



国防科学技术大学

全国优秀博士学位论文丛书 [第二辑]

共光路/共模块自适应光学与 位相畸变光束变频过程研究

侯 静 著

国防科技大学出版社

共光路/共模块自适应光学与 位相畸变光束变频过程研究

侯 静 著



国防科技大学出版社

·长沙·

图书在版编目(CIP)数据

共光路/共模块自适应光学与位相畸变光束变频过程研究/侯静著. —长沙:国防科技大学出版社, 2007.7

(国防科学技术大学全国优秀博士学位论文丛书. 第2辑/曾淳主编)

ISBN 978 - 7 - 81099 - 416 - 3

I . 共… II . 侯… III . 自适应性 - 光学 IV . O436

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 072313 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

<http://www.gfkdcbs.com>

责任编辑:耿 筠 责任校对:肖 滨

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:12.25 字数:247 千

2007 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 81099 - 416 - 3

全套定价:150.00 元

国防科学技术大学
全国优秀博士学位论文丛书
第2辑

主 编 曾 淳

副主编 王维平 王雪松 彭再求

序 言

积淀孕育创新，智慧创造价值。

寒窗苦读，拼搏奋斗的积淀凝聚成一本本厚积薄发的论文。博士学位论文是博士生学术水平、科研能力、创造性成果的集中体现，也是学校研究生教育水平、学术水平和创新能力的重要标志。全国博士学位论文水平反映了我国高层次创新型人才培养的质量。作为国家 21 世纪教育振兴行动计划的重要内容，教育部每年评选 100 篇左右的全国优秀博士学位论文。该举措已成为提高研究生培养质量，鼓励创新，促进高层次创造性人才脱颖而出的重要措施。

自 1999 年教育部开展全国优秀博士学位论文评选以来，我校积极参加评选工作，同时参加湖南省和军队优秀博士、硕士学位论文的评选，并以此为契机，在我校研究生中大力倡导科学严谨的学风和勇攀高峰的精神，营造鼓励人才积极创新、支持人才实现创新的浓厚氛围，为学生的禀赋和潜能的充分开发创造一种宽松的环境；采取切实可行的措施，加强学科建设；通过深化研究生学位论文评阅制度改革，完善学位论文抽检制度，实施研究生创新工程，加强研究生导师队伍建设，建立激励机制，鼓励优秀人才脱颖而出等措施不断完善质量保证体系和监督机制，全面提高研究生培养质量。迄今为止，我校已有 7 篇学位论文获全国优秀博士学位论文，另有 7 篇博士学位论文被评为全国优秀博士学位论文提名论文。

睿智颖悟,优秀博士学位论文展现给我们的不仅仅是丰硕的科研成果,更是巨大的精神财富。全国优秀博士学位论文是我国优秀博士学位论文中的杰出代表,全国优秀博士学位论文作者是具有创造能力和竞争能力的高层次创造性人才,是支撑国家掘起的骨干创新力量。认真总结全国优秀博士学位论文的成功经验,对于进一步提高博士生教育的整体水平,培养数量更多、水平更高的高层次创造性人才,具有十分重要的启示作用。在2005年3月汇集出版的我校2004年及之前获得的全国优秀博士学位论文和全国优秀博士学位论文提名的10篇论文基础上,现将我校2005—2006年获得的4篇全国优秀博士学位论文和全国优秀博士学位论文提名论文汇集出版。旨在为广大在学博士生及其导师树立高水平博士学位论文的范本和学习榜样,也期望进一步推动我校研究生教育改革的深入发展,以培养高层次创新性人才为目标,认真总结创新性人才的培养经验和方法,深入探讨博士生教育改革的思路 and 措施。

当今世界,科学技术日新月异,科技创新已经成为社会生产力解放和发展的重要标志。科学技术的迅猛发展,正在引发一场广泛而深刻的军事变革,信息化战争时代已经来临。在新的历史条件下,面对世界新军事变革的严峻挑战,面对推进中国特色军事变革和军事斗争准备的紧迫需求,军队研究生教育的地位和作用比以往任何时候都更加突出。

国防科技大学承担着为国防安全和军队信息化建设、研究开发国防高科技和先进武器装备、培养军队高级工程技术和指挥人才的历史使命,是我军实现新军事变革和军队信息化建设的高层次人才培养和科学研究重要基地。提高人才培养的质量已成为我们现阶段亟需关注的问题之一。我们要在培养大批各类专业和指挥人才的同时,努力为优秀创新人才的脱颖而

出创造条件。尤其要下功夫造就一批真正能站在世界科学技术前沿的学术带头人和尖子人才，以应对世界新军事变革的严峻挑战，为推进中国特色军事变革做出新的更大贡献。

国防科学技术大学研究生院

曾淳

2007年4月于长沙

2005—2006 年国防科技大学 全国优秀博士学位论文及 全国优秀博士学位论文提名论文

2005 年二篇全国优秀博士学位论文:

信息与通信工程学科,成礼智博士的论文《离散与小波变换新型算法及其在图像处理中应用的研究》,导师梁甸农教授;

原子与分子物理学科,陈平彤博士的论文《纠缠的提取和正交量子态的局域区分》,导师李承祖教授。

2005 年一篇全国优秀博士学位论文提名论文:

光学工程学科,侯静博士的论文《共光路/工模块自适应光学与位相畸变光束频过程研究》,导师姜文汉研究员。

2006 年一篇全国优秀博士学位论文提名论文:

信息与通信工程学科,黄知涛博士的论文《循环平稳信号处理及其应用研究》,导师周一宇教授。

分类号 _____
UDC _____

学号 9929011
密级 _____

工学博士学位论文

共光路/共模块自适应光学与 位相畸变光束变频过程研究

博士生姓名: 侯 静
学 科 专 业: 光学工程
研 究 方 向: 自适应光学
指 导 教 师: 姜文汉院士
陆启生教授

国防科学技术大学研究生院
二〇〇二年十月

Common Path/Common Mode Adaptive Optics and Frequency Transfer of Aberrated Beams

Candidate: Hou Jing

Supervisor: Research Fellow Jiang Wenhan

Prof. Lu Qisheng

A Dissertation

Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Doctor of Engineering

in Information and Communication Engineering

Graduate School of National University of Defense Technology

Changsha, Hunan, P. R. China

October, 2002

摘 要

本论文全面系统地对共光路/共模块(Common Path/Common Mode)自适应光学进行了理论和实验研究,主要针对系统关键器件、数据融合处理、全系统闭环实现以及误差分析等进行了深入地分析,成功实现了 CP/CM 系统闭环实验;同时针对惯性约束核聚变(ICF)系统中非线性光学变频过程进行了研究,重点对位相畸变光束倍频过程作了理论数值模拟和实验工作。

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,本文提出了 4 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位相共轭器件,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 4 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作了研究,其中重点对变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小的结论;得到了在走离效应和衍射效应等许多影响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。

关键词: 自适应光学;共光路/共模块;三波相互作用;倍频;角反射器阵列;哈特曼-夏克波前传感器;位相分布;光强分布

ABSTRACT

In this dissertation, the performance of Common Path/Common Mode Adaptive Optics is studied theoretically and experimentally. Key elements, data fusion, close loop working and error analyses are under research. At the same time, the frequency transfer of the aberrated beams, which is very important in the ICF, is discussed. Particularly, numerical and experimental works on the second harmonic of aberrated beams are completed.

Adaptive Optics guarantees the beam quality of laser projecting system. Beam cleanup, atmospheric turbulence compensation and correction of any disturbance and fabrication error in the light way are required to promise a near diffraction beam, but normal Adaptive Optics system can only correction one of them. Common Path/Common Mode Adaptive Optics is the new way to fulfill the correction of them all.

Four kinds of CP/CM derivative systems are presented. Feasibility and how to realize all the function of CP/CM Adaptive Optics are analyzed in detail. Retroreflector array is used as pseudo phase conjugator in the system. The fidelity of the conjugate wave and matching problem of the retroreflector array and Hartmann-Shack wavefront sensor is discussed. Several data fusion methods are presented in order to having two Hartmann-Shack wavefront sensors control one set of wavefront corrector. The misalignment errors of Hartmann-Shack wavefront sensor and arrangement errors of wavefront sensor and deformable mirror are analyzed. At the same time, numerical work based on the data of practically system are done corresponding to the problem respectively and the results are given.

The system of CP/CM AO, which is based on the 37 element AO system, is setup to fulfill all the functions. Through the data fusion of two Hartmann-Shack wavefront sensors, the system runs successfully and realizes the close loop. It lays a good foundation for the application of CP/CM AO.

In the research of ICF, nonlinear optics is used to realize the frequency transfer of second and third harmonic waves. Since multiple laser beams are required to aim at the target, it becomes important to control the frequency transfer and guarantee good beam quality. Adaptive Optics is also used. It is in urgent need to know the effects of the pump wave's aberrations to the

course of frequency transfer. It is not only for the Adaptive Optics system design, but also is important for the whole ICF system. Another aspect of this paper is to give a light to the frequency transfer of the aberrated beams in the Nonlinear Optics. We put the emphasis on the effects of the pump wave's aberrations, such as the change of conversion efficiency, the intensity and phase distribution of both pump and harmonic wave. This problem is also important and valuable in Nonlinear Optics theory study. It will be very helpful to understand how the aberrations affect the course of three-wave mixing.

Small signal solution of aberrated second harmonic generation is deduced from three-dimension three wave coupling functions. The numerical work gives out lot of results of different aberrations. The effects of the fundamental wave's aberrations, which will change the conversion efficiency, distribution of intensity and phase in the frequency conversion, is analyzed. It shows that when walk-off and diffraction effects could be ignored approximately estimation of the phase distribution of second-harmonic wave could be done. The far field divergent angle and second moment radius of harmonic wave will vary with the aberration of fundamental wave, but the far field divergent angle will be obviously smaller than that of fundamental wave. The phase distribution of both fundamental and harmonic wave is measured using Hartmann-Shack wave front sensor in the experiment with 1064nm and 790nm lasers, respectively. Results are given.

Actually, the walk-off, diffraction effects, the roughness of the crystal surface and matching, group velocity are the factors affecting harmonic wave. It is very difficult to realize expanding the working band of Hartmann-Shack wavefront sensor through Frequency Transfer of Nonlinear Optics. Usually three wave-mixing researches are based on plane wave or Gauss wave, so study of aberrated second harmonic generation is new and important. It could be very helpful to understand and make good use of the Frequency Transfer of Nonlinear Optics.

Key words: Adaptive Optics, Common Path/Common Mode, Retroreflector array, Hartmann-Shack wave front sensor, three wave-mixing, second-harmonic, phase distribution, intensity distribution

目 录

摘 要	(i)
-----	-------

第一部分 综 述

第一章 前 言

1.1 自适应光学的发展动态	(4)
1.2 非线性光学——三波相互作用过程的研究动态	(8)
1.3 本论文主要内容	(11)
参考文献	(12)

第二章 自适应光学理论

2.1 自适应光学系统基本组成	(15)
2.1.1 波前传感器	(16)
2.1.2 波前校正器	(17)
2.1.3 波前控制器	(18)
2.2 波前复原算法	(19)
2.2.1 Zernike 模式法	(19)
2.2.2 直接波前斜率法	(21)

2.2.3 特性评价指标	(23)
2.3 控制模型	(25)
参考文献	(26)

第三章 三波相互作用基本原理

3.1 晶体的非线性光学效应	(28)
3.2 位相匹配条件	(30)
3.3 三波耦合方程组	(30)
3.3.1 一维模型	(31)
3.3.2 三维模型	(33)
参考文献	(36)

第二部分 共光路/共模块自适应光学研究

第四章 共光路/共模块自适应光学理论研究

4.1 CP/CM 自适应光学基本原理及衍生光路	(40)
4.1.1 CP/CM 自适应光学基本原理	(40)
4.1.2 CP/CM 衍生光路	(47)
4.2 角反射器阵列作为伪位相共轭器件的保真度分析	(53)
4.2.1 角反射器阵列作为伪位相共轭器件原理	(53)
4.2.2 保真度分析	(54)
4.2.3 设计和制造角反射器阵列应考虑的因素	(57)
4.3 角反射器阵列与哈特曼-夏克波前传感器的匹配	(60)

4.3.1 角反射器阵列与哈特曼-夏克波前传感器的单元数目的匹配	(60)
4.3.2 角反射器阵列单元和哈特曼-夏克传感器的子孔径位置的对应	(63)
4.4 双哈特曼数据融合方法	(64)
4.4.1 双哈特曼数据融合的几种方法	(64)
4.4.2 双哈特曼数据融合特性指标分析	(68)
4.5 哈特曼-夏克波前传感器自身调整误差分析	(70)
4.5.1 理论分析	(71)
4.5.2 调整误差分析	(72)
4.5.3 数值模拟仿真	(75)
4.6 哈特曼-夏克波前传感器与变形镜的对准误差	(77)
4.6.1 常规自适应光学系统	(77)
4.6.2 CP/CM 自适应光学系统	(82)
参考文献	(87)

第五章 共光路/共模块自适应光学系统实验

5.1 实验装置	(90)
5.2 伪位相共轭补偿位相畸变实验	(91)
5.3 位相探测的准确性实验	(93)
5.4 分光镜镜面变形探测实验	(95)
5.5 CP/CM 自适应光学系统分解光路闭环实验	(97)
5.6 CP/CM 自适应光学系统全光路原理性闭环实验	(99)