的影响	124	2.5.4	Influence of Configuration and Manufacture Error of Corner Cube Array on Quasi-phase Conjugate Wave	124
2.5.5	角锥棱镜阵列的波前畸变补偿特性	125	2.5.5	Compensation Characteristics of Corner Cube Array to Waveface Aberration	125
2.6	角锥棱镜及其阵列的相干特性	127	2.6	Coherent Combination Characteristics of Corner Cube Array	127
	参考文献	127		Reference	127
<b>第3章</b>	<b>角锥棱镜谐振腔</b>	<b>130</b>	<b>Chapter 3</b>	<b>Corner Cube Resonator</b>	<b>130</b>
3.1	角锥棱镜谐振腔的构成、种类与基本特性	131	3.1	Configuration, Types and Basic Characteristics of Corner Cube Resonator	131
3.1.1	角锥棱镜谐振腔的基本结构与种类	131	3.1.1	Configuration and Types of Corner Cube Resonator	131
3.1.2	角锥棱镜谐振腔的光学特性	135	3.1.2	Optic Characteristics of Corner Cube Resonator	135
3.2	角锥棱镜谐振腔的稳定性	135	3.2	Stability of Adjust-free Corner Cube Resonator	135
3.2.1	谐振腔稳定性条件	135	3.2.1	Stability Condition of Optic Resonator	135
3.2.2	谐振腔稳定图	137	3.2.2	Stability Figure of Optic Resonator	137
3.2.3	约束稳定腔与非稳定腔	137	3.2.3	Stable and Unstable Resonator	137
3.2.4	角锥棱镜谐振腔的约束稳定性分析	139	3.2.4	Stability Analysis of Corner Cube Resonator	139
3.3	单角锥棱镜谐振腔的抗失调特性	142	3.3	Anti-maladjustment Property of Single Corner Cube Resonator	142
3.3.1	谐振腔的失调灵敏度	142	3.3.1	Maladjustment Sensitivity of Resonator	142
3.3.2	抗失调的直角棱镜谐振腔	148	3.3.2	Porro Prism Resonator with Anti-maladjustment	148
3.3.3	自适应光学谐振腔	152	3.3.3	Adaptive Optical Resonator	152
3.3.4	单角锥棱镜谐振腔抗失调特性	153	3.3.4	Fundamental Principle of Anti-maladjustment of Single Corner Cube Resonator	153
3.3.5	腔镜的失调量对输出能量的影响	157	3.3.5	Influence of Maladjustment of Cavity Mirror on Output Energy	157
3.3.6	单角锥棱镜谐振腔抗失调实验	161	3.3.6	Anti-maladjustment Experiment of Single Corner Cube Resonator	161
3.4	单角锥棱镜谐振腔的热畸变补偿特性	168	3.4	Compensation Characteristics on Thermal Aberration of Single Corner Cube Resonator	168
3.4.1	固体激光器的热效应	168	3.4.1	Thermal Effect of Solid State Laser	168
3.4.2	含热透镜角锥棱镜谐振腔的稳定性分析	171	3.4.2	Stability Analysis of Corner Cube Resonator Including Thermal Lens	171
3.4.3	单角锥棱镜谐振腔对固体激光器热效应的光学补偿	175	3.4.3	Optical Compensation of Thermal Effect in Single Corner Cube Resonator for Solid State Laser	175



3.5 双角锥棱镜谐振腔的光学特性	177
3.5.1 双角锥棱镜谐振腔的高抗失调特性	177
3.5.2 双角锥棱镜谐振腔减少退偏效应	179
参考文献	179

#### 第4章 角锥棱镜谐振腔的输出特性

4.1 角锥棱镜谐振腔的输出能量	182
4.1.1 角锥棱镜谐振腔的输出能量	182
4.1.2 角锥棱镜谐振腔输出能量和脉宽的稳定性	183
4.2 单角锥棱镜谐振腔输出的模场特性	188
4.2.1 角锥棱镜谐振腔输出的本征模式	188
4.2.2 角锥棱镜谐振腔输出的本征偏振态	198
4.2.3 角锥棱镜谐振腔输出的退偏特性与相位补偿	203
4.3 角锥棱镜谐振腔特有的输出特性	203
4.3.1 角锥棱镜谐振腔输出的零漂移特性	203
4.3.2 角锥棱镜谐振腔单脉冲坪区电压展宽特性	205
4.3.3 角锥棱镜谐振腔脉宽压缩现象	208
4.3.4 角锥棱镜谐振腔消除子脉冲现象	210
4.4 角锥棱镜谐振腔的输出光场特性	211
4.4.1 角锥棱镜谐振腔的输出光场特性实验	211

3.5 Optical Characteristics of Resonator with Two Corner Cube Retroreflectors	177
3.5.1 Highly Anti-maladjustment Characteristics of Resonator with Two Corner Cube Retroreflectors	177
3.5.2 Polarization Characteristics of Resonator with Two Corner Cube Retroreflectors	179
References	179

#### Chapter 4 Output Characteristics of Corner Cube Resonator

4.1 Output Energy ( Power) of Corner Cube Resonator	182
4.1.1 Experiment of Output Energy (Power) of Corner Cube Resonator	182
4.1.2 Stability of Output Energy and Pulse Width of Corner Cube Resonator	183
4.2 Output Mode Characteristics of Corner Cube Resonator	188
4.2.1 Latent Mode of Corner Cube Resonator	188
4.2.2 Latent Vector of Corner Cube Resonator	198
4.2.3 Depolarization Characteristics and Phase Compensation of Corner Cube Resonator	203
4.3 Output Characteristics of Corner Cube Resonator	203
4.3.1 Nil Drift Characteristics of Corner Cube Resonator	203
4.3.2 Work Voltage Range Widen for Monopulse in Corner Cube Resonator	205
4.3.3 Pulse Width Decrease Phenomenon in Corner Cube Resonator	208
4.3.4 Sub-pulse Cleared Phenomenon in Corner Cube Resonator	210
4.4 Output Optical Field Characteristics of Corner Cube Resonator	211
4.4.1 Experiment of Output Optical Field Characteristics of Corner Cube Resonator	211

4.4.2	激光的相干平顶高斯激光束输出	215
4.4.3	热稳定角锥棱镜谐振腔的基模输出	220
4.5	角锥棱镜阵列谐振腔的输出特性	221
4.5.1	角锥棱镜阵列谐振腔输出特性模拟	222
4.5.2	角锥棱镜阵列谐振腔输出特性实验研究	224
4.6	双角锥棱镜谐振腔的输出特性	227
4.6.1	双角锥棱镜谐振腔输出的模式结构	227
4.6.2	双角锥棱镜谐振腔的偏振特性	235
	参考文献	238

**第5章 角锥棱镜谐振腔固体激光器**

5.1	固体激光器概述	241
5.2	免调试固体激光器	247
5.2.1	免调试固体激光器的基本结构与特性	247
5.2.2	激光工作物质	249
5.2.3	激光泵浦系统	258
5.2.4	免调试固体激光器冷却技术	263
5.3	免调试重复频率固体激光器	271
5.3.1	免调试免冷却重复频率固体激光器概述	271
5.3.2	免调试小型重复频率固体激光器	271
5.3.3	免调试DPL激光器的输出特性	274
5.3.4	角锥棱镜非平面环形腔单频固体激光器	275
5.4	角锥棱镜折叠腔激光器	277
5.4.1	角锥棱镜折叠腔的典型腔型结构	277

4.4.2	The Uniform Gauss Profile Beam Output	215
4.4.3	Fundamental Mode Output of Corner Cube Resonator	220
4.5	Output Characteristics of Corner Cube Array Resonator	221
4.5.1	Simulation of Output Characteristics of Corner Cube Array Resonator	222
4.5.2	Experiment Research on Output Characteristics of Corner Cube Array Resonator	224
4.6	Output Characteristics of Resonator with Two Corner Cube Retroreflectors	227
4.6.1	Mode Configuration of Resonator with Two Corner Cube Retroreflectors	227
4.6.2	Polarization Characteristics of Resonator with Two Corner Cube Retroreflectors	235
	References	238

**Chapter 5 Corner Cube Resonator Solid State Laser**

5.1	Summarization of Solid State Laser	241
5.2	Adjust-free Solid State Laser	247
5.2.1	Basic Configuration and Characteristics of Adjust-free Solid State Laser	247
5.2.2	Solid State Laser Material	249
5.2.3	Optical Pump System	258
5.2.4	Thermal Management	263
5.3	Adjust-free Solid State Laser with Repetitive Frequency	271
5.3.1	Summarization of Adjust-free and cooled-free Solid State Laser	271
5.3.2	Adjust-free Compact Solid State Laser with Repetitive Frequency	271
5.3.3	Output Characteristics of Adjust-free Solid State Laser with Repetitive Frequency	274
5.3.4	Single-frequency Solid State Laser with Nonplanar Corner Cube Resonator	275
5.4	Folded Resonator Solid State Laser with Corner Cube Retroreflector	277
5.4.1	Typical Configuration of Folded Corner Cube Resonator	277

5.4.2	角锥棱镜折叠腔的理论分析与实验研究	278
5.5	角锥棱镜阵列后腔镜致玻璃激光器	284
5.6	角锥棱镜谐振腔 Nd: Cr: GSGG 激光器	285
	参考文献	286
<b>第6章 免调试固体激光器调Q与锁模技术</b>		
6.1	调Q基本原理与方法	288
6.1.1	调Q的基本原理及调Q对激光器的基本要求	289
6.1.2	调Q方法	291
6.2	LD泵浦免调试谐振腔被动调Q的固体激光器	294
6.2.1	被动调Q的方法与特点	294
6.2.2	免调试谐振腔被动调Q固体激光器的输出特性	298
6.2.3	角锥棱镜谐振腔 Cr <sup>4+</sup> : YAG 被动调Q实验	303
6.3	免调试角锥棱镜谐振腔电光调Q固体激光器	308
6.3.1	电光调Q的基本原理及结构	308
6.3.2	角锥棱镜谐振腔电光调Q固体激光器	313
6.4	免调试声光调Q固体激光器	324
6.4.1	声光调Q原理	324
6.4.2	声光调Q器件的设计特点	326
6.4.3	声光调Q动态实验及输出特性	327
6.4.4	声光腔倒空激光器	328

5.4.2	Theoretic Analysis and Experimental Research of Folded Corner Cube Resonator	278
5.5	Nd:Glass Laser with Corner Cube Array as Cavity Mirror	284
5.6	Nd:Cr:GSGG Laser With Corner Cube Resonator	285
	References	286

<b>Chapter 6 Q-switched and Mode-locked Technology of Adjust-free Solid State Laser</b>		
6.1	Fundamental Principle and Method of Q-switched	288
6.1.1	Q-switched Principle and Fundamental Request	289
6.1.2	Q-switched Method	291
6.2	LD-pumped Passively Q-switched Solid State Laser with Adjust-free Resonator	294
6.2.1	Method and Characteristics of Passively Q-switched	294
6.2.2	Output Characteristics of Passively Q-switched Solid State Laser with Adjust-free Resonator	298
6.2.3	Experimental Research of Cr <sup>4+</sup> : YAG Passively Q-switched Laser with Corner Cube Resonator	303
6.3	Electro-optic Q-switched Solid State Laser with Adjust-free Resonator	308
6.3.1	Fundamental Principle and Structure of Electro-optic Q-switched	308
6.3.2	Electro-optic Q-switched Solid State Laser with Corner Cube Resonator	313
6.4	Acousto-optical Q-switched Solid State Laser with Adjust-free Resonator	324
6.4.1	Fundamental Principle of Acousto-optic Q-switched	324
6.4.2	The Design Characteristics of Acousto-optic Q-switched	326
6.4.3	Dynamic Experimental Research on Acousto-optic Q-switched and Its Output Properties	327
6.4.4	Acousto-optical Q-switched Cavity Dumped Laser	328

6.5 免调试锁模固体激光器	329	6.5 Mode-locked Solid State Laser with Adjust-free Resonator	329
6.5.1 锁模基本原理	330	6.5.1 Fundamental Principle of Mode-locked	330
6.5.2 角锥棱镜谐振腔 Nd:YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG 被动锁模激光器	335	6.5.2 Corner Cube Resonator Nd:YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG Passively Mode-locked Laser	335
6.5.3 角锥棱镜谐振腔被动锁模的实验	339	6.5.3 Experimental Research on Passively Mode-locked Laser with Corner Cube Resonator	339
参考文献	343	References	343
<b>第7章 免调试固体激光非线性器件</b>	<b>345</b>	<b>Chapter 7 Nonlinear Devices on Adjust-free Solid State Laser</b>	<b>345</b>
7.1 免调试固体激光倍频技术	345	7.1 The Frequency Doubling Technology on Adjust-free Solid State Laser	345
7.1.1 非线性极化	345	7.1.1 Nonlinear Polarization	345
7.1.2 激光倍频技术	352	7.1.2 The Frequency Doubling Technology	352
7.1.3 免调试倍频固体激光器	353	7.1.3 Frequency Doubling Solid State Laser with Adjust-free Resonator	353
7.2 免调试固体激光参量振荡器	354	7.2 Adjust-free Optical Parametric Oscillator	354
7.2.1 光参量振荡	355	7.2.1 Optical Parametric Oscillator	355
7.2.2 免调试光参量振荡器中的相位匹配	358	7.2.2 The Research of Phase-Matched on Adjust-free Optical Parametric Oscillator	358
7.2.3 光参量振荡器的结构形式	360	7.2.3 The Structure of Optical Parametric Oscillator	360
7.2.4 环形腔光参量振荡器的理论分析	361	7.2.4 The Theory Analysis of Optical Parametric Oscillator with Ring-Cavity	361
7.2.5 小型高效人眼安全免调试OPO固体激光器	367	7.2.5 Efficiency and Compact Eye-Safe Adjust-free OPO Laser	367
7.2.6 新型免调试OPO固体激光器	375	7.2.6 New Type Adjust-free OPO Laser with Adjust-free Resonator	375
参考文献	381	References	381
<b>第8章 角锥棱镜谐振腔激光相干合成技术</b>	<b>383</b>	<b>Chapter 8 Laser Beams Coherent Combining Technology with Corner Cube Resonator</b>	<b>383</b>
8.1 激光的相干合成技术	384	8.1 Laser Beams Coherent Combining Technology	384
8.1.1 激光相干合成的发展历程	385	8.1.1 The History of Coherent Combining of Laser Beams	385
8.1.2 激光相干合成的发展现状	387	8.1.2 The Development of Coherent Combining of Laser Beams	387
8.1.3 激光相干合成的基本理论	389	8.1.3 Fundamental Theory of Coherent Combining of Laser Beams	389

8.2	角锥腔固体激光器相干合成技术	391	8.2	Coherent Combining Technology of Solid State Laser with Corner Cube Resonator	391
8.2.1	角锥腔激光器相干特性	391	8.2.1	Coherent Combining Characteristics of Solid State Laser with Corner Cube Resonator	391
8.2.2	角锥腔激光器偏振锁相相干合成技术	396	8.2.2	Coherent Combining Based on Polarization Phase Locked of Solid State Laser with Corner Cube Resonator	396
8.2.3	角锥腔6路固体激光器相干合成技术	398	8.2.3	Coherent Combining of Six Solid State Lasers with Corner Cube Resonator	398
8.2.4	角锥阵列腔激光器相干合成技术	399	8.2.4	Coherent Combining Technology with Corner Cube Array Resonator	399
8.3	基于角锥的光纤激光器互注入相干合成研究	400	8.3	Mutual Injection Phase-locked Coherent Combining Technologies of Fiber Lasers with Corner Cube Retroreflector	400
8.3.1	互注入锁相多光束相干合成基本原理	401	8.3.1	Fundamental Principle of Coherent Combining with Multi-beam Phase-locked based on Mutual Injection	401
8.3.2	角锥腔两路光纤激光器互注入相干合成实验研究	405	8.3.2	Experimental Study on Coherent Combining of Two Fiber Lasers with Corner Cube Retroreflector Based on Mutual Injection Phase-locked	405
8.3.3	改进型的相干合成方案	409	8.3.3	Modified Scheme of Coherent Combining	409
8.3.4	单角锥多路光纤激光相干合成技术进展	412	8.3.4	Development of Coherent Combining of Muti Fiber Lasers with Corner Cube Retroreflector	412
参考文献		414	References		414
<b>第9章</b>	<b>免调试固体激光器的光束质量</b>	<b>418</b>	<b>Chapter 9</b>	<b>Beam Quality of Adjust-free Solid State Lasers</b>	<b>418</b>
9.1	激光光束质量的评价标准	418	9.1	Evaluation Standard of Beam Quality	418
9.1.1	激光光束质量的评价方法	419	9.1.1	Evaluation Method of Beam Quality	419
9.1.2	激光光束质量 $M^2$ 因子的测量方法	423	9.1.2	Measurement Method of $M^2$ factor	423
9.1.3	对光束质量评价的思考	425	9.1.3	Considerations on Beam Quality Evaluation Method	425
9.2	激光相干合成光束质量的评价和测量	426	9.2	Evaluation and Measurement of Beam Quality of Coherent Combining	426
9.2.1	传统评价方法对相干合成型光束质量评价的局限性	427	9.2.1	Limitation of Traditional Evaluation Method to Beam Quality of Coherent Combining	427
9.2.2	PIB <sub>m</sub> 方法及其测量	433	9.2.2	PIB <sub>m</sub> and Its Measurement	433
9.2.3	光束传输因子方法及其测量	439	9.2.3	BPF and Its Measurement	439

9.3 免调试固体激光器的光束质量	441	9.3 Beam Quality of Adjust-free Solid State Lasers	441
9.3.1 免调试固体激光器的光束质量的实验研究	443	9.3.1 Experiment Research on Beam Quality of Adjust-free Solid State Laser	443
9.3.2 侧向泵浦免调试 DPL 激光光束质量	451	9.3.2 Beam Quality of Side-pumped Adjust-free DPL	451
9.3.3 角锥棱镜谐振腔被动调 $Q$ 内腔式光参量振荡器(OPO)的光束质量	454	9.3.3 Beam Quality of Passive $Q$ -switched IOPO with Corner Cube Resonator	454
9.3.4 角锥阵列腔固体激光器相干合成的光束质量特性	454	9.3.4 Coherent Combining Beam Quality Characteristics of Solid State Lasers with Corner Cube Arrays Resonator	454
9.3.5 球面角锥棱镜非稳腔激光器的光束质量	458	9.3.5 Beam Quality of Unstable Resonator with Corner Cube Retroreflector	458
9.4 提高角锥棱镜谐振腔光束质量的方法与实验	460	9.4 Method and Experiment for Improvement Beam Quality with Corner Cube Resonator	460
9.4.1 提高免调试角锥棱镜谐振腔光束质量的方法	460	9.4.1 Method for Improvement Beam Quality with Corner Cube Resonator	460
9.4.2 角锥棱镜谐振腔对发散角的压缩	461	9.4.2 Experiment for Minishing Divergence Angle by Corner Cube Resonator	461
参考文献	463	References	463
<b>第 10 章 免调试固体激光器的设计</b>	<b>465</b>	<b>Chapter10 Design of Adjust-free Solid State Lasers</b>	<b>465</b>
10.1 免调试固体激光器的设计思想与原则	465	10.1 Design Idea and Principle of Adjust-free Solid State Laser	465
10.1.1 设计思想	465	10.1.1 Design Idea	465
10.1.2 设计原则	466	10.1.2 Design Principle	466
10.2 免调试固体激光器研制平台	468	10.2 Design and Manufacture Conditions	468
10.3 免调试固体激光器研制步骤	470	10.3 Design and Manufacture Steps of Adjust-free Solid State Laser	470
10.3.1 用户需求与指标分析	470	10.3.1 Customer Requirement and Index Analysis	470
10.3.2 方案设计与论证	470	10.3.2 Scheme Design and Demonstration	470
10.3.3 草台实验	473	10.3.3 Scheme Demonstration Experiment	473
10.3.4 初样机设计与加工	474	10.3.4 Primary Sample Design	474
10.3.5 性能试验	474	10.3.5 Performance Test	474
10.3.6 用户试用	474	10.3.6 Customer Probation	474
10.3.7 正样机设计	475	10.3.7 Formal Production Design	475
10.3.8 环境试验	475	10.3.8 Test Environment	475

10.3.9	用户使用	475	10.3.9	Customer Use	475
10.4	免调试固体激光器研制举例	475	10.4	Example for Adjust-free Solid State Lasers Design and Manufacture	475
10.4.1	角锥棱镜谐振腔被动调 Q-DPL 激光器设计	475	10.4.1	Design of Passively Q-switched Lasers with Corner Cube Resonator	475
10.4.2	折叠腔电光调 Q 固体激光器	482	10.4.2	Electro-optic Q-switched Laser with Folded Resonator	482
10.4.3	双波长自由切换二极管泵浦激光器的设计	489	10.4.3	Design of Dual-Wavelength Switchable Solid State Laser	489
10.5	角锥棱镜的设计、加工与检验	499	10.5	Design, Process and Test of Corner Cube Retroreflector	499
10.5.1	角锥棱镜的设计依据与步骤	499	10.5.1	Design Principle and Steps of Corner Cube Retroreflector	499
10.5.2	实心角锥棱镜的设计	500	10.5.2	Design of Solid Corner Cube Retroreflector	500
10.5.3	空心角锥棱镜的设计	505	10.5.3	Design of Hollow Corner Cube	505
10.5.4	角锥棱镜阵列的设计	506	10.5.4	Design of Corner Cube Array	506
10.5.5	具有曲率的角锥棱镜的设计	507	10.5.5	Design of Spherical Corner Cube Retroreflector	507
参考文献		507	References		507
<b>第 11 章</b>	<b>免调试固体激光器的应用与展望</b>	<b>510</b>	<b>Chapter 11</b>	<b>Application and Expectation of Adjust-free Solid State Laser</b>	<b>510</b>
11.1	免调试固体激光器的应用	510	11.1	Application of Adjust-free Solid State Laser	510
11.1.1	免调试固体激光器在测距中的应用	510	11.1.1	Application of Adjust-free Solid State Laser for Range Finder	510
11.1.2	免调试 OPO 固体激光器在人眼安全中的应用	511	11.1.2	Application of Adjust-free Solid State OPO Laser in the Field of Eye Safety	511
11.1.3	新型半导体泵浦固体激光器	512	11.1.3	New-type DPSSL Laser	512
11.1.4	免调试固体激光器输出相干合成的应用	512	11.1.4	Application of Adjust-free Solid State Laser in the Field of Coherent Combination	512
11.2	免调试固体激光器的未来发展趋势	513	11.2	Development of Adjust-free Solid State Laser	513
11.2.1	发展阵列反射镜大功率激光器	514	11.2.1	High Power Laser with Corner Cube Array	514
11.2.2	发展多路多波长固体激光器	514	11.2.2	Multi-beam and Multi-wavelength Solid State Laser	514
11.2.3	发展大功率薄片激光器	514	11.2.3	High Power Thin Disk Laser	514
11.2.4	发展大功率角锥相干合成光纤激光器	515	11.2.4	High Power Fiber Laser Based on Coherent Combination with Corner Cube Retroreflector	515
11.2.5	发展被动调 Q 角锥星载激光器	515	11.2.5	Passive Q-switched Spaceborne Laser with Corner Cube Retroreflector	515

11.3 其他类型的角锥棱镜谐振腔激光器	517	11.3 Other Types Laser with Corner Cube Resonator	517
11.3.1 免调试气体激光器	517	11.3.1 Gas Laser with Adjust-free Resonator	517
11.3.2 免调试自由电子激光器	521	11.3.2 Free Electron Laser with Adjust-free Resonator	521
11.3.3 免调试染料激光器	522	11.3.3 Dye Laser with Adjust-free Resonator	522
11.3.4 角锥棱镜谐振腔半导体量子阱激光器	523	11.3.4 Semiconductor Quantum Well Laser with Corner Cube Resonator	523
11.3.5 角锥棱镜谐振腔染料薄膜波导激光器	525	11.3.5 Dye Film Wave-guide Laser with Corner Cube Resonator	525
参考文献	527	Reference	527



## 第 1 章

# 免调试固体激光器的物理基础

激光器要产生激光振荡,要求谐振腔腔镜的平行度达到秒级精度,必须由专业人员借助专门手段严格调试才能达到这一要求,给生产、使用和维修等带来不便。欲达到“免调试”功能或特性,理论上可采用“非线性相位共轭腔”或利用自适应变形镜等技术。这些均在理论和实验研究方面表现出了能补偿腔内畸变、对失调不灵敏,并具有输出稳定性和光束质量好等优点,但由于种种原因至今难以实用化。

鉴于上述情况,国内外研究者都试图用各种形式的棱镜腔来改善激光输出的稳定性和光束质量。例如:

(1) 美国 G. Crow Thomas 于 1974 年发明了一种机械稳定性强的激光装置,即交叉波罗棱镜谐振腔,该技术备受各国军方的重视,已广泛使用。据报道,美国 NASA Goddard 空间飞行中心研制的火星探测系统 MOLA - 2 仍采用了该技术。

(2) 日本矢野 宣夫于 1994 年发明了一种激光振荡器,采用直角棱镜(特殊镀膜和工作状态)作为尾镜,与平面输出镜构成谐振腔,获得高抗失调稳定性和平顶高斯光束输出。

(3) 浙江大学范琪康等人,于 1987 年设计了稳定准直的线偏振输出激光器。采用角锥棱镜作为折反器构成折叠腔,谐振腔的两端反射镜由同一块玻璃基板分区镀以不同反射率的膜而构成。该激光器在强烈振动及大幅度温度变化环境下光学谐振腔能始终保持准直,激光输出功率稳定。

目前,绝大多数的激光尤其是军用激光装置(如激光测距机及目标指示器等)都采用最简单的谐振腔——平行平面谐振腔,激光器的谐振腔在恶劣环境下极易失调,导致光束质量劣化和输出能量急剧下降,甚至失谐停止输出。在使用和维修过程中暴露出一系列问题:可靠性差(故障率高)、光束质量差、对专业人员依赖性大、维修性差、维修成本高。