

*Xiangwei Kongzhi Fangfa*

# 相位控制方法

侯 静 贺军涛 著

国防科技大学出版社

# 相位控制方法

侯 静 贺军涛 著



国防科技大学出版社  
·长沙·

## 内 容 简 介

相位控制方法涉及对光波波前的实时探测、控制与校正,自适应光学是该领域最重要的内容。本书首先简要介绍了自适应光学的理论,针对目前处于学科前沿的共光路/共模块自适应光学技术进行了系统的理论和实验方面的研究,对系统关键器件、数据融合处理、全系统闭环实现以及误差等进行了分析,并详细介绍了 CP/CM 系统闭环实验;同时针对非线性光学变频过程的相位变化进行了研究,重点对位相畸变光束倍频过程作了理论数值模拟和实验方面的论述。

本书可供从事相位控制技术、自适应光学技术和非线性光学方面工作的科研人员和技术人员阅读,也可供相关专业的研究生和本科生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

相位控制方法/侯静,贺军涛著.—长沙:国防科技大学出版社,2011.11

ISBN 978-7-81099-651-8

I. ①相… II. ①侯… ②贺… III. ①相位控制—控制方法 IV. ①TM933.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 221158 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)84572640 邮政编码:410073

<http://www.gfkdcbs.com>

责任编辑:耿 筠 责任校对:曹 红

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

\*

开本:787×1092 1/16 印张:9.75 字数:196 千  
2011 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1-500 册

ISBN 978-7-81099-651-8

定价:35.00 元

# 前 言

自适应光学进行光束大气传输波前畸变校正时，要求系统必须能进行光束净化和校正大气湍流造成的波前畸变，并且能够同时有效地克服发射系统制造误差、重力变形以及光路内部气体扰动的影响，得到接近衍射极限的输出激光光束。常规自适应光学系统往往仅能有针对性地校正其中某一部分，而 CP/CM 自适应光学正是针对以上弱点提出的自适应光学新技术。它能实现全光路像差的探测与校正，对提高系统的集成性和可靠性有十分重要的意义。

根据不同的应用环境，本书提出了四种 CP/CM 衍生光路；进行了关键器件——角反射器阵列的保真度分析，给出了角反射器阵列作为伪相位共轭器件，与哈特曼-夏克波前传感器的匹配条件，认为角反射器阵列的布局要与哈特曼波前传感器的微透镜阵列布局完全对应，才能达到最优探测效果；提出了四种双哈特曼波前传感器控制一套波前校正器的数据融合方式，并逐一进行了分析，认为加修正因子斜率融合和电压融合方式在目前工程中是适用的，并进行了相应的数值模拟；给出了哈特曼波前传感器自身的调整误差分析过程，得到了误差可通过常规标定消除的判断依据；通过数值计算，得到了常规和 CP/CM 两种自适应光学系统中哈特曼波前传感器和变形镜的对准误差对系统性能的影响，给出了两种系统对于不同对准误差情况下校正效果的变化情况和相应系统容限；以 37 单元自适应光学系统为基础，搭建了 CP/CM 自适应光学系统光路，并完成了系列 CP/CM

功能实现实验,运用双哈特曼波前传感器数据融合方法,首次成功实现了CP/CM自适应光学系统的闭环实验。

这部分工作为CP/CM自适应光学展现了很好的应用前景,为后续CP/CM自适应光学真正走向工程实际应用打下了坚实的理论和实验基础。

在惯性约束核聚变(ICF)研究中,激光核聚变通常使用非线性光学方法将基波转换成二次或三次谐波,并实现多路激光束精确射向靶丸,那么,就要重点控制变频器件的光束转换和出射光束的质量。自适应光学也被引入用以保证其光束质量,但变频过程中基波的位相畸变对于转换效率、打靶光束的光强分布和位相分布都有怎样的影响,是目前急需解决的问题,这不仅决定了自适应光学系统的设计,同时对整个惯性约束系统来说也是重要课题之一。因此,我们又对位相畸变光束变频过程做了研究,其中重点对倍频过程中基波位相畸变对转换效率、谐波的光强分布和位相分布的影响进行了理论、数值模拟和实验方面的工作。

首次从三维三波相互作用方程组推导得到了位相畸变光束倍频的小信号解;通过建立三维数值模型,编写相应仿真程序,首次得到了位相畸变光束倍频过程的大量计算结果,深入细致地研究了位相畸变光束经非线性光学频率变换后谐波的转换效率、光强分布、位相分布以及影响它们的各种因素;得出谐波的远场发散角和光斑二阶矩的变化规律会因为基波像差的不同而不同,但谐波的远场发散角明显地比相应基波的小的结论;得到了在走离效应和衍射效应等影响许多因素可以忽略的情况下,位相畸变传递到二次谐波的估算式;举例分析了ICF中KDP三倍频方案中,基波位相畸变对二次谐波和三次谐波的影响;实验中,用哈特曼波前传感器分别对1064nm倍频过程和790nm飞秒超短脉冲倍频过程中的基波和谐波的位相分布进行了测量,给出了相应结果。研究结果表明位相失配和走离效应是影响

响谐波位相的重要因素；像差在非线性光学过程中传递结果不是线性叠加的，而是非线性的。

通常三波相互作用过程的研究均是建立在平面波和理想高斯光束之上，因此我们对于位相畸变倍频过程的研究也是非线性光学领域一个重要而有意义的前沿课题，它有助于人们更加深入理解非线性光学效应，为进一步合理利用之奠定了理论和实验的基础。

本书共分八章。第一、二章和第三章，主要介绍自适应光学和三波相互作用的国内外研究动态、发展状况及其基本理论。第四章重点从理论上进行共光路/共模块自适应光学原理研究，包括角反射器阵列的保真度以及其与哈特曼-夏克波前传感器的匹配问题、双哈特曼波前传感器数据融合问题、哈特曼波前传感器自身的调整误差分析、哈特曼波前传感器和变形镜的对准误差分析以及针对以上各问题的相应数值模拟；第五章介绍了CP/CM自适应光学系统的实验工作。第六章是介绍位相畸变光束的变频过程理论及数值分析，给出了位相畸变光束倍频小信号解和位相畸变光束倍频的数值模拟计算结果；第七章给出了位相畸变光束的变频过程实验结果。第八章是对全书的总结和对未来工作的展望。

由于作者水平有限，书中难免存在错误和缺点，欢迎读者批评指正。

侯 静 贺军涛

2011 年 10 月于长沙

# 目 录

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| 第一章 绪 论 .....                  | ( 1 )  |
| 1.1 自适应光学的发展动态 .....           | ( 2 )  |
| 1.2 非线性光学——三波相互作用过程的研究动态 ..... | ( 6 )  |
| 1.3 本文主要内容 .....               | ( 9 )  |
| 参考文献 .....                     | ( 10 ) |
| 第二章 自适应光学理论 .....              | ( 12 ) |
| 2.1 自适应光学系统基本组成 .....          | ( 12 ) |
| 2.1.1 波前传感器 .....              | ( 13 ) |
| 2.1.2 波前校正器 .....              | ( 14 ) |
| 2.1.3 波前控制器 .....              | ( 15 ) |
| 2.2 波前复原算法 .....               | ( 16 ) |
| 2.2.1 Zernike 模式法 .....        | ( 16 ) |
| 2.2.2 直接波前斜率法 .....            | ( 18 ) |
| 2.2.3 特性评价指标 .....             | ( 19 ) |
| 2.3 控制模型 .....                 | ( 22 ) |
| 参考文献 .....                     | ( 23 ) |
| 第三章 三波相互作用基本原理 .....           | ( 25 ) |
| 3.1 晶体的非线性光学效应 .....           | ( 25 ) |



---

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| 4.5.3 数值模拟仿真 .....                | (70)      |
| 4.6 哈特曼-夏克波前传感器与变形镜的对准误差 .....    | (72)      |
| 4.6.1 常规自适应光学系统 .....             | (72)      |
| 4.6.2 CP/CM 自适应光学系统 .....         | (77)      |
| 本章小结 .....                        | (82)      |
| 参考文献 .....                        | (82)      |
| <br>第五章 共光路/共模块自适应光学系统实验 .....    | <br>(85)  |
| 5.1 实验装置 .....                    | (85)      |
| 5.2 伪位相共轭补偿位相畸变实验 .....           | (86)      |
| 5.3 位相探测的准确性实验 .....              | (87)      |
| 5.4 分光镜镜面变形探测实验 .....             | (90)      |
| 5.5 CP/CM 自适应光学系统分解光路闭环实验 .....   | (91)      |
| 5.6 CP/CM 自适应光学系统全光路原理性闭环实验 ..... | (92)      |
| 本章小结 .....                        | (100)     |
| 参考文献 .....                        | (100)     |
| <br>第六章 位相畸变光束的变频过程理论及数值分析 .....  | <br>(101) |
| 6.1 位相畸变光束倍频小信号理论 .....           | (101)     |
| 6.1.1 小位相畸变小信号解 .....             | (101)     |
| 6.1.2 小位相畸变信号解 .....              | (103)     |
| 6.1.3 举例分析 .....                  | (104)     |
| 6.2 数值模拟 .....                    | (106)     |
| 6.2.1 数值模拟模型的建立 .....             | (106)     |

---

|                                    |              |
|------------------------------------|--------------|
| 6.2.2 计算结果与结论 .....                | (108)        |
| 6.3 二次谐波的远场发散角和光斑二阶矩 .....         | (119)        |
| 6.3.1 远场发散角 .....                  | (119)        |
| 6.3.2 光斑二阶矩 .....                  | (122)        |
| 6.4 三倍频过程研究 .....                  | (123)        |
| 6.4.1 理论与计算模型 .....                | (124)        |
| 6.4.2 数值模拟结果 .....                 | (125)        |
| 本章小结 .....                         | (130)        |
| 参考文献 .....                         | (130)        |
| <b>第七章 位相畸变光束的倍频过程实验 .....</b>     | <b>(132)</b> |
| 7.1 实验装置 .....                     | (132)        |
| 7.2 位相分布测量实验结果 .....               | (134)        |
| 7.2.1 1064nm 倍频光束位相分布测量实验 .....    | (134)        |
| 7.2.2 790nm 超短脉冲倍频光束位相分布测量实验 ..... | (138)        |
| 7.3 结论 .....                       | (143)        |
| <b>第八章 总 结 .....</b>               | <b>(144)</b> |

# 第一章 绪 论

在光束的产生和传输过程中,有许多不可预知的扰动因素造成波前畸变。光学仪器、观测或者作用的对象、光波传输通道和工作环境之中任何一个环节都会存在扰动因素从而引入波前像差,特别是对于在恶劣条件下工作的大型光学系统,这些扰动因素极大地降低了传输光束的质量,严重影响其运用。传统的光学技术只能通过光学设计、加工或装校的巨大努力来降低光学系统自身像差,选择宁静的工作环境来减小光束通道引入的像差,保持光学系统处于恒温状态下工作来改善温度变化的影响,减轻光学系统自身重量来改善重力变化的影响。由于传统的光学技术不具有能动地适应环境变化的能力,对随时间变化的动态扰动因素,如大气湍流、温度和重力变化等,无法从根本上加以消除,因此动态干扰成为几百年来困扰光学工作者的老问题。在广泛的应用场合里,例如高能激光器、高功率激光传输、大型天文望远镜及其他许多的光学系统的应用中,都需要实时检测和补偿光束的波前畸变,因此,自适应光学技术应运而生,并成为当前光学领域极其活跃的前沿研究方向之一。

另外,在惯性约束系统中,激光核聚变的进展异常神速。为了确保多路激光束精确射向靶丸,需要重点控制变频器件的光束转换和出射光束的质量,因而对于变频器件的研究也成为整个装置中的关键技术之一。自适应光学也被引入用以保证其光束质量,但变频过程中基波的位相畸变对于转换效率、打靶光束的光强分布和位相分布都有怎样的影响,是目前急需解决的问题,这不仅决定了自适应光学系统的设计,同时对整个惯性约束系统来说也是重要课题之一。与此同时,在其他一些对谐波的光束质量的要求很高的实际工程应用中,也需对位相畸变光束变频转换后的光强分布和位相分布有定量的了解,但现有的非线性光学的工作都以理想的平面波和高斯光束为基础,因此系统研究位相畸变光束变频过程这一课题在非线性光学领域不仅在理论上有很高的价值,而且具有相当重要的实际应用意义。

## 1.1 自适应光学的发展动态

自适应光学<sup>[1]</sup>(Adaptive Optics)是一门集科学性和工程性的综合学科,它是研究实时自动改善光波波前质量的理论、系统、技术和工程,利用光电子技术实时测量波前误差,用快速的电子系统计算和控制,用能动波前校正器件进行实时波前校正,是改善成像系统的分辨能力和激光传输系统的光束质量的有力保证。自适应光学系统<sup>[2-3]</sup>主要由波前探测器、波前校正器和波前控制器三部分组成。波前探测器是用于波前测量,由于波前位相的直接测量是相当困难的,因此一般首先测量波前斜率和波前曲率,通过波前复原算法重构出波前的形状和大小。波前校正器是主要是用于实现波前误差的实时校正的光学器件,常用的有变形反射镜、薄膜反射镜和液晶空间光调制器等等。波前控制器是将波前探测器探测到的信号经过控制算法转化为波前校正器的控制信号,驱动波前校正器改变波前形状,从而有效地校正各种扰动对激光光束质量的影响,得到接近衍射极限的输出激光光束或成像质量。自适应光学的研究内容包括扰动源理论、波前探测理论、波前信息处理理论与技术、波前校正理论与技术、相关器件设计和工艺方法及具体工程实施方法等。在一些关键的部分如波前探测等也急需有新的探索,使得在现有的器件基础上,工作波段得以拓宽。

自适应光学的发展历史可以概括为三个阶段:20世纪50年代到70年代为提出阶段,70年代到80年代末期为军事应用为主的阶段,80年代末期至现在为扩大应用阶段。

20世纪50年代到70年代初为自适应光学的提出阶段。1953年美国天文学家巴布柯克<sup>[4]</sup>首次提出在地基天文望远镜上校正由于大气湍流扰动所造成的光学波前畸变的想法。虽然他的方案一直未能付诸实际,然而这种思想却已成为自适应光学的开端。事实上,在那个年代,大气湍流对光波波前位相扰动的情况人们尚不清楚,另外,那时的光电技术和计算机水平还很低,不能满足自适应光学的需要。70年代到80年代末期为自适应光学的军事应用为主的阶段。随着大型天文望远镜和高功率激光传输系统的发展,对克服动态扰动的需求日益迫切,在大气湍流理论和自适应光学基本原理相对成熟的基础上,光学加工技术和自动控制技术及其他支撑技术相结合,70年代初第一套自适应光学实时大气补偿系统诞生,自此该领域受到了高度的重视和广泛的研究,到70年代末国外发展成自适应光学这一崭新的光学技术。由于自适应光学在空间监测和激光能量传输方面的巨大应用潜力,美国军方开始投入了大量的资金。80年代末期至现在为扩大应用阶段,1991年美国军方对其自适应光学技术所作的局部解密进一步

促进了自适应光学技术的民用推广<sup>[5]</sup>。

目前自适应光学技术不仅被应用于天文观测、空间监测和激光传输系统中,而且也在卫星对地观测中使用。在闻名于世的哈勃(Hubble)空间天文望远镜上,就采用了自适应光学技术校正由于失重和温度变化引起的光学系统误差。此外,还成功地在光束净化、光束整形、大型光学系统误差校正、激光核聚变、激光腔内像差校正以及医学人眼像差的检测与校正等多方面都得到了应用,使得光学观测能力达到了接近衍射极限的水平,此外自适应光学在通讯和遥感等方面的应用也得到了积极研究。

天文观测,即校正成像系统由于大气湍流扰动所造成的光学波前畸变是自适应光学系统应用最为广泛的领域<sup>[6]</sup>。在1972年,美国研制出了第一套实时大气补偿成像实验系统。这个系统在300米水平光路上成功地对大气湍流效应进行了补偿,经补偿后的图像分辨率接近衍射极限<sup>[7]</sup>。1982年在夏威夷附近的美国空军毛伊(Maui)岛光学站上,安装了世界上第一台实用的1.6米自适应光学望远镜,用于对空间目标的监测。该系统在可见光波段(0.4~0.7微米)工作,有168个子孔径,波前传感器为横向交变剪切干涉仪,波前校正元件为168单元整体式压电变形镜,采样频率为10000赫兹,带宽为200~1000赫兹,探测灵敏度达7等星。在805km的距离上系统的分辨率可达0.3m,即0.07角秒,表明该系统在1.6m口径的和0.6 $\mu\text{m}$ 工作波长的情况下达到衍射极限的成像质量<sup>[8]</sup>。

20世纪80年代末期,欧洲南方天文台在法国空间研究院和莱塞多特(Laserdot)公司的协助下,进行了称为COME-ON的自适应光学计划。系统采用19单元连续镜面变形反射镜,用哈特曼-夏克传感器探测光波波前动态畸变。系统在可见光波段进行波前探测,在红外波段进行成像校正。1989年该系统被装到位于法国上普洛旺斯天文台的1.52m天文望远镜上进行实验,成功地在红外波段实现了校正。在波长大于2.2 $\mu\text{m}$ 的波段内,星像接近衍射极限,在波长较短时望远镜的像质也有很大改善。由于所用的像增强器噪声大,系统所能观测的极限星等只有3等<sup>[9]</sup>。1990年系统运到智利,安装到拉-西拉(La-Silla)的欧洲南方天文台3.6m望远镜上进行实验时,改用了低噪声的CCD探测器,使系统的探测能力大大提高,达11.5星等<sup>[10]</sup>,实验获得了圆满成功。这两次实验是自适应光学技术在天文上第一次取得的成功应用,对世界天文界造成很大震动,被认为是天文观测技术发展的里程碑。它大大推动了自适应光学技术在天文观测上的应用,现在各国正在进行的大型天文望远镜计划,几乎都要采用自适应光学技术,在这一过程中自适应光学技术自身也得到了长足的发展。

另外据报道,美在海湾战争中使用的摄像成像侦查卫星KH-12,口径2.4m,由于采用了自适应光学技术在160km的轨道高度上用可见光成像,地面分辨率可达8~10cm<sup>[11]</sup>。美国在20世纪90年代的天文研究计划中确定自适应光学是中等规模项目中

的第一优先项目,在机载激光武器(ABL)计划中自适应光学被列为三大关键技术之一。

自适应光学补偿大气不仅在上述各种成像系统得到广泛应用,对于激光传输与光束控制也是非常重要的<sup>[12]</sup>。例如,由林肯实验室与低功率大气补偿卫星(LACE)相配合进行激光光束大气湍流补偿实验的短波长自适应光学技术(SWAT)实验系统,系统发射口径为 0.6m,其中采用了高速面阵 CCD 相机构成的哈特曼波前传感器、241 单元连续表面电致伸缩变形反射镜和数字高速专用波前处理计算机等先进技术<sup>[13]</sup>。

对于激光发射系统,除了同样要求补偿光束传输过程中所受到的各种扰动外,还需要实时校正激光器发射光束自身的像差,因此光束净化自适应技术也应运而生<sup>[14]</sup>。按照自适应光学系统的波前校正器相对于激光谐振腔的位置划分,可分为腔内自适应光学技术和腔外自适应光学技术两类。腔内自适应光学技术是将自适应光学系统的波前校正器置于激光谐振腔内构成自适应光学谐振腔,通过在激光谐振腔内校正谐振腔的静态和动态像差,可以保持激光谐振腔正确的谐振条件,提高激光器输出激光功率,改善输出激光近场光强和位相分布;腔外自适应光学技术是将自适应光学系统的波前校正器置于激光谐振腔外,一般是利用波前补偿的原理改善激光器输出光束的近场位相分布,以达到提高远场光斑能量集中度的目的。在激光谐振腔外自适应光学技术方面,20 世纪 70 年代中期美国林肯实验室采用多元高频振动技术和 52 单元冷却变形反射镜,校正  $10.6\mu\text{mCO}_2$  激光器的输出光束像差,首次演示了高能激光器像差的补偿<sup>[10]</sup>;1986 年到 1987 年,美国林肯实验室研制和实验了局部回路补偿系统以校正中红外先进化学激光器的像差,针对  $3.6 \sim 4.2\mu\text{m}$  的 DF 高功率激光器,自适应光学系统使用冷却的 69 单元变形反射镜和多元高频振动传感技术,显示了输出激光束亮度的显著改善,表明这种补偿可以在军用的激光器功率水平上实现<sup>[10]</sup>。由于多元高频振动自适应光学技术存在局部极大值锁定问题,并且其多路串行的控制方式也难以满足自适应光学系统的空间带宽和时间带宽的要求,因此腔外自适应光学技术更多的是采用波前补偿原理。1985 年 Itek 研制了激光波前补偿系统,用于对连续或脉冲激光光束进行净化,工作波长  $0.35 \sim 1.0\mu\text{m}$ ,采用 64 单元变形反射镜和直流剪切干涉仪,工作带宽 100Hz;1988 年 TRW/Itek 研制了像差控制补偿系统,用于对化学激光器输出光束的净化和诊断,工作波长  $2.0 \sim 4.0\mu\text{m}$ ,采用 97(800)单元变形反射镜和交流剪切干涉仪,工作带宽 1000Hz<sup>[15]</sup>。1990 年 Lawrence Livermore 实验室的 J. Thaddeys Salmon 等人建立了一个校正激光像散的自适应光学系统,使用中等功率的激光器,激光光束截面为  $120 \times 8\text{mm}^2$ ,采用 Hartmann 波前传感器和压电驱动的 15 单元变形反射镜,校正频率为 6Hz<sup>[16]</sup>。

大气补偿和光束净化是激光发射系统中不可缺少的两个部分,而自适应光学系统制造困难、费用高昂,常规系统仅能有针对性进行光束净化或大气湍流校正或光路内部扰动校正,不能在一套系统中完成以上功能,导致系统庞大,成本昂贵,严重影响了系统

的集成性和稳定性,系统受到了极大地限制。近年来,开始进行自适应光学低成本化和系统功能集成方面的探索。1999年首次由 Kenneth W. Billman 公开发表在 ABL 中应用的新的自适应光学技术有关的原理性文章<sup>[17]</sup>。共光路/共模块(CP/CM)自适应光学就是针对以上问题而提出的,而 CP/CM 自适应光学正是针对以上弱点提出的自适应光学新技术,能有效解决这一系列问题,在一套系统内实现全光路像差的探测与校正,对提高系统的集成性和可靠性都有十分重要的意义。由于保密的原因,文章<sup>[11]</sup>仅对 CP/CM 原理加以简单介绍,细节技术和实验结果都未给出,到目前为止,作者还未在其他期刊或会议论文录上,查到相关文献。

我国关于自适应光学研究起步于 1979 年,现已独立自主地建立了自适应光学的技术基础,并取得了令人瞩目的成就,处于世界前列<sup>[18]</sup>。先后研制成功高频振动法波前校正系统、动态波前误差校正系统、37 单元实验系统、太阳望远镜自适应光学系统、激光谐振腔倾斜误差的自动寻优、61 单元自适应光学波前校正系统、2.16m 望远镜红外自适应观测系统以及人眼视网膜成像自适应光学系统等多套自适应光学系统<sup>[19]</sup>。其中 1985 年研制的 19 单元激光波前校正系统,被用于“神光 I”激光核聚变装置上,校正这一装置中的制造误差、光学材料的不均匀性以及装调误差等静态误差,使静态焦斑能量集中度提高了 3 倍,成为国际同类装置中首先成功使用的自适应光学系统;1990 年 21 单元动态波前误差校正系统与云南天文台的 1.2m 望远镜对接实现了对自然星体的大气湍流校正,获得了分辨双星的清晰照片,使我国成为继美国和德国之后第三个实现这一目标的国家;2000 年利用新研制出的 19 单元微小型变形镜建立了人眼视网膜成像自适应光学系统,并获得了较清晰的人眼底图像。另外,这些工作同时也带动了自适应光学理论的发展,能动光学元件<sup>[20]</sup>、微驱动技术和光束动态诊断技术<sup>[21]</sup>等单元技术方面的创新,取得了许多令人瞩目的成果,不仅是自适应光学的基础,其本身也有广泛的应用。

自适应光学一方面是向着微小型和集成型,另一方面又向大型光学系统和强光学系统发展。低成本化是两者的共同需求。例如用传统方法制作变形镜的成本很高,现在出现一种值得重视的发展趋势是采用光刻和微机械技术来制作变形镜,这样可使变形镜的制作成本大幅度降低,并且给系统的小型化和集成化带来希望。随着技术的发展,自适应光学系统有可能成为一个小型集成光学系统,在激光波面变换工程、空间激光通讯、遥感成像以及医学等广泛领域得到应用。

## 1.2 非线性光学——三波相互作用过程的研究动态

受控热核聚变研究旨在探索新能源,因此它是当代备受世人瞩目的重要科研项目之一。为实现受控热核聚变,必须把等离子体约束足够长时间,目前实现途径有两个:一是磁约束,另一个是惯性约束。然而,磁约束方式既存在各样的宏观不稳定性,又存在有各种微观不稳定性,它们都可能使约束受到破坏。20世纪50年代初,就有人从氢弹爆炸中受到启发,寻找到了—种通过惯性进行约束的方式。在氢弹爆炸中,氢的加热是由 $^{235}\text{U}$ 裂变炸弹爆炸完成的。由于自身的惯性,在爆炸的极短瞬间,等离子体来不及四处扩散,就被加热到极高温而发牛聚变反应。60年代,激光问世后,为可控加热方式提供了可能。1963年,前苏联的巴索夫与中国物理学家王淦昌分别提出了激光核聚变方案,即是利用高功率的激光束或粒子束辐照聚变燃料,使靶材料形成等离子体,由于自身惯性,在未来得及四散开来以前,聚变燃料被压缩至高温(5千万度以上)高密度( $600\text{g}/\text{cm}^3$ )发牛聚变反应。

惯性约束的原理虽然简单,但实现受控热核聚变尚需克服—系难题。首先,要有足够强的激光器。根据劳孙判据,要在极短时间( $10^{-10}\text{s}$ )内,把直径1mm的氘氚燃料靶加热到热核反应温度,激光器的能量应达到 $10^9\text{J}$ ,这几乎是不可能的。1972年,美国的尼科尔斯、华能等人又提出了一种“向心聚爆方案”。在核爆炸前,通过向心聚爆,把靶丸压缩到高密度,密度升高,可以相应降低热核反应温度,从而减小激光器的能量。当聚爆的瞬时高压达到 $10^{17}$ 帕斯卡时,利用驱动器使靶丸吸收激光或粒子束的能量,靶丸表面融蚀,向外喷射形成超高强的向内压力。为达到这一目的,来自驱动器的激光或粒子束波形和靶丸的结构要匹配得当。这对驱动器和靶丸的要求都很严格。向心聚爆原理的提出,给激光核聚变研究带来了活力。目前,惯性约束已与磁约束一起,成为受控热核聚变研究的两大平行发展的途径。由于激光器与聚变堆是分开的,惯性约束反应堆将比磁约束聚变堆简单得多。此外,惯性聚变研究还可用于军事目的。由于用惯性约束聚变模拟真实热核爆炸,可以在实验室获得数据资料,免去实弹实验的巨额耗资,一些拥有核武器的国家也在积极进行此项研究。

在惯性约束系统中,激光核聚变的进展异常神速。采用直接驱动法的激光聚变技术进展最大的是日本GEKKO-XII钽玻璃激光器,它的能量达到 $10\text{kJ}$ ,波长 $526\text{nm}$ ,它已将氘氚靶丸压缩到固体密度的600倍。现计划将激光器能量再提高100倍,用24路激光束射向靶丸,实现点火实验。美国直接驱动的激光聚变研究基地在罗彻斯特大学实验室OMEGA激光器,它的能量达 $2\sim 3\text{kJ}$ ,光脉冲宽度为 $1\text{ns}$ ,波长 $351\text{nm}$ ,激光分24路

射向靶丸,氘氚燃料可被压缩到 200 ~ 300 倍固体密度。现在正计划把激光器能量提高到 30kJ,分 60 束输出,进行点火实验准备。在间接驱动激光核聚变研究中,美国处于领先地位。这项研究的中心设在劳伦斯 - 利弗莫尔国家实验室(LLNL)。1985 年已建成名为 NOVA 的钕玻璃激光器,其基波波长 1054nm,可转换成二次或三次谐波。通常使用波长为 351nm 的三次谐波,以控制激光与等离子体相互作用产生的不稳定性。NOVA 的输出能量为 40kJ,脉冲宽度 1ns,分 10 束输出,可将靶丸密度压缩到  $3.3 \pm 0.5 \text{g/cm}^3$ ,离子温度达到  $2.2 \pm 0.8 \text{keV}$ ,氘氚中子产生额为  $(8.1 \pm 0.8) \times 10^9$  个。

因此,在激光核聚变研究中,通常使用非线性光学方法将基波转换成二次或三次谐波。为了实现多路激光束精确射向靶丸,就要重点控制变频器件的光束转换和出射光束的质量,变频器件的研究是整个装置中的关键技术之一。虽然人们使用自适应光学等方法来保证光束质量(如 1985 年我国研制的 19 单元激光波前校正系统,被用于“神光 I”激光核聚变装置上,校正这一装置中的制造误差、光学材料的不均匀性以及装调误差等静态误差,使静态焦斑能量集中度提高了 3 倍,成为国际同类装置中首先成功使用的自适应光学系统),但变频过程中基波的位相畸变对于转换效率、打靶光束的光强分布和位相分布都有怎样的影响,这仍然是决定打靶精度的最重要因素,同时也决定了自适应光学系统的设计。另外,一些实际的工程应用对谐波的光束质量的要求很高,也急需对谐波的光强分布和位相分布有定量的了解,因此研究位相畸变光束变频过程这一课题在非线性光学领域有相当重要的实际应用意义。

自从夫琅肯(Franken)等人<sup>[22]</sup>1961 年从实验上观察到了光学二次谐波现象时起,非线性光学频率变换一直是激光领域的研究热点之一,并发展成为光学的一门分支学科,因为它不仅具有重要的学术意义,而且具有重要的应用价值。非线性光学一方面研究的是光辐射在非线性介质中传播时由于和介质的非线性相互作用自身所受的影响;另一方面则研究介质本身在光场作用下所表现出的特性,并由此来推知介质的内部结构及其变化。

在 20 世纪 60 年代,大量的非线性光学效应就从实验上被发现或证实:光学倍频(1961)、光学混频、(和频和差频,1961 年与 1963 年)、光参量放大和振荡(1965)、受激拉曼散射(1962 年)、受激布里渊散射(1964 年)、自聚焦(1964 年)、饱和吸收、光子回波(1964 年)、自感透明(1967 年)、光学章动(1963 年)、双光子吸收(1961 年)以及光学击穿等等。其中比较多的工作集中在二次谐波、受激散射、光参量振荡以及自聚焦等。

在 20 世纪 70 年代,对已发现的现象和效应进入了更为广泛和深入的研究,与此同时继续发现了一批新效应和发展了一些新技术,例如相干反斯托克斯拉曼光谱学、位相复共轭、光学双稳态等等。除大量的工作继续集中在受激散射、自聚焦、高次谐波、光学和频与差频等方面外,还有较多的工作集中在多光子过程、光学击穿、瞬态相干效应以