

天津科技大学研究生学位论文

(申请硕士学位)

高性能集成光波导自动耦合系统的设计与优化

DESIGN AND OPTIMIZATION OF HIGH-PERFORMANCE
INTEGRATED OPTICAL WAVEGUIDE AUTOMATIC
COUPLING SYSTEM

专业学位类别(领域): 电子信息

校内指导教师: 张维佳 副教授

企业指导教师: 蒋 鹏 高级工程师

研究生姓名: 刘 泽

申请学位级别: 全日制电子信息硕士

论文提交日期: 2024 年 4 月

分类号:

学校代码: 10057

密级: (秘密、机密、绝密)

研究生学号: 21807959

高性能集成光波导自动耦合系统的设计与优化
Design and Optimization of High-Performance Integrated
Optical Waveguide Automatic Coupling System

专业学位类别(领域): 电子信息

校内指导教师: 张维佳 副教授

企业指导教师: 蒋 鹏 高级工程师

研究生姓名: 刘 泽

申请学位级别: 全日制电子信息硕士

论文提交日期: 2024 年 4 月

论文课题来源: 合作项目

学位授予单位: 天津科技大学

天津科技大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。除文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包括任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果内容，也不包括为获得天津科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。对本文研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：刘峰

日期： 年 月 日

知识产权和专利权保护声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师具体指导下并得到相关研究经费支持下完成的，其数据和研究成果归属于导师和作者本人，知识产权单位属天津科技大学；所涉及的创造性发明的专利权及使用权完全归天津科技大学所有。本人保证毕业后，以本论文数据和资料发表论文或使用论文工作成果时署名第一单位仍然为天津科技大学。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：刘峰

日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，同意公布论文的全部或部分内容，允许论文被查阅和借阅。本人授权天津科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保 密 ☐ (请在方框内打“√”)，在 年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密 ☐ (请在方框内打“√”)。

作者签名：刘峰

日期： 年 月 日

导师签名：刘峰

日期： 年 月 日

摘要

集成光波导器件具有功能集成度高、体积小、易于批量生产等优点，其在光电子器件方面的研究，对提高我国未来在光电子芯片行业的核心竞争力有着重大意义。在光纤通信网络中融入波导器件，光电子器件就必须与光纤进行精确耦合，关键工作包括两个部分，一方面是光纤与集成光波导的低损耗对接，另一方面是集成光波导器件的高消光比输出。因此设计出高性能集成光波导自动耦合系统，通过优化其寻光结构将可以显著提高光波导器件的耦合精度和耦合效率。本文以设计搭建高性能集成光波导自动耦合系统为核心展开实验研究并对其性能进行优化分析，为高性能集成光波导自动耦合技术的进一步研发和推广提供了经验。

本论文的工作内容包括：

1、高性能集成光波导自动耦合系统的设计。1) 硬件方面主要为自动耦合系统，其中包括光路部分、观察部分、机械部分以及控制部分。2) 光路部分均设计采用带有接触传感器、灵敏度为 $0.1\ \mu\text{m}$ 的 FA 夹具和设计使用新的优质碳素结构钢材料的波导夹具；观察部分采用 BNC 接口、200 万像素的 CCD 摄像机，其变焦镜头倍率为 $0.75 \sim 4.5$ ，工作距离为 $80\ \text{mm}$ ；机械部分采用国产高精度六轴位移台，其中 XZ 轴行程为 $50\ \text{mm}$ 、分辨率为 $0.1\ \mu\text{m}$ ，Y 轴行程为 $20\ \text{mm}$ 、分辨率为 $0.1\ \mu\text{m}$ ， T_{xyz} 轴行程为 $\pm 8^\circ$ 、分辨率为 $0.0045^\circ/\text{脉冲}$ ；控制部分采用六轴、驱动+控制、USB 接口控制器。3) 软件方面以 C#编程语言为基础，结合爬山算法搭建出了适用于外部硬件的耦合系统，通过控制上位机使光纤和光波导完成自动寻光对接耦合。

2、高性能集成光波导自动耦合系统的优化。1) 硬件方面，在机械设计中使用新的优质碳素结构钢材料设计制作的高为 $14.5\ \text{cm}$ 、宽为 $6.2\ \text{cm}$ ，位于最上方的方形夹具部长为 $8.45\ \text{cm}$ 、宽为 $1.21\ \text{cm}$ 的新尺寸 FA 夹具，其机械性能更好且有效克服了材料中非金属夹杂物的影响，在夹持光纤与波导芯片时对物体结构损伤更小，有效提升了耦合对准过程中的准确度。2) 软件方面，在原有爬山算法的基础上引入融合了模式搜索算法，以爬山并行模式搜索新的算法引入自动耦合系统并直接以光学性能指标作为评价函数，通过将加速因子、减速因子和误差条件引入算法测试迭代步数中，使自动耦合系统收敛性和稳定性有效提升。

3、高性能集成光波导自动耦合系统的性能表征。1) 测试采用点胶后带有光纤头的光纤，芯片采用 Y 波导芯片，光纤头分别对接耦合 Y 波导芯片的一个输入端和两个输出端的一侧，利用搭建的自动耦合系统结合上爬山并行模式搜索算法进行插入损耗和分束比的测试。其中最低对接损耗为 $3.30\ \text{dB}$ ，分束比变化量为 1.1% ，均符合集成光波导器件损耗测试标准。2) 集成光波导自动耦合系统的消光比测试。使用单通道消光比测试仪测试，测出对接耦合后的消光比为 $-36\ \text{dB}$ ，优于集成光波导器件光特性标准，同时使得设计出的自动耦合系统耦合效率达到了 98.74% ，系统耦合精度达到了 91.6% 。3) 集成光波导自动耦合系统的稳定性测试。选用两组样品在 $30\ \text{min}$ 、 $1\ \text{h}$ 、 $90\ \text{min}$ 、 $2\ \text{h}$ 四个时间段对耦合系统稳定性进行测试，测试出在规定时间内系统测试最低插损变化范围在 $0.1\ \mu\text{W} - 0.2\ \mu\text{W}$ 以内，最优消光比变化范围在 $1\ \text{dB}$ 以内，参数指标均在标定范围内，系统稳定性良好。

关键词：自动耦合技术；光波导；光功率；爬山算法；模式搜索算法；插入损耗；消光比

ABSTRACT

Integrated optical waveguide devices have advantages such as high functional integration, small size, and easy mass production. Their research in optoelectronic devices is of great significance for improving China's core competitiveness in the optoelectronic chip industry in the future. Integrating waveguide devices into fiber optic communication networks requires precise coupling between optoelectronic devices and optical fibers. The key work includes two parts: low loss docking between optical fibers and integrated optical waveguides, and high extinction ratio output of integrated optical waveguide devices. Therefore, designing a high-precision integrated optical waveguide automatic coupling system can significantly improve the coupling accuracy of optical waveguide devices by optimizing its optical seeking structure. In this paper, the design and construction of high-performance integrated optical waveguide automatic coupling system as the core of experimental research and performance optimization analysis, it provides experience for further research and development of high performance integrated optical waveguide automatic coupling technology.

The work of this paper includes:

1. Design of high performance integrated optical waveguide auto-coupling system. 1) The hardware mainly consists of an automatic coupling system, which includes the optical path part, observation part, mechanical part, and control part. 2) The FA fixture with 0.1 μm sensitivity and the waveguide fixture with new high quality carbon structural steel are used in the optical circuit. The observation part uses a 2-megapixel CCD camera with BNC interface, the zoom lens magnification is 0.75 ~ 4.5, the working distance is 80 mm, and the mechanical part uses a high-precision six-axis displacement table made in China, the range of XZ axis is 50mm, the resolution is 0.1 μm , the range of y axis is 20mm, the resolution is 0.1 μm , the range of T_{xyz} axis is $\pm 8^\circ$, the resolution is 0.0045°/pulse; Control part adopts six-axis, Drive + control, USB interface controller. 3) In terms of software, a coupling system suitable for external hardware has been built based on C# programming language and mountain climbing algorithm. By controlling the upper computer, the optical fiber and waveguide can basically complete automatic optical docking and coupling.

2. Optimization of high performance integrated optical waveguide automatic coupling system. 1) The new size FA fixture with height of 14.5 cm and width of 6.2 cm, the top square fixture with length of 8.45 cm and width of 1.21 cm, is designed and manufactured by using new high quality carbon structural steel materials in mechanical design, it has better mechanical properties and can overcome the influence of non-metallic inclusion in the material effectively, and can reduce the damage to the structure when holding the fiber and the waveguide chip. 2) In terms of software, based on the original hill-climbing algorithm, the mode-searching algorithm is introduced, and the new algorithm of hill-climbing parallel mode-searching is introduced into the auto-coupling system, and the optical performance index is taken as the evaluation function directly, by introducing the acceleration factor, deceleration factor and error condition into the iterative steps, the convergence and stability of the auto-coupling system are improved effectively.

3. Characterization of high-performance integrated optical waveguide auto-coupling system. 1) The test adopts the optical fiber with the optical fiber head after glue dispensing,

the chip adopts the y-waveguide chip, and the optical fiber head is connected with one input end and one side of two output ends of the y-waveguide chip, respectively, the insertion loss and beam splitting ratio were tested by using the built automatic coupling system combined with the hill climbing parallel pattern search algorithm. The minimum docking loss is 3.30 dB, and the change of beam splitting ratio is 1.1%. All of them are in accordance with the loss test standard of integrated optical waveguide devices.2) Extinction ratio measurement of integrated optical waveguide auto-coupling system. Using the single-channel extinction ratio tester, the extinction ratio after docking coupling is -36 dB, which is better than the optical characteristic standard of integrated optical waveguide devices, and the coupling efficiency of the designed automatic coupling system reaches 98.74%, the system coupling accuracy reaches 91.6%.3) Stability test of integrated optical waveguide auto-coupling system. Two groups of samples were selected to test the stability of the coupling system at 30 min, 1 h, 90 min and 2 h, and the results showed that the minimum insertion loss of the coupling system varied from 0.1 μ w to 0.2 μ w in the specified time, the optimal extinction ratio varies within 1 dB, the parameters are all within the calibration range, and the system has good stability.

Key words: Automatic coupling technology, integrated optical waveguide, Optical power, Hill Climbing, pattern search algorithm, insertion loss

目 录

1 绪 论	1
1.1 研究背景	1
1.2 自动耦合系统的国内外现状	2
1.3 本论文的创新点与主要构成	7
2 集成光波导自动耦合理论	9
2.1 集成光波导基本概念	9
2.2 自动耦合系统理论分析	14
2.2.1 自动耦合系统原理	14
2.2.2 自动耦合系统算法	15
2.2.3 自动耦合系统指标	16
2.3 本章小结	19
3 集成光波导自动耦合系统的设计与试制	20
3.1 硬件系统设计	20
3.1.1 光路系统设计	20
3.1.2 观察系统设计	22
3.1.3 机械系统设计	24
3.2 控制系统设计	27
3.2.1 系统软件架构	28
3.2.2 系统通信设计	34
3.3 自动耦合系统算法与实现	36
3.3.1 光耦合自动对准算法	36
3.3.2 爬山并行模式搜索算法	37
3.3.3 自动耦合系统的实现	42
3.4 本章小结	50
4 集成光波导自动耦合系统的测试	51
4.1 光学测试	51
4.2 稳定性测试	59
4.3 本章小结	62
5 总结与展望	63
5.1 工作总结	63
5.2 未来展望	63
6 参考文献	64
7 攻读硕士学位期间发表论文情况	70
8 致谢	71

1 绪 论

1.1 研究背景

“集成光学^[1]”于上世纪 60 年代成为一个新的光学分支开始逐渐发展起来。而形成光路的基本结构就是光波导，光波导（Integrated Optic Waveguides）^[2]是一种在微纳尺度上实现光的传输和处理的技术。它通过在特定材料平台上制备光波导结构，使光能够在很小的空间内传输，通过基本物理量与回路结构之间的相互作用，完成光耦合、滤波、分路、开关、调制、放大和波分复用等基本功能。

随着光通信技术^[3]的快速更新，人们对光电子器件的性能需求也在不断增加。将集成光学器件^[4]的高容量通信、存储、传输、探测和调制等一系列功能集成到一起，实现光学器件的小型化、集成化和模块化，是集成光学发展的一个重要方面，然而要实现器件的高度集成化，就需要高性能的集成光波导耦合技术^[5]。另一方面具有不同功能的器件^[6]的制造在工艺和结构上有很大的差异，使得形成全面集成的光器件发展变得非常困难。因而研究人员开始探索各种波导光学器件，包括硅（SI）^[7-8]、锗硅（GeSi）^[9]、磷化铟（INP）^[10]、等离子体^[11]和铌酸锂（LiNbO₃）^[12-14]等平台上的研究。经过科研人员不懈努力的研究，终于探索出了如电光调制器^[15-20]、滤光器^[21]、光纤耦合调制器^[22]、光导纤维陀螺仪^[23-28]、声光偏转器^[29-30]等具有特定集成功能的集成光学器件。

伴随着光通信移动网络新基础设施的出现，人们逐渐认识到光波导和光纤耦合技术将在光纤通信^[31]中集成光学器件的推广中发挥关键作用，同时高性能自动耦合技术和光波导应用水平在过去 30 年里也取得了实质性的进展，也促使集成光学器件现已广泛应用于光通信系统，如图 1-1。

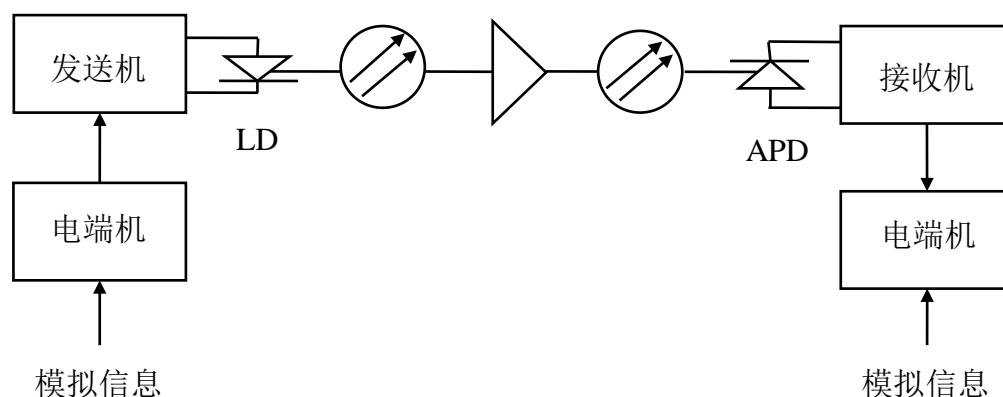


图 1-1 光纤通信系统组成

Fig. 1-1 Principle of Linear Sweep Ranging

进入 21 世纪后随着网络信息吞吐量的猛增，人们对光波导器件的更加小型化的需求越来越大，集成光波导器件由于其体积更小，性能相比更加稳定越来越得到瞩目。

目和青睐，而要实现高集成度就需要更高精度的耦合技术和高性能的耦合系统。所以在光通信的领域，集成光通信系统相比于传统的分立器件系统有着很大的优势方面，明显优势如下：

- (1) 两端通信的可靠性与两端通信的稳定性提升
- (2) 集成功耗更低、集成尺寸单位更小、集成质量更轻
- (3) 集成通信传输带宽更大
- (4) 消耗成本更低

所以集成光学在当今网络时代发展更加迅猛，并且越来越受到大众的重视。

当前集成光波导器件耦合技术几乎 90% 以上都是需要靠手工或者半自动来实现，如图 1-2。例如 FVOA（光衰减器）^[32-34]、AWG（阵列波导光栅）^[35-37]等产品，导器件的光路对准与调试过程复杂繁琐，依赖人工通过高精度显微镜进行操作，耗时且效果不稳定，产品一致性低。特别是集成光路的调试，对操作员的光感与熟练度要求极高。为确保工作质量，新员工通常需要长达 2-3 个月的专业训练才能胜任，这无疑增加了人力成本和时间成本，且影响了生产效率与产品质量。因此，寻求自动化、智能化的调试方法成为行业亟待解决的问题。

随着器件面临需求剧增，不断朝更高集成化、规模化迈进。传统的手工或半自动耦合方式已无法满足光波导器件批量化生产及高精度、小尺寸耦合的需求。因此，必须寻求更先进的生产方式，以适应光器件行业的快速发展，确保高质量、高效率的耦合生产。而解决这一问题并且能带来更高效率、更高精度的性能指标，那就是借助高性能集成光波导自动耦合技术，本文通过对高性能集成光波导耦合系统的设计并引入新的融合算法对自动耦合算法进行了优化，有效降低了耦合技术中的插入损耗，并提高了耦合器件的消光比的值以及耦合效率。

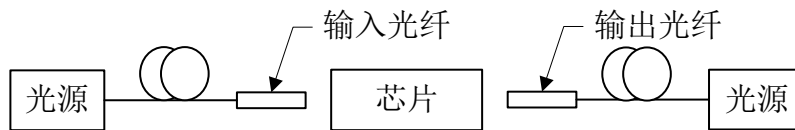


图 1-2 人工对准耦合原理图

Fig. 1-2 Principles of holographic display

1.2 自动耦合系统的国内外现状

由于集成光波导器件对接耦合的复杂程度比较大，所以其发展也是比较缓慢的。现有文献最早的可追溯到上世纪七十年代末，集成光波导器件的耦合概念开始慢慢出现。

1979 年，Saruwateri 等人^[38]提出假设在光场分布为高斯模型的基础上时，可以分析半导体激光器和单模的光纤的对准耦合原理。

1994 年，美国的 Rensselaer Polytechnic Institute^[39]的研究机构旗下的 Adept 公司推出了一种加载两个摄像机的对准耦合工作台，其装备了可以进行光电子封装的微

型装配系统，但是大部分工作人需要操作人员手动来完成。同年，天津大学^[40]报道了耦合对准仪系统，如图 1-3。此系统采用单片机进行控制，进行微小移动的器件由电动伸缩的 PLZT 来驱动，采集系统使用微光功率探测的闭环环节控制。

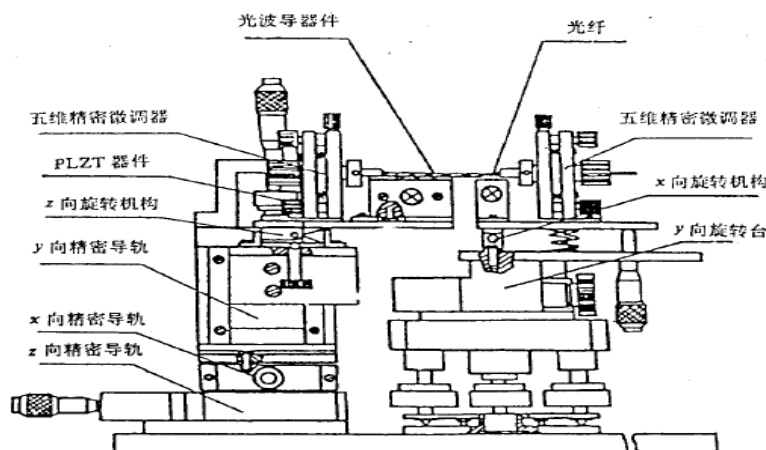


图 1-3 文献[40]中耦合对准仪系统

Fig. 1-3 Coupled alignment instrument system

1998 年，日本的 Moritex 公司^[41]就研制并推出了一台商用的 FZ-78 型半自动耦合系统平台，如图 1-4。这是该系统的结构组成图和实物照片，与 Adept 不同的是它加入了图像处理卡，可以将采集到的耦合信号输入到计算机中，以此来不断微调对准耦合精度。进入 21 世纪以后，国内外一些企业和研究机构也纷纷加入自研对准耦合系统平台的行列中来。

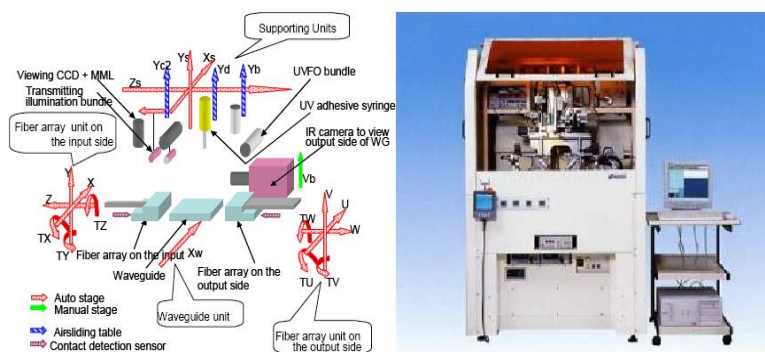


图 1-4 FZ-78 型半自动耦合系统

Fig. 1-4 FZ-78 semi-automatic coupling system

2002 年，美国的 New Port^[42]推出 ANS 自动对准耦合系统平台，如图 1-5。它集成了对准视觉引导系统、微光功率计以及较为精密的定位系统，使得光波导对准耦合系统开始迈向自动化阶段。



图 1-5 ANS 自动对准耦合系统

Fig. 1-5 ANS automatic alignment coupling system

2004 年, 日本骏河精机公司^[43]研制出光纤-光波导-光纤对准耦合模式的自动化耦合系统, 该系统采用了较为先进的光电一体技术, 如图 1-6。它主要有七个系统组成, 第一部分为对准耦合系统: 主要的包括基本的输入输出系统和龙门架及运动控制器、可适合多种波段和光纤的夹具; 第二部分为监视系统: 主要的包括环形照明灯、冷光源和监视器以及高倍率观察显微镜; 第三部分为红外观察系统: 主要的包括进行手动的微型调整架以及 CCD 摄像机等; 第四部分为耦合台控制系统: 主要的包括上位机、硬件通信接口和操作软件等; 第五部分为操作平台和实验仪器摆架: 主要的包括了光学避震台、仪器开放架等; 第六部分为进行耦合的点胶机和用于固化的 UV 灯 (250W); 第七部分为可调式光源和单通道及多通道光功率计。



图 1-6 光纤-光波导-光纤对准耦合模式系统

Fig. 1-6 Fiber optic waveguide fiber alignment coupling mode system

2008 年, 上海理工大学的研究学者^[44], 通过实验研究与对准耦合测试结果, 发表了遗传调芯法^[45-50]、中心积分调芯法以及多目标演化调芯算法^[51], 并在此基础上制作出了可行的样机模型, 如图 1-7。该模型和算法的提出, 标志着自动对准耦合系统在不断向着更为先进的人机交互的算法模式进化。



图 1-7 对准耦合算法样机模型

Fig. 1-7 Prototype model of alignment coupling algorithm

2020 年,我国台湾省机械研究所^[52]开发出来的 MIRWAS-H3 高精度集成光波导对光耦合系统,如图 1-8。它的基本结构由亚微米级微型调整平台系统、多模式红外光探测系统、平台组装监视系统、微型一体点胶机和 UV 曝光灯及固化灯等多系统集成组成,具有比较高度的自动化对接应用功能。

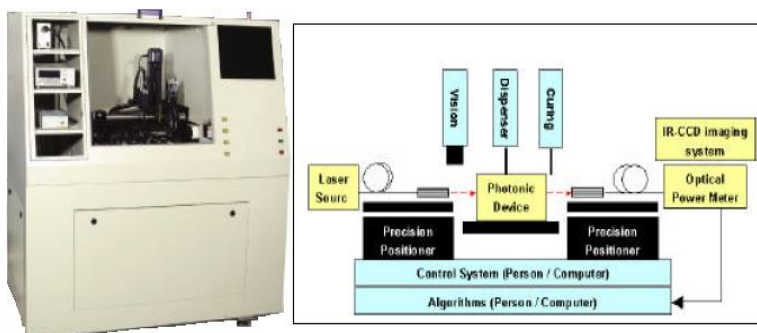


图 1-8 MIRWAS-H3 高精度集成光波导耦合系统

Fig. 1-8 MIRWAS-H3 high-precision integrated optical waveguide coupling system

随着科技的发展,无论如何深层次的提升外部设备和整体形态,都离不开最基础的集成光波导与光纤对准耦合时通过高精度耦合平台的多维运动,在这个过程中需要不断地微调二者的位置,其目的都是使得集成光波导耦合端面与接触的光纤端面实现最高精度的耦合。但是即使是在自动化的高精度耦合下,多维运动微调过程也很容易受到机械本身制造、装配以及在机械控制干扰所带来的各种不确定性误差。

所以,在对准耦合的过程中几乎无法与理想设计的对准耦合轨迹一模一样并且多维运动过程中的复杂程度会相互干扰到极为关键的耦合效率,此所带来的难度也是十分困难的。因此,在集成光波导测试的环节中,人工在高精度集成光波导耦合的平台上进行操作时,其对准难度也是较高的,这就需要实验操作人员根据长期的实验经验和长时间的不断微调才能达到想要的基本耦合效果,这一过程中也需要在极其安静和封闭的操作空间内和稳定性良好的液压式避震台上进行,一旦耦合平台出现漂移,这将为较大的波段范围内光的测量带来不确定的困难。

而集成光波导高性能耦合系统中，自动控制系统与测试系统的相结合可以大大降低人为参与所带来的误差影响，而且越来越多的精密人工操作工作正在逐渐被以计算机为控制中心所代替，人工所用的测试时的测量所需数据也被计算机控制集成到控制中心一体完成测量、传输、数据处理、输出反馈等工作。这种由上位机结合外部机械通过各种数据线完成流程的模式不仅大大节省了人力、物力和时间效益，而且能做到长时间操作大规模测试测量工作，出现可控制的误差范围，这对于极易受到任何因素带来干扰的高精度自动耦合技术尤为关键，正是由于自动耦合控制的高精度、稳定性好和高效性等特点，已经逐渐深入到各个领域，对生产、科研工作和国防安全都发挥着重要作用，自动耦合系统的研究历程如下表 1-1 所示。

表 1-1 自动耦合系统的研究

Table 1-1 Research on automatic coupling system

参考	作者	研究动态	模式	耦合精度	耦合效率
文献[38]	Saruwateri	假设光场为高斯型分布的基础上，分析了半导体激光器与单模光纤的对准耦合	/	/	/
文献[39]	Rensselaer Polytechnic Institute	推出了一种加载两个摄像机的对准耦合工作台	手动	60.1%	43%
文献[41]	Moritex	研制并推出了一台商用的 FZ-78 型半自动耦合设备平台	半自动	/	68%
文献[42]	New Port	推出 ANS 自动对准耦合平台	半自动	68.4%	82%
文献[43]	日本骏河精机	研制出光纤-光波导-光纤对准耦合模式的自动化耦合系统	半自动	74.3%	90%
文献[44]	上海理工大学	尝试引入算法模型，并制作样机	自动型	81.4%	/
文献[52]	台湾机械研究所	MIRWAS-H3 高精度集成光波导对光耦合系统	自动型	86.4%	95.7%

综上，从集成光波导实现自动耦合技术的研究历程中，可以看出光纤与光波导实现最低插入损耗和高耦合效率就必须向着自动化耦合模式发展，这也就在一定程度上可以排除人工操作时所带来的误差影响，这就意味对自动耦合工艺的要求也越来越高。

但是目前大多数商用的光波导自动耦合系统插入损耗较高为 4.63 dB，耦合精度只达到 86.4% 左右，耦合效率上也只达到了 95.7%，并且在稳定性循环测试方面也存在一定的数据差异。而造成上述性能指标无法有效提升的原因主要包括两个方面。一方面，传统的自动耦合系统在机械系统组成上存在着许多机械间干扰因素，尤其是夹具设计方面，其材质的组成和夹持角度等都对光波导的耦合指标造成干扰；另一方面，自动耦合系统的控制算法程序在最大功率值寻优和通光寻优上，无法准确高效的完成多维度寻优从而极易带来耦合数据的重叠和紊乱。

所以本文对自动耦合机械设备中夹具包括 FA 夹具的材质组成进行设计，使用新的优质碳素结构钢材料制作夹具，新材料优势在于机械性能更好且有效克服了材料

中非金属夹杂物的影响，在夹持光纤与波导芯片时对物体结构损伤更小，也有效提升了耦合对准过程中的准确度。同时引入爬山并行模式搜索算法进行高效精准耦合，降低了损耗并提高了耦合效率，使其插入损耗可降至为 3.30 dB 左右、平均耦合效率稳定提升至 98.74%，为高性能集成光波导耦合系统向着低损耗、高耦合效率的发展提供了参考经验。

1.3 本论文的创新点与主要构成

常规的光波导耦合对准模式对相应系统的稳定性、硬件指标、研制经费以及自主技术上都提高了门槛，为此本课题的研究思路旨在通过降低对应系统的要求和硬件指标来实现高性能集成光波导自动耦合系统的设计和对准耦合优化，并在此基础上对光纤通光后对接波导寻光部融入算法模型，使自动耦合系统排除人为干扰因素所带来的误差影响。通过设计使用新的优质碳素结构钢材料搭建的硬件设备和上位机软件系统对整体的自动耦合系统性能进行了测试，并分析了耦合过程中光学指标参数的变化，系统顺利的测试出了器件插入损耗^[53]可达到 3.30 dB，消光比^[54]达到 -36 dB，并且也对电学指标参数也完成了对应测试，器件的半波电压^[55]为 3.9 V，波形斜度^[56]为 1/343。对比现有的集成光波导手动耦合系统以及半自动耦合系统测试参数，各项指标参数均优于非自动耦合系统，并为高性能集成光波导器件性能的优化发展以及波导耦合系统的研发提供了宝贵经验。

本论文的创新点：

(1) 利用基础理论知识，通过对机械设备中夹具包括 FA 夹具的材质设计，在光波导自动耦合系统上，本人创新使用新的优质碳素结构钢材料制作，设计出底座高为 14.5 cm、宽为 6.2 cm，位于最上方的方形夹具部长为 8.45 cm、宽为 1.21 cm 的新尺寸的 FA 夹具，其机械性能更好且有效克服了材料中非金属夹杂物的影响，在夹持光纤与波导芯片时对物体结构损伤更小，并成功搭建了高性能集成光波导自动耦合系统测试平台。

(2) 利用搭建完成的光波导自动耦合系统，对光纤通光后波导寻光部分在爬山算法的基础上融入模式搜索算法模型，加入缩减因子和加速因子参数，确定了自动耦合过程中的基点和功率值增大方向，有效减少了系统数据采集过程中的误判，使系统成功测试出的指标插入损耗降低至为 3.30 dB，消光比为 -36 dB 以及耦合效率达到 98.74%，并进一步克服了单一爬山算法中各自由度之间交叉耦合的影响。

本论文的主要内容有：

第 1 章，绪论部分；主要讲述了高性能集成光波导自动耦合技术的发展、应用前景以及国内外研究现状，对比了近年来各种类型的研发系统以及性能指标，简述了本课题的工作内容。

第 2 章，集成光波导自动耦合理论；主要讲述了集成光波导基本概念；自动耦合理论分析：自动耦合系统原理、自动耦合系统算法和耦合系统指标。

第 3 章，集成光波导自动耦合系统的设计与试制；通过对高性能集成光波导自

动耦合系统的硬件设计使用新的优质碳素结构钢材料的夹具、软件设计以及应用爬山并行模式搜索算法整体的测试，成功完成制作。

第 4 章，集成光波导自动耦合系统的测试；（1）耦合系统的光学性能指标，通过耦合波导的分束比、消光比、插入损耗、耦合精度以及耦合效率来进行反馈；（2）耦合系统的稳定性测试，通过循环运行指标来进行反馈。

第 5 章，总结与展望；综述本论文的主要工作和成果，提出后续研发方向。

2 集成光波导自动耦合理论

2.1 集成光波导基本概念

(1) 光波导器件

光是具有波粒二象性，属于电磁波的一种。光依据全反射定理在波导中进行传输。如图 2-1。集成光学起源于集成电路^[57]，它是由集成电路的概念灌输从而命名。科学家田柄耘^[58]早在很久以前就对集成光学做出了如下解释：首先来讲，光之所以能在光波导中进行传输，是利用的各种各样的光波导器件，而光波导器件则是用光波导制作，将光波导器件和光波导集成到一起，就组成了具有特定性能的集成电路，集成光波导是集成光学的核心单元。

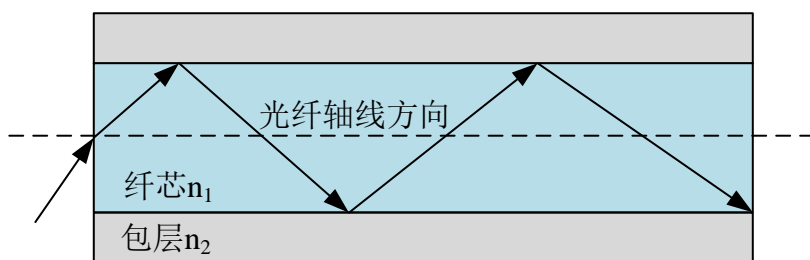


图 2-1 光纤中光线的全反射示意图

Fig. 2-1 Schematic diagram of total reflection of light in optical fibers

光波导（Optical Waveguide）是一种由光透明介质构成的传输光频电磁波^[59]的导行结构，是光互联互通时使用的大部分无源器件的组成部分，比如激光分束器、耦合器等。光波导的传输原理不同于金属封闭波导，在不同折射率的介质分界面上，电磁波的全反射现象^[60]使光波局限在波导及其周围有限区域内传播。介质型光波导是光学通信领域的重要组成部分，它负责引导光波在特定的路径上传播，从而实现信息的有效传输。根据波导的结构设计差异，介质型光波导可以被细致划分为圆柱型波导、平面型波导和条形波导（如沟槽型波导、脊型波导）。其中平面型波导和条形波导一般被用来构成光电集成器件。

光波导器件的构建材料独特，它由三层各具特质的介质精心构成，分别是导波层、覆盖层以及衬底层。每一层都承担着其独特的功能，共同确保了光波导器件的性能稳定与高效。其中介质折射率最大的为处于中间层的导波层。位于上端上包层的为覆盖层其折射率小于导波层，位于下端下包层的为衬底层，其折射率同样小于导波层。如果材质中出现衬底层与覆盖层折射率相同，则此器件波导为对称型光波导，相反，则为非对称型光波导。在光波导的包层中依旧会出现光波的传输，但由于波导本身存在的某些限制性作用，传输中的光束并不会像在自由空间模式中自由发散。如图 2-2。

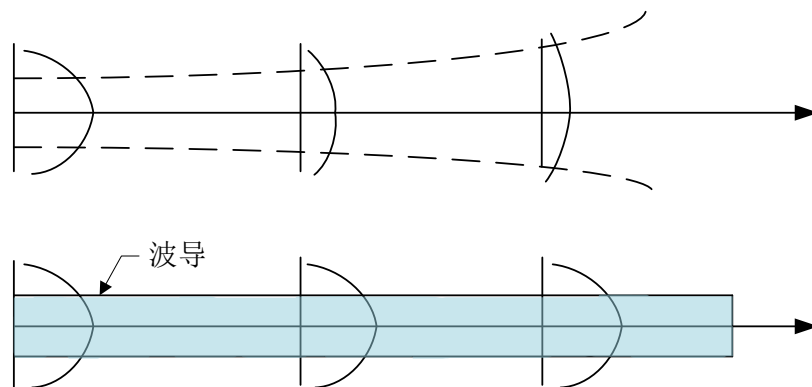


图 2-2 光束在空间波动示意图

Fig. 2-2 Schematic diagram of beam fluctuations in space

光波导器件的最核心组合成分为集成光波导芯片。如图 2-3。这种芯片利用光的全反射原理，将光信号在平面基板上进行传输和处理，实现了光信号的分路、合路、波长转换等功能。集成光波导芯片（Integration Lightwave Circuit，简称 ILC）是一种基于光波导技术的光通信器件，主要通过半导体工艺来完成。在半导体工艺中，常利用材料铌酸锂、二氧化硅、磷化铟和聚合物等制作。常见使用最多的使用铌酸锂材料来进行质子交换，金属扩散等工艺，虽然这种材料工艺带来的电光系数和非线性效应较高，但是各种损耗也是巨大的。具有高集成程度和高折射率的硅材料，能很好的与集成电路兼容，但是用于发光型器件上不适合。而采用旋涂，刻蚀等工艺的聚合物，虽然在制作成本上耗费低，其电光、热光效应相对较高，但是在利用过程中稳定性较差且十分容易产生老化现象。对于集成光波导器件来说，二氧化硅与硅材料应用得比较广泛。

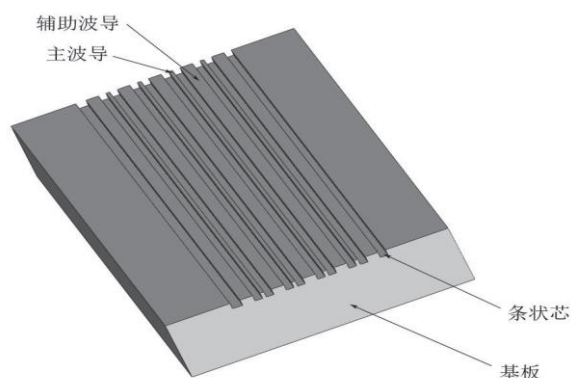


图 2-3 光波导芯片示意图

Fig. 2-3 Schematic diagram of optical waveguide chip

（2）波导模式

光波导也是一种能传输光波能量的介质结构，其中平面波导和条波导是主要的两大类。目前所使用的光通信网络中绝大部分是单模石英波导器件^[61]，其一般是有

着矩形截面的波导芯，如图 2-4。其中 x - y 截面是波导的横截面， z 方向是光波导的长度方向， n_g 和 n_G 分别为波导芯和包层的折射率，满足 $n_g > n_G$ 的关系。

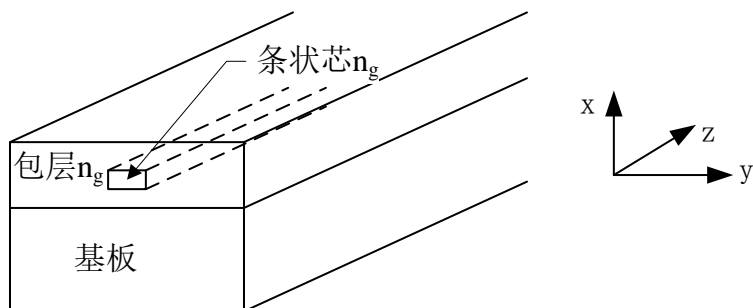


图 2-4 石英波导基本结构

Fig. 2-4 Basic structure of quartz waveguides

由于受到边界条件^[62]的限制，导致波导中的一些光波电磁场具有了某些特定的电磁场分布，而这些限制正是来源于波导芯和包层之间的界面，如图 2-5。这些就称为光波导模式。光波导又分为导模和辐射模两种，其中当光波受到波导芯及其周围的特定磁场分布限制时，则被称为导模；若没有受到来自这两方面的限制，则被称为辐射模。所以在特定的波导芯上导模可以实现长距离传输，而辐射模会因自身带来的辐射损耗而快速衰减。

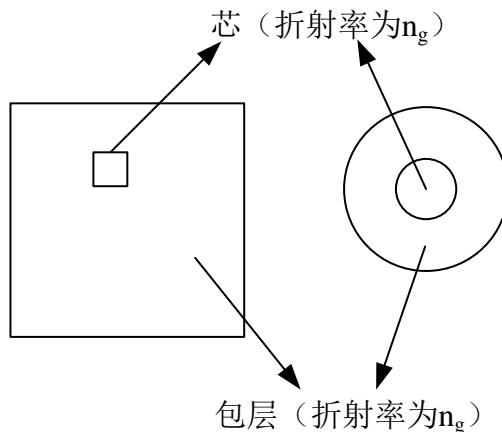


图 2-5 波导芯和包层结构

Fig. 2-5 Waveguide core and cladding structure

模式是电磁理论中至关重要的概念，它代表了波导内部空间中稳定存在的电磁分量。分析波导模式，我们不难发现它其实是对电磁场在波导内特定行为的一种精确描述。这种描述基于电磁学的基本原理，也就是我们熟知的麦克斯韦方程组。以常用的无源、非导体材料的波导为例，麦克斯韦方程^[63]如下形式：

$$\begin{aligned}
\nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\
\nabla \times H &= \frac{\partial D}{\partial t} \\
\nabla \cdot D &= 0 \\
\nabla \cdot B &= 0
\end{aligned}
\tag{2-1}$$

其中， E 、 D 、 B 、 H 分别代表电场强度、电位移矢量、磁场强度、磁感应强度， ∇ 为哈密顿算子^[64]。

由此可以根据波导与光纤的材料特性并结合上述麦克斯韦方程，在以光纤与波导对接耦合边界界面、光纤纤芯与包层边界界面以及波导芯层与包层边界界面的条件下，电磁场分布的边界条件为：

$$\begin{aligned}
n \cdot (D_1 - D_2) &= 0 \\
n \cdot (B_1 - B_2) &= 0 \\
n \times (E_1 - E_2) &= 0 \\
n \times (H_1 - H_2) &= 0
\end{aligned}
\tag{2-2}$$

其中， n 表示每个边界界面所对应的法向分量。

在各向同类型的介质中，电场强度与电位移矢量、磁场强度与磁感应之间有如下定量关系：

$$\begin{aligned}
D &= \varepsilon E \\
B &= \mu H
\end{aligned}
\tag{2-3}$$

其中， ε 、 μ 分别代表介电常数和磁导率。

光波导作为非磁性介质，磁导率 μ 可以与真空中的磁导率 μ_0 近似相同，而且一般情况下，波导的介电常数 ε 会伴随着空间变化也缓慢变动。在此前提下，结合式子 (2-1) 和式子 (2-3)，可得出无源波动方程：

$$\begin{aligned}
\nabla^2 E &= \varepsilon \mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \\
\nabla^2 H &= \varepsilon \mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}
\end{aligned}
\tag{2-4}$$

当上述电场强度 E 、磁场强度 H 均变为时谐函数时，可以将式子 (2-4) 简化为赫姆霍兹方程：

$$\begin{aligned}
\nabla^2 E + k_0^2 n^2 E &= 0 \\
\nabla^2 H + k_0^2 n^2 H &= 0
\end{aligned}
\tag{2-5}$$

其中， ∇^2 为 Laplace^[65]算符， n 为介质的折射率， k_0 为自由空间中的波数。

(3) 波导结构

通常将光波导分为集成光波导和光纤。其中，光纤是一种类似于圆柱形的波导，常见且应用最广的为平面型波导^[66]（又称平板型波导），其是由包层、波导层和

衬底层三层结构组成的一种非常简易的波导。最高的折射率区域在波导层，上下两个低折射率区域的介质层将沿 Y 轴传输的光波限制在高折射率区域，这样就形成了平面型光波导。如图 2-6。

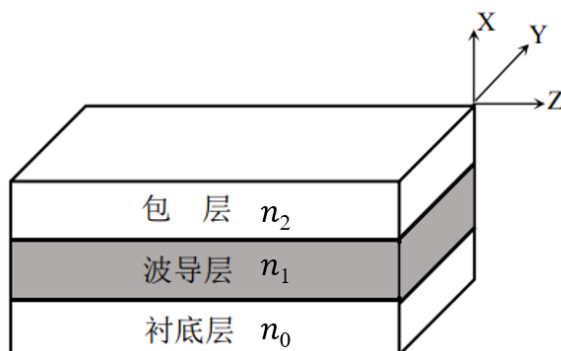


图 2-6 平面型波导结构 ($n_1 > n_0 > n_2$)

Fig. 2-6 Planar waveguide ($n_1 > n_0 > n_2$)

因此对于集成光波导来说，首先要按照形状结构来分，可以将其划分为四种基本结构，分别是平面型波导（又称平面型波导）(a)、嵌入式条形波导 (b)、脊型波导 (c) 和嵌入式条形波导 (d)，如图 2-7 所示，不同颜色代表不同折射率的波导材料。

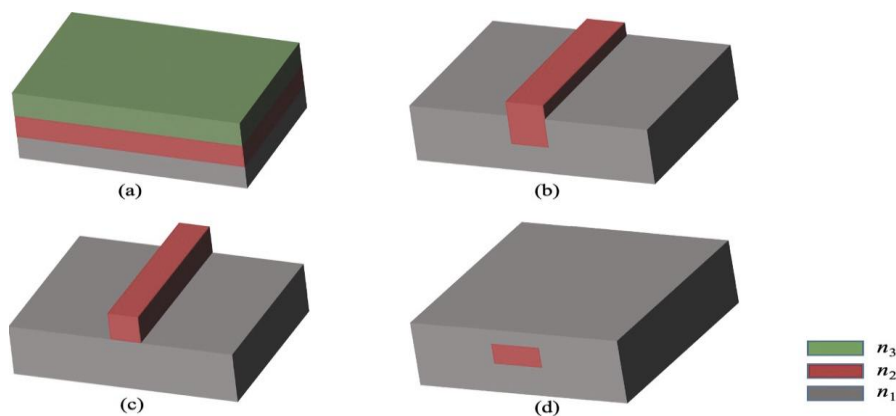


图 2-7 不同结构的波导类型

Fig. 2-7 Waveguide types with different structures

其次，若按照不同波导材质的折射率来划分，可以将其划分为渐变型波导与突变型波导，如图 2-8 所示，其中 (a) 代表的是波导从折射率 n_1 过渡到折射率 n_2 的突变过程，(b) 代表的是波导从折射率 n_1 过渡到折射率 n_2 的渐变过程，图中表示了光波导折射率 n 和波导横向 x 二者的关联，当折射率为 n_1 时所处的值域范围为 $(-a, a)$ ，在此值域之外的部分折射率均为 n_2 。

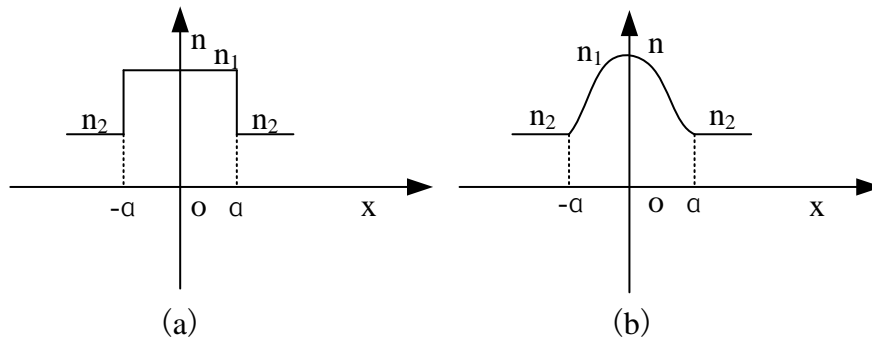


图 2-8 不同折射率的波导类型

Fig. 2-8 Waveguide types with different refractive indices

2.2 自动耦合系统理论分析

2.2.1 自动耦合系统原理

集成光波导与外部通光光场的输入或输出之间的对准耦合是至关重要的一环。为了保证光的传播质量和信号的有效传递，目前，主要存在两种主流的耦合方式：端面耦合和消逝场耦合。其中最为常用的是端面直接耦合、棱镜耦合法和光纤端透镜法。采用端面直接耦合方法时，如图 2-9 所示利用光轴对准方法实现光纤和波导之间的功率传输，不会在波导和光纤之间加入其它光学器件。而消逝场耦合法则需要借助光学器件，如棱镜、光栅等，以及需要满足相应的匹配条件才能进行对准耦合。

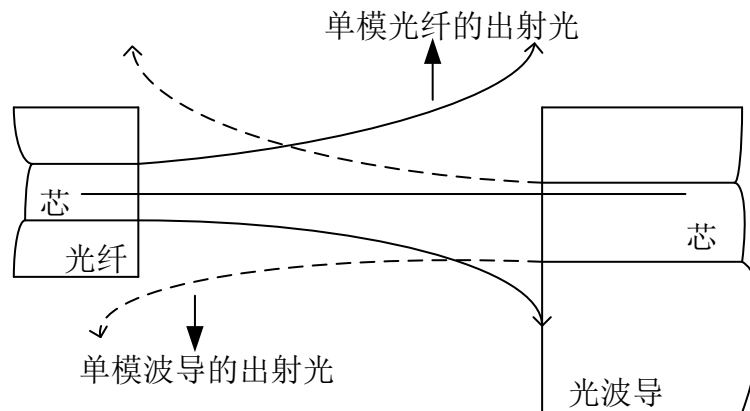


图 2-9 光纤与波导端面耦合示意图

Fig. 2-9 Schematic diagram of coupling between optical fiber and waveguide end face

常用耦合效率^[67]来表示对准耦合的耦合效果，如上图 2-9 中，实线表示光纤的出射光波，虚线表示光波导的出射光波。在实验中，在同一平面上，只有与虚线光束的振幅、相位以及传播方向与虚线光束相反方向的实线出射光束才能有效进入光波导中，即光纤出射光中有多少百分比的光功率进入波导进行了耦合。当耦合效率被称为耦合损耗时用单位分贝 (dB) 表示，所以自动耦合的就是在原理上降低耦合

损耗，来提高耦合效率。

2.2.2 自动耦合系统算法

目前，对于光耦合自动对准算法的研究，许多国内外的研究机构和企业工厂所使用耦合对准算法多为主动对准的方式，也就是通过实时分析在光纤和芯片波导进行耦合时光纤所处的位置和运动轨迹，从而确定最佳的耦合位置。光纤快速位移到最大功率的测试位置，也就可以使系统快速准确的使耦合光路完成通光进行耦合点胶。在实际生产中，为了进一步在减少时间的同时也适当提高采集功率的精度，在操作许多耦合系统时，将通光前的扫描步骤细分为粗对准和精对准，再结合上传统的扫描方式，使得粗对准过程中为系统提供的初始位置范围进一步缩小并为下一步的精对准有效节约时间。

传统的对准算法也就是耦合系统扫描方式，大致可以分为比较类、平均类以及智能算法类等，如表 2-1 所示。经典的有模拟退火（Simulated Annealing, SA）算法^[68]、遗传算法^[69]和爬山算法^[70]等。模拟退火算法的一般过程是首先按照采样原则，在可搜索的间隔范围内随机搜索，随着算法的执行，最终结果和参数将受限于局部最优。然而，这种算法也有不足之处，包括全局搜索能力不足、过分依赖参数变化以及容易受到系统参数影响等；遗传算法的一般过程是，通过多次迭代，根据“适者生存”的原则，得到更符合系统需求的近似解。这种算法的缺点包括在操作中消耗的时间比较多，收敛速度慢，局部搜索能力较低等；而最为基础的爬山法最初是由美国的 Newport 公司提出的，它是一种局部最优化方法，并且是一维搜索技术。它采用了启发式方法，每一步都由启发式信息引导，以确定下一步的方向和距离。其大致扫描过程是，从当前活跃的节点开始，依次比较两个相邻节点的值，如果发现当前节点的值是最高的，则将该节点作为最大值返回，并将其作为“山峰”的顶端。相反，如果当前节点不是最高的，则用更大的相邻节点替换它，继续进行计算，最终目标是逐渐接近峰值。然而这种算法也存在很大的局限性，它不是全局搜索，因此结果很容易被固定在局部极值上。

表 2-1 耦合系统扫描算法

Table 2-1 Coupled system scanning algorithm

类型	算法	定义	缺点
比较类	爬山法	比较光纤对准过程中前后扫描功率值，通过定义前进方向、位移距离以及迭代次数寻找最佳耦合位置	只能进行一维功率值扫描，搜索时间较长、测试稳定性和可靠性较差
	半值法	先搜寻半值区间寻找功率相同的两点再求两点的中心位置即为耦合位置	只适合测量有对称光斑波导，易偏离耦合位置
平均类	质心法	先寻求粗对准过程中最大功率值，再进行区域扫描找寻质心位置	需进行多次功率扫描，计算量较大、耗时长
智能算法类	自适应遗传法	先进行多自由度功率值信息采集处理以及迭代次数，再进行多耦合状态值对比	对输入光纤和输出光纤的耦合结果形成交叉影响，运算复杂程度高
	多目标演化法		

2.2.3 自动耦合系统指标

(1) 最优耦合效率

理论上来说，集成光波导与光纤的最优耦合效率主要是由光波导模场与光纤模场的重叠积分所影响的，主要表现在耦合对准过程中的模场失配、菲尼尔反射^[71]、径向错位、角度错位和轴向分离五个方面，耦合对准示意如图 2-10 所示。

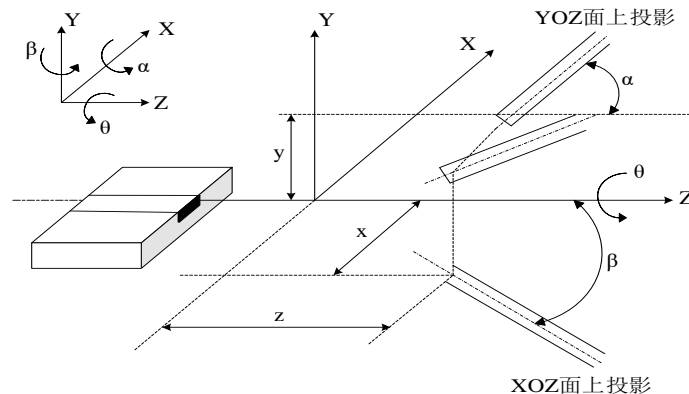


图 2-10 耦合对准示意图

Fig. 2-10 Schematic diagram of coupling alignment

①模场失配对最优耦合效率的影响，表现在波导芯片中光斑尺寸与耦合光纤中

的光斑尺寸大小不一致，表示为：

$$\eta = \frac{4}{\left(\frac{w_x}{w_a} + \frac{w_a}{w_x}\right) + \left(\frac{w_y}{w_a} + \frac{w_a}{w_y}\right)} \quad \text{式(2-6)}$$

其中 η 为耦合效率， w_a 为光纤的模场半宽， w_x 和 w_y 分为光波导的模场分布在 X 方向和 Y 方向上的半宽。

②菲尼尔反射对最优耦合效率的影响，表现在光在光纤和波导之间传输时由于反射引起的折射率、入射角以及传输距离的变化，表示为：

$$\eta = \left[\frac{4n_0n_1}{(n_0 + n_1)^2} \right] \left[\frac{4n_0n_3}{(n_0 + n_3)^2} \right] \quad \text{式(2-7)}$$

其中 η 为耦合效率， n_0 为空气的折射率， n_3 为芯片芯层的折射率。

③径向错位对最优耦合效率的影响，表现在光纤与光波导之间的匹配模场中心不对称，表示为：

$$\eta = \exp\left[-\left(\frac{d}{w}\right)^2\right] \quad \text{式(2-8)}$$

其中 η 为耦合效率， d 为侧向间距， w 为波导模场分布的半宽。

④角度错位对最优耦合效率的影响，表现在光纤光轴与光波导芯片对准耦合时存在角度偏移，表示为：

$$\eta = \exp\left[-\left(\frac{\theta w n \pi^2}{180^0 \lambda}\right)^2\right] \quad \text{式(2-9)}$$

其中 η 为耦合效率， λ 为波长， θ 的单位为度。

⑤轴向分离对最优耦合效率的影响，表现在光纤端面与芯片距离不匹配，表示为：

$$\eta = \frac{4(4S^2 + 1)}{(2 + 4S^2)^2 + 4S^2} \quad \text{式(2-10)}$$

$$S = \frac{\lambda d}{2n\pi s^2}$$

其中 η 为耦合效率， n 为光纤包层折射率。

(2) 最优消光比

消光比是衡量偏振器件性能的重要参数，表示光学器件输入信号与输出信号的光功率比，影响着光信号的传输质量和误判率。消光比指标不达标可能导致对码元的误判等问题，其大小与偏振光的入射状态有关，要求偏振光的偏振态与保偏光纤的快、慢轴方向耦合对准。消光比理论定义为调制信号幅度与未调制信号幅度之比，以分贝（dB）为单位计量，可表示为：

$$ER(dB) = -10 \log_{10} \left(\frac{P_{\max}}{P_{\min}} \right) \quad \text{式(2-11)}$$

其中, P_{\max} 表示调制信号的最大光功率, P_{\min} 表示未进行调制信号的最小光功率。所计算出的消光比绝对值越高, 代表了光学器件能更好地抑制未调制信号, 输出信号与输入信号之间的光功率变化也就更大。在光通信时代中, 高消光比的光调制器可以有效地降低光通信系统的噪声和失真, 提高光信号的传输质量和距离。

(3) 最低插入损耗

光波导的插入损耗一般是指光波通过波导传输过程中所带来的功率衰减, 插入损耗参数是决定光耦合器件优劣的重要指标之一, 插入损耗的参数值越低, 也就代表了光信号在波导传输时功率值损耗越少, 证明耦合器件越良好。这种损耗通常源于以下几个因素, 如图 2-11 所示。

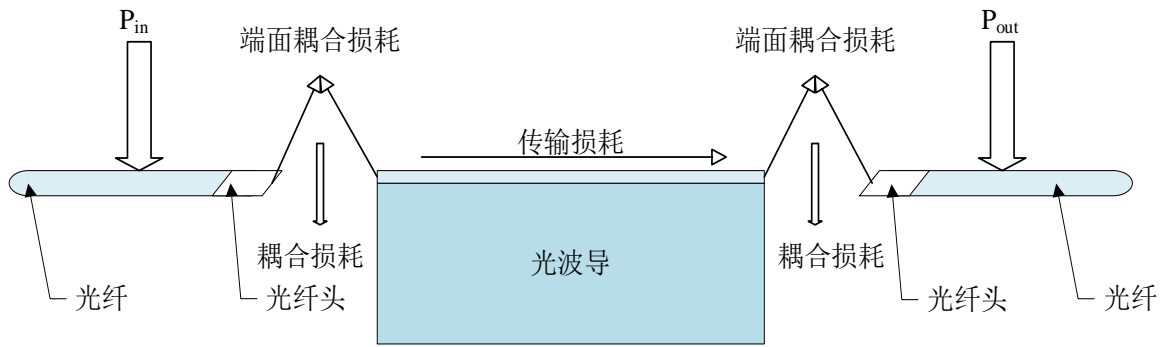


图 2-11 插入损耗来源

Fig. 2-11 Insert loss source

耦合损耗^[72]产生来源于光波导中的光信号在耦合到另一个元件时, 所产生的模场大小不能完全匹配, 从而导致光信号不能完全被接收, 产生一定程度上的损耗。

传输损耗^[73]产生来源于光波导中的光信号在传输过程中其本身发生的散射、吸收和弯曲等现象, 从而导致传输出的光信号衰减, 产生损耗。

端面损耗^[74]产生来源于光信号传输过光波导端面或光纤端面时, 光波在两种不同介质表面入射和出射时产生反射, 从而使光信号被反射丢失未能完成传输, 产生损耗。

插入损耗是衡量自动耦合系统性能的重要参数之一, 同时也决定了光耦合器件的性能优劣。光波导的插入损耗通常表达形式为:

$$\alpha_1 = -\frac{\ln(I/I_0)}{L}$$

$$\alpha_2 = -\frac{10\log(I/I_0)}{L}$$
式(2-12)

其中 I_0 为光波导入射光强, I 为出射光强, L 为波导长度, 单位为 cm, α_1 的单位为 cm^{-1} , α_2 的单位为 dB/cm, 结合上述两式, 可以求 α_1 与 α_2 的关系式:

$$\alpha_2 = \alpha_1 10\log(e)$$
式(2-13)

经过发展和改进，现在常用的插入损耗^[75]计算公式表示为：

$$IL = -10\lg\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) \quad \text{式(2-14)}$$

其中， IL 表示插入损耗， P_{out} 表示输出功率， P_{in} 表示输入功率，以此公式可在测出输入功率 P_{in} 和输出功率 P_{out} 的情况下，准确计算出耦合器件的插入损耗 IL 。

2.3 本章小结

本章的第一部分讲述了集成光波导的基本概念、集成光波导耦合器件基本参数以及波导模式和结构的分类；第二部分对光波导自动耦合系统理论进行了阐述分析，讲述了自动耦合系统的原理、自动耦合系统的算法和自动耦合系统的性能指标参数：模场分布影响的因素、消光比的定义及计量方法和插入损耗产生的来源以及计算公式。

3 集成光波导自动耦合系统的设计与试制

3.1 硬件系统设计

本课题的集成光波导自动耦合系统外部硬件设备的组成，主要的自动耦合部分在本人经过从数据参数查找、各个部件选型、设计新的制作材料，到采购组装调试、测试性能对比而来，如图 3-1 所示硬件系统图，其余外接采集设备由实验室标准生产使用仪器组成。

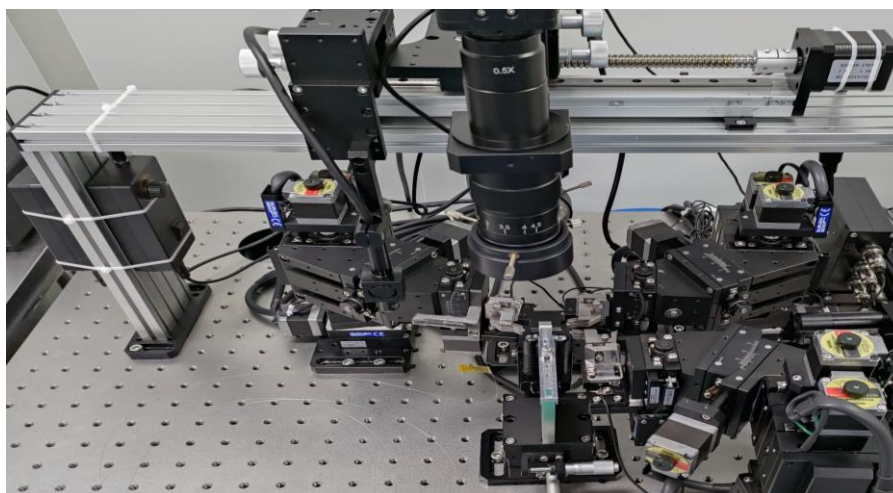


图 3-1 硬件系统图

Fig. 3-1 Hardware system diagram

3.1.1 光路系统设计

集成光波导自动耦合系统的光路系统，其功能是通过光纤-波导进行耦合时进行实时输出光功率的采集，并反馈到上位机控制系统使自动耦合臂进行不断微调，直至寻到最佳耦合位置输出最大功率。在进行光路系统设计中，需从众多的材质中进行选型测试对比，此系统中包括测试用光波导、测试用光纤以及光源和高速光功率计。

(1) 测试用光波导

本课题选用的测试芯片为 Y 型光波导芯片如图 3-2 所示，上方是 Y 波导芯片未通光，下方是测试通入红光。因其结构较为简单，具有一端作为输入、两端作为输出，且大多数波导器件均采用其构造，实验测试结果具有较为普遍的意义，十分适用于波导自动耦合系统设计阶段的光做，也便于进行测试数据的采集验证。



图 3-2 Y 型波导芯片

Fig. 3-2 Y-shaped waveguide chip

(2) 测试用光纤

本实验测试对接波导所用输入输出光纤为 YOFC 公司生产的熊猫型平面保偏裸光纤，此型号的光纤规格分别是工作波长为 1550 nm、包层直径为 80 μm ，工作波长为 1550 nm、包层直径为 125 μm ，工作波长为 1310 nm、包层直径为 80 μm ，和工作波长为 1310 nm、包层直径为 125 μm ，测试所用光纤选用 PM1550-80 型，即工作波长为 1310 nm、包层直径为 80 μm 、165-Y 型。

光纤其余两端对接光源以及功率计的输入输出部分，采用 80 μm 、125 μm 型号的光纤头进行连接，减少输入输出光功率的损耗以及实验对接时便于快速连接。具体测试用光纤其它参数如表 3-1。

表 3-1 测试用 Y 型光波导光纤参数

Table 3-1 Parameters of Y-shaped optical waveguide fibers for testing

项目参数	性能参数	单位
工作波长	1310	nm
截止波长	1290-1520	nm
模场直径	6.5 \pm 1	μm
衰减	≤ 1.0	dB/km
包层直径	80 \pm 1	μm
涂覆层直径	165 \pm 7	μm
筛选张力	100	kpsi

在进行测试用光纤选择时，主要遵循以下几个原则：

①测试使用的光纤一端通光前，需对光纤端面进行研磨抛光处理，用以降低反射带来的损耗，提高耦合效率；

②测试使用的光纤另一端输出在连接仪器时，需要与光纤夹具进行对接，分别对应型号 80 μm 、125 μm ，根据测试用光纤规格相对应，减少由于通光过程中光的反射和散射带来输出功率的损耗，提高耦合效率；

③为防止测试用光纤通光耦合时，相对应的光波导尺寸过大，影响视野遮挡观察芯片波导，因此需要使用剥纤钳剥去通光耦合一端涂覆层一定的长度，测试用光纤如图 3-3 所示。进行剥纤的目的是在显微镜下进行观察光纤端面的中心位置，便于通光效率的提升，有利于耦合效率的提高。



图 3-3 测试用光纤

Fig. 3-3 Testing optical fibers

(3) 测试用光源及功率计

因为光波导自动耦合系统在光纤与波导对准耦合过程中，需要不断对高速输出的光功率进行采集并读取到控制系统中，从而使控制系统对光源的状态做出反馈调整。本实验系统中使用的光源和功率计是 Golight 公司的 SLD 多功能四通道宽带光源测试系统的产品，如图 3-4 所示。在实验测试环境为 25°C、相对湿度变化范围为 5% 时，此系列光源光谱宽度可达 80 nm，中心波长范围为 650 nm – 1700 nm，主要为常用的 850 nm、1310 nm、1550 nm，输出光功率达到 1 – 40 mW。并且数据传输功能支持 GPIB、USB 和以太网三种接口类型，其中以太网的传输速度最快，USB 连接传输速度虽然没有以太网的高速，但其稳定且不会因网络的波动产生数据紊乱，所以本实验局部数据采集连接采用 USB 进行光功率采集与上位机连接。

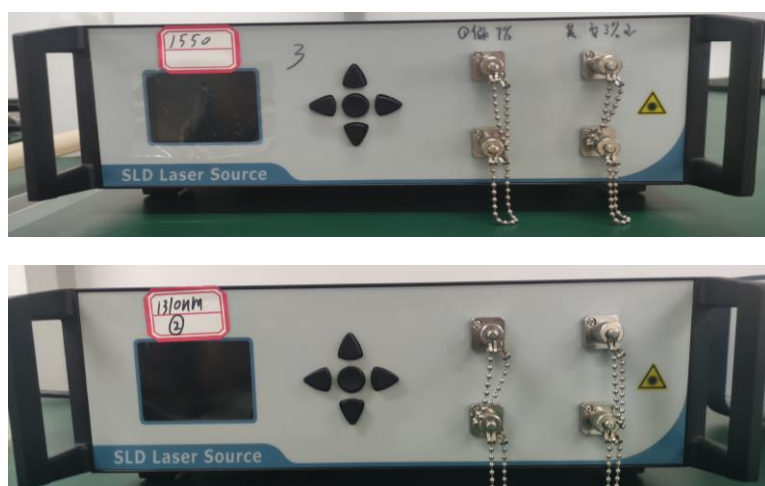


图 3-4 测试用 SLD 光源

Fig. 3-4 SLD light source for testing

3.1.2 观察系统设计

因为光纤在使用光纤钳剥去涂覆层以后只有几十微米头发丝的粗细，在正常情况下是需要借助显微镜才能进行观察，而芯片上的波导比光纤的尺寸还要细小，因此在光波导与光纤对准耦合过程中，自动耦合系统需要在 CCD 的采集下减小通光时的损耗，寻求到最大耦合效率，这也就是观察系统的功能。

(1) 观察系统构成

本实验的观察系统由 CCD、显微镜、4 路成像分割器、监视器以及计算机组成，其中 CCD 摄像机采用 BNC 接头传输，像素为 200 万，定焦镜头及调节机构运用三维调节，变焦镜头倍率为 0.75 - 4.5，工作距离为 80 mm。观察系统结构示意图如图 3-5 所示。通过 4 路成像分割器可以在计算机上观察波导与光纤对准耦合过程中的相对位置，成像是由 CCD 与显微镜连接，将光学信号转化为模拟电信号，经过 BNC 接头以及同轴电缆将采集信号直接读入成像分割器上，并在显示器上观察。

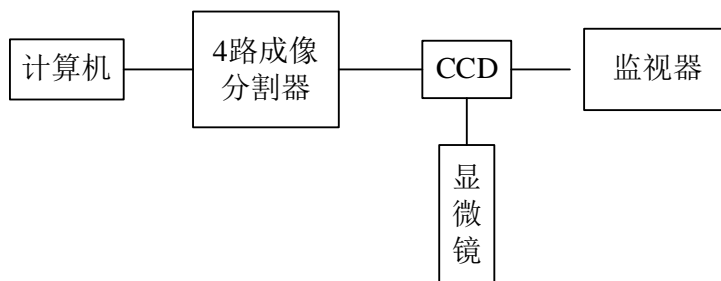


图 3-5 观察系统结构示意图

Fig. 3-5 Observing the schematic diagram of the system structure

(2) 测试聚焦俯视图观察

由于本实验观察系统采用的是双显微镜系统，其一般是由两个观察视场相互垂直的显微镜组成，分别观察对准耦合过程中芯片的侧视图和俯视图的情形。在使用自动耦合系统进行光纤和波导耦合开始时，需要光纤不断慢慢接近波导芯片，这个过程中就需要先通过俯视图来观察两者接近距离，聚焦过程俯视图如图 3-6 所示。在聚焦过程中，会出现芯片表面对光纤的镜面反射产生了光纤的“重影”^[76]，导致显微镜调节倍数过大，观察视野出现分区从而影响到对光纤端面中心位置的判断，因此要不断微调聚焦倍数，以防止自动耦合系统对扫描起点的误判。

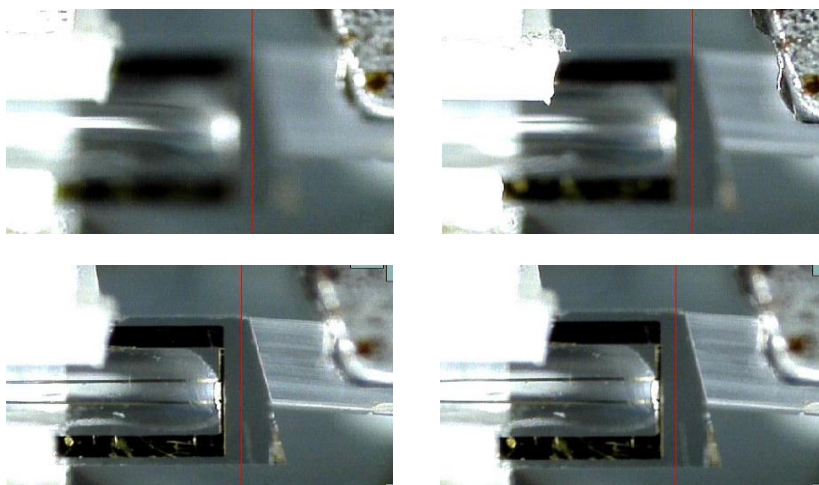


图 3-6 CCD 聚焦过程俯视图

Fig. 3-6 Top view of CCD focusing process

(3) 测试聚焦侧视观察

在微调聚焦过程中，当光纤在上述俯视图中可以较为清晰的观察到无限接近芯片边缘附近，但是侧视显微镜大多数情况下不能达到观察清晰的光纤与芯片的对接图，聚焦过程侧视图如图 3-7 所示，这是由于显微镜的放大倍数过高而且景深较小造成的。因此，一般都会在俯视和侧视聚焦镜头的外环配有 BL-60 白色无影环形灯，在微调过程中通过不断调节旋钮控制亮度，从而保证观察视野中芯片波导的清晰可观。

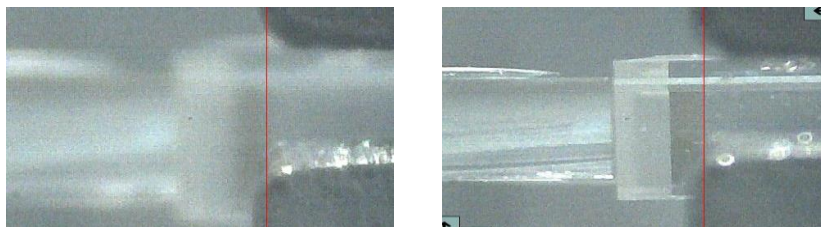


图 3-7 CCD 聚焦过程侧视图

Fig. 3-7 Side view of CCD focusing process

3.1.3 机械系统设计

在光波导自动对接耦合过程中，光纤或光纤阵列之精密驱动十分关键，其精度的要求常常需达到亚微米级别，因此，一套精准而细致的机械调整系统便显得尤为重要，这一系统不仅要求具有极高的稳定性和精准度，还需具备灵活性和可靠性，以确保光纤或光纤阵列的精确操控与定位。其整体是由使用新的优质碳素结构钢材料制作的高精度自动六维调整台、优质碳素结构钢材料的波导芯片固定台和光学气垫式隔震平台等部分主要设备组成，如图 3-8 所示自动耦合调整平台三维模型图。

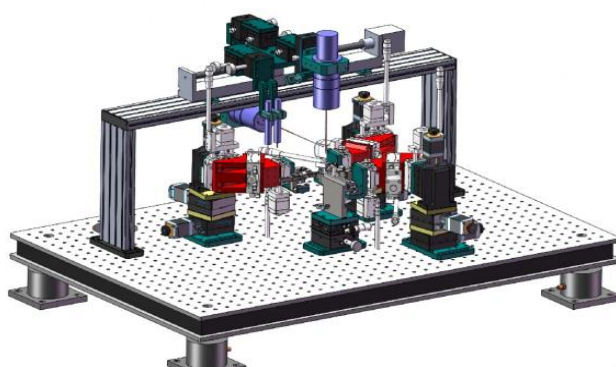


图 3-8 自耦耦合调整平台三维模型图

Fig. 3-8 Three-dimensional model diagram of self-coupling adjusting platform

(1) 高精度自动六维调整台

本实验使用的高精度自动六维台中对应的六轴是通过设计定制的连接块装配成一个六维微调架^[77]，其中一个六维自动臂的装配关系图如图 3-9 所示。该调整台每一个轴都配有六个高精度步进电机以及相关的机械结构组成。采用的是 E11-6000L 左调整台和 E11-6000R 右调整台系列，调整台自重均为 6.2 kg。

E11-6000L 系列型调整台参数中, X 轴为 E11-6020 直线精密调整单元, 全程 20 mm, 满步长行程为 5 微米/每步, 最小细分为 0.1 微米/每步。Y 轴为 E11-6020 直线精密调整单元, 全程 20 mm, 满步长行程为 5 微米/每步, 最小细分为 0.1 微米/每步。Z 轴为 E11-6050 直线精密调整单元, 全程 50 mm, 满步长行程为 5 微米/每步, 最小细分为 0.1 微米/每步。弧摆台 θ_x 轴为 EG60-75 旋转精密调整单元, 全程 $\pm 8^\circ$, 满步长行程为 0.0035° /脉冲(整步), 重复精度为 0.005° 。弧摆台 θ_y 轴为 EG60-100 旋转精密调整单元, 全程 $\pm 6^\circ$, 满步长行程为 0.0028° /脉冲(整步), 重复精度为 0.005° 。弧摆台 θ_z 轴为 EG60-125 旋转精密调整单元, 全程 $\pm 5^\circ$, 满步长行程为 0.0023° /脉冲(整步), 重复精度为 0.005° 。

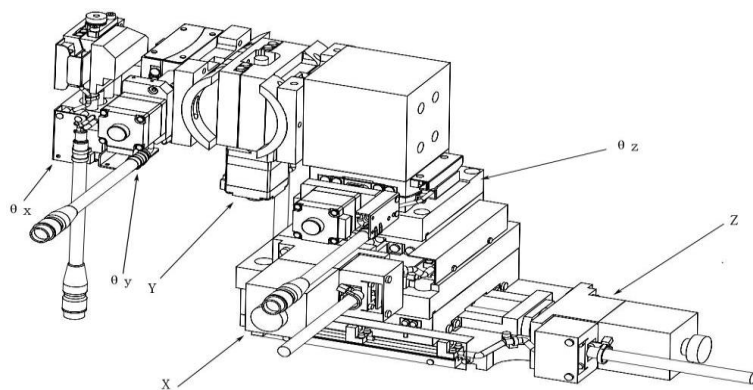


图 3-9 六维自动臂装配示意图

Fig. 3-9 Schematic of Six-dimensional space's automatic arm assembly

在装配示意图中, 我们可以看到各个组件的精确位置。其中, 处于最低位置的是 Z 轴自动滑台, 它是整个系统的基础, 确保整个系统能够在垂直方向上稳定而准确地滑动。而在 Z 轴自动滑台的轴向前后运动过程中, 控制器件不仅负责驱动 Z 轴自动滑台的移动, 还通过精密的调控确保运动的平稳性和精确性。在固体 Z 轴的正上方, 可以看到 θ_z 旋转滑台单元的存在, 其能够控制器件在 Z 轴向上进行转动, 从而实现了更为复杂的运动模式。Y 轴自动滑块不仅具有坚固的结构, 还具备高度的可调性, 能够根据实际需要调整位置, 确保控制器件在运动中始终保持稳定。根据光纤出纤的 8° 角需要, 需要一个切削成 8° 角的连接块放置在 Y 轴与连接的 θ_y 之间, 以此来补偿角度。由于系统组成之间不可抗拒的机械间干扰以及器件对于回损抑制的要求, 不同类型的光纤所设计的出纤角度不同。

(2) 波导芯片固定台

设计使用新的优质碳素结构钢材料设计制作的波导芯片固定台也称为 FA 夹具, 其底座高为 14.5 cm、宽为 6.2 cm, 位于最上方的方形夹具部长为 8.45 cm、宽为 1.21 cm, 如图 3-10 所示。使用新的优质碳素结构钢材料制作的 FA 夹具相比于传统使用单一不锈钢制作的夹具, 优势在于机械性能更好且有效克服了材料中非金属夹杂物的影响, 在夹持光纤与波导芯片时对物体结构损伤更小, 节约了损耗成本, 也有效提升了耦合对准过程中的准确度。

新材料设计制作的 FA 夹具的底座固定在隔震平台上，通过底座上的滑轨可进行纵向小范围调整对接间距，将被测芯片水平放置于夹具之上并通过 FA 锁紧旋钮固定防止对接耦合过程中出现松动，其上方的挡块用于限制 FA 后端位置，可以通过调节螺钉来调整挡块的位置，从而限制 FA 夹具的最大伸出长度。通常情况下，FA 夹具的后端安装有一个接近传感器和一个锁紧气缸，接近传感器用于调节 θ_x 和 θ_y 的平行移动，而锁紧气缸则用于固定 FA 在 z 轴方向上的位置和距离。

在 FA 夹具的右侧下方，安置了一个精巧的多模准直器，其功能在于在左端 FA 进行粗对准的关键环节时，协助右端的 FA 以更加迅捷的态势寻得所需的光源，进而实现左端 FA 的粗找光操作。通常，此多模准直器的配置位置会紧临 FA 的所在之处，此种布局设计旨在最大限度地缩减右端 FA 从起始点移动到与多模准直器对齐的位点，再复归起始点的整个过程中所消耗的时间，以确保整体操作的高效与精确。

在自动耦合调整平台的最上方的龙门架上装配有一台直线步进电机，其作用是便于实时控制控制图像采集装置以及耦合完成后胶水的紫外固化装置，在自动对准耦合过程中，随着左边 FA、芯片与右边 FA 之间的耦合逐渐展开，图像采集装置亦随之进行运动。当这一耦合过程完成，直线电机引领紫外固化装置稳步移至刚完成耦合的精确位置，胶水准确地点滴而下，随后紫外灯开启固化模式。

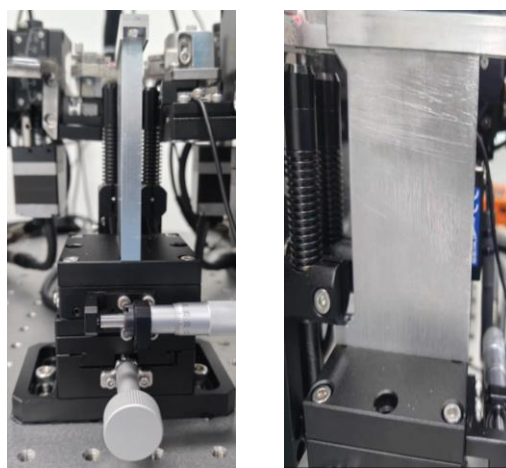


图 3-10 波导芯片固定台

Fig. 3-10 Waveguide chip holder

(3) 光学气垫式隔震平台

光学气垫式隔震平台主要用于在进行耦合对接过程中减少由于外部震动带来的误差影响，时刻使耦合对接的芯片与光纤处于同一个水平面上，本实验所使用的隔震平台采用上海华赋公司生产的 GSZ-5 光学高精度气垫式隔震平台，如图 3-11 所示。其主要参数指标包括载荷能力为 600 - 800 KG；充气能力为最大 0.8 Mpa；固有频率中水平方向为不超过 0.8 Hz、垂直方向为不超过 0.6 Hz；台面平面度为 0.05 mm/m²；最大扰动系数为 1.5*10⁻³ - 3.5*10⁻³；台面孔距为 28 mm；最大相对位移为 0.10 nm - 0.25 nm。



图 3-11 光学气垫式隔震平台

Fig. 3-11 Optical air cushion isolation platform

3.2 控制系统设计

根据搭建的硬件构架，编制了相应的软件系统实现整体的测试功能。本实验自动耦合系统的软件主要由控制固件与算法及人机界面组成，系统软件控制构架如图 3-12 所示，其工作原理为：1) 机器操作员发出的命令信息通过操作接口，通常包括一个直观的显示屏和一个用于输入的键盘。通过接口，操作员可以轻松地向机器传达操作意图，随即被传递给机器控制软件；2) 机器控制软件将命令信息转化为运动参数，基于此参数，软件会调用 DLL 库中的运动控制函数，其专门用于控制机器的各种运动模式；3) 当运动控制函数被调用时，它会进一步与雷赛运动控制卡驱动程序进行交互；4) 运动控制卡再根据控制指令发出相应的驱动信号（如脉冲、方向信号）给驱动器及电机、读取编码器数据、读写通用输入输出口。

其中对自动臂控制的运动算法和控制固件由下位机执行，也就是 DMC2C80 运动控制卡，人机操作界面由上位机执行，当程序涉及到较为复杂的运动控制算法和浮点运算时，上位机可协助执行部分运动控制算法。

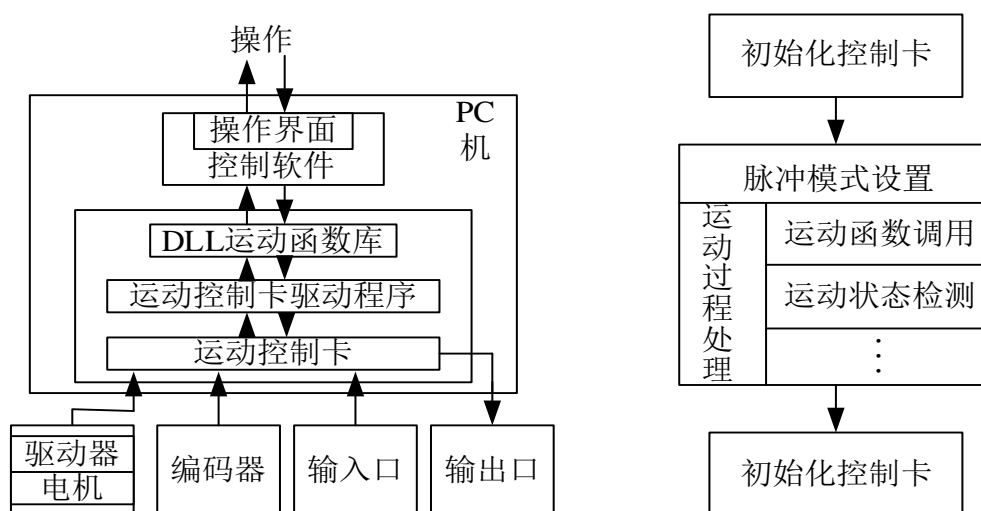


图 3-12 系统软件控制构架

Fig. 3-12 System software control architecture

3.2.1 系统软件架构

软件设计方面主要由上位机开发完成，运行测试界面选用 C#作为编程语言，自动臂轴向运动控制选用 VB 6.0 作为主要的编程语言，用其强大的编程能力，结合提供的运动函数库，以及众多实用的控件，进行编程。这个运动函数库包含了大量预先设计好的运动算法和模型，可以更加便捷地实现各种复杂的运动控制。在编写的过程中，根据具体的硬件电路设计，巧妙地调用了内在控件以及运动函数，编写了能够精准控制硬件工作的程序代码，将程序划分为不同的功能区域，并进行了模块化和区域化的处理。整体架构如图 3-13 所示。采用结构化进行编程，在保证各个模块之间由对应控件和参数进行连接和传递的同时，又保证了实现程序模块化的功能，使整体测试程序完整运行。

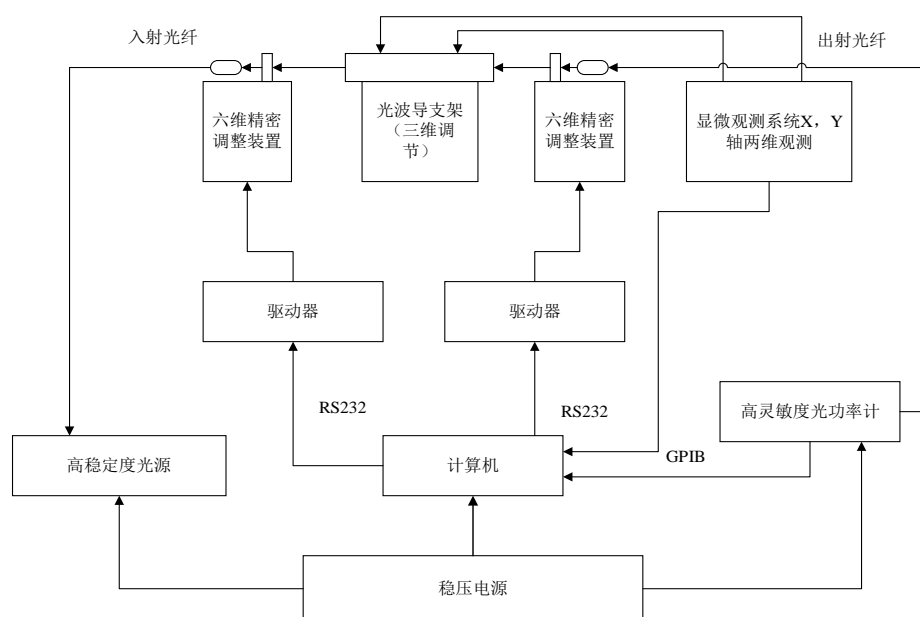


图 3-13 系统整体架构

Fig. 3-13 The overall architecture of the system

1、参数设置操作

通过控件调用和程序代码完成的上位机软件界面，如图 3-14 所示。软件界面基本定义模式主要由简单运动模式、自定义位置模式、编辑流程模式、参数配置模式、找零方式模式以及控制器配置模式六部分形成，测试模块主要由运动控制模块、参数配置模块和设备连接显示模块组成，测试时通过三个部分的模块预先设定，系统按照指令可执行相应测试功能。



图 3-14 程序主界面运行图

Fig. 3-14 Program main interface diagram

(1) 脉冲参数设置：

脉冲参数设置包括：脉冲输出类型设置、脉冲有效电平的设置和方向控制逻辑电平设置，如图 3-15 所示。

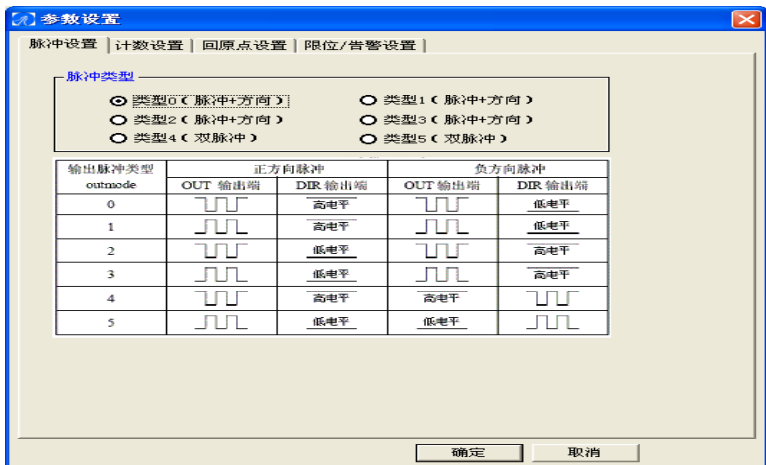


图 3-15 脉冲设置子界面

Fig. 3-15 Pulse setup sub-interface

指令脉冲类型：也就是脉冲输出类型，可以设置为正脉冲/负脉冲模式（CW/CCW 模式）或脉冲/方向模式（pulse/dir 模式）；该参数由使用的驱动器能够接收的脉冲类型来决定。

脉冲输出有效电平：选择下降沿有效时，脉冲停止时的状态为高电平；选择上升沿有效时，脉冲停止时状态为低电平。

方向控制逻辑电平：可以设置某一电平状态对应为电机的正转方向或反转方向。该参数可以使不改变硬件接线的情况下，就可以改变电机的运动方向。

(2) 回原点参数设置：

回原点参数设置包括：原点信号有效电平、回原点速度方式和回原点运行方式，如图 3-16 所示。

原点信号有效电平：设置其有效电平根据传感器的实际电路所设置。

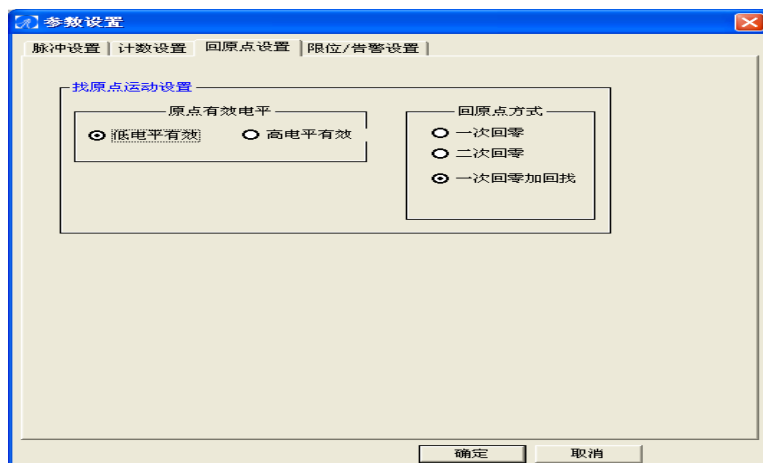


图 3-16 回原点设置子界面

Fig. 3-16 Set the sub-interface back to the origin

在进行精确的运动控制之前，需要设定运动坐标系的原点。原点信号的有效逻辑电平由 `d2c80_config_HOME_PIN_logic` 函数设置，回原点模式由 `d2c80_config_home_mode` 函数指定，回原点的动作由 `d2c80_home_move` 函数控制，到达原点后指令脉冲计数器自动清零。

①设置原点信号函数：

`void d2c80_config_HOME_PIN_logic(WORD axis,WORD org_logic,WORD filter)`

功能：设置原点信号的电平和滤波器使能。滤波器为硬件低通滤波器，当输入信号脉宽小于 $4\mu\text{s}$ 时，信号将被忽略。

参数：axis：轴号

org_logic：原点信号的有效电平

0—低电平有效

1—高电平有效

filter：保留

返回值：错误代码

②设定回原点模式函数：

`void d2c80_config_home_mode(WORD axis,WORD home_dir, double vel, WORD mode, WORD EZ_count)`

功能：根据不同的回原点模式，实现精确定位到原点的方案，通过调用此函数便可以选择其中一种模式（在回零模式中，遇到信号反转则停止）。

参数：axis：轴号

home_dir：回零方向，1—正向 2—负向

vel: 回零速度
mode: 回原点的信号模式
0— 一次回零
1— 二次回零
2— 一次回零加回找
10— 以 EZ 作为原点进行一次回零
11— 以 EZ 作为原点进行一次回零，碰到限位后自动反找

EZ_count: EZ 次数

返回值: 错误代码

③回原点函数:

void d2c80_home_move(WORD axis)

功能: 按指定的方向和速度方式执行回原点运动。

参数: axis: 轴号

返回值: 错误代码

④常用回零方式:

方式一: 一次回零

该方式以高速回原点，适用于那些行程较短并且对安全性要求极高的测试环境。动作过程为：首先，电机会从其初始位置开始启动，以预定的速度和轨迹向原点方向进行移动，在此过程中，电机需要保持稳定的运行状态，并且需要随时准备响应可能的指令变化或者外部干扰。然后，当电机接近原点开关位置时，控制系统会开始密切关注电机的运行状态以及位置信息。一旦电机到达原点开关位置，原点信号会被立即触发，信号被触发后，控制系统会迅速做出反应，发出停止指令，确保不会因过冲或者惯性而偏离原点位置。将停止位置设为原点位置，如图 3-17 所示。



图 3-17 回原点方式一

Fig. 3-17 Return to origin mode 1

运动方式: 一次回零

```
d2c80_config_HOME_PIN_logic(0,0,0);
```

//设置 0 号轴的原点信号低电平有效

```
d2c80_config_home_mode(0,2,2000,1,0);
```

//设置 0 号轴模式为一次回零，负方向回原点


```
d2c80_home_move(0);  
while (d2c80_check_done(0) == 0)  
//等待回原点动作完成
```

方式二：一次回零加回找

若将上面一次回零的程序 d2c80_config_home_mode(0,2,2000,1,0) 改为 d2c80_config_home_mode(0,2,2000,3,0)，则回原点过程如图 3-18 所示。以 EZ 作为原点进行一次回零执行回零运动之前需要清除 EZ 状态，当 EZ 信号到来时，回零减速停止；以 EZ 作为原点进行再一次回零，碰到限位后自动反找回零方式，在其基础上增加了碰到限位后的一次反向回零的过程。

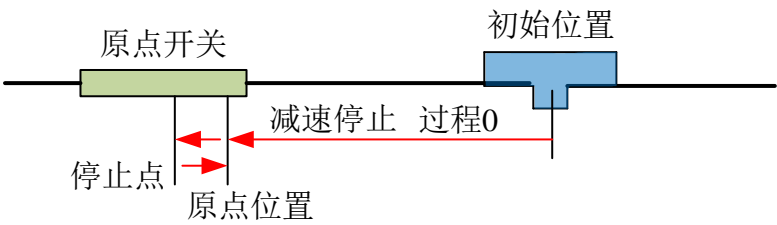


图 3-18 回原点方式二

Fig. 3-18 Return to origin mode two

方式三：两次回零

该方式为方式一和方式二的组合。先进行方式二的回零加反找，完成后再进行方式一的一次回零。

2、运动测试操作

运动测试菜单中包括有两个选择项：单轴运动和插补运动。

(1) 单轴运动

单轴运动可以用于控制单轴运动控制函数调用与执行，使用十分便捷，测试界面如图 3-19 所示。

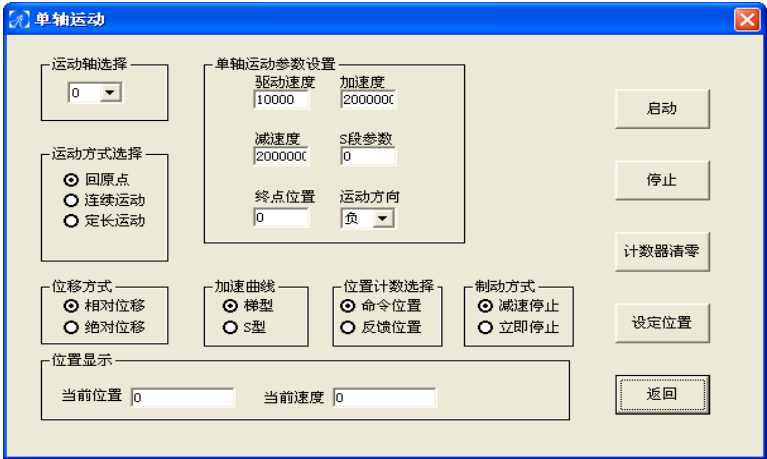


图 3-19 单轴运动测试界面

Fig. 3-19 Uniaxial motion test interface

运动轴选择：选择要测试的轴号。

运动方式选择：运动模式分为三种，它们依次为回原点运动、连续运动与定长运动。回原点运动，其核心在于某一特定轴会根据预先设定的回零参数，准确无误地执行其返回起点的动作；而另外两种运动模式——连续运动和定长运动，它们均聚焦于单轴的运动形式，呈现出独特的运行特点。连续运动注重轴的持续稳定运动，而定长运动则聚焦于轴在固定长度内的精确移动。

单轴运动参数的设置：测试轴的运动参数，包括其在执行回原点、连续运动、以及定长运动等不同任务时的各项关键指标。涵盖了驱动速度、加速度和减速度等基础参数，涉及到 S 段参数这类复杂而精细的设置。并且，必须精确设定终点位置，确保运动轨迹的准确；同时，运动方向亦不可忽视。

选择项目：制动方式的择取，实乃决定运动轴于接收到制动指令之际，是依据预置之运动轨迹逐步减缓速度直至静止，还是顷刻间中断脉冲信号以实现即时停止；又论及位移方式之抉择，关键在于是以相对位置还是绝对位置作为坐标基准；至于加速曲线的抉择，所遵循的运动轨迹是呈梯形还是 S 形；位置计数器选择，确定图 3-19 窗口底部显示的当前位置来源于哪个位置计数器，是根据用户选择的位置计数器（命令位置计数器）还是反馈位置计数器。

（2）插补运动

插补运动可以用于控制插补运动函数调用与执行，测试界面如图 3-20 所示。



图 3-20 插补运动测试界面

Fig. 3-20 Interpolate motion test interface

运动方式选择：插补运动所涵盖的运动模式，可以细致划分为两种主要类别，既有直线插补这一形式，也有圆弧插补形式。因为这两种运动方式需要不同的参数，所以首先应该选择运动模式以决定之后需要配置那些运动参数。

圆弧方向选择：如果在运动方式中选择了圆弧插补，那么在这个选项中就应该确定圆弧插补的方向是顺时针还是逆时针。

插补参数：轴选择：主要是根据使用的需要选择进行插补运动的轴；圆心位

置：如果之前的插补模式选择了圆弧插补，那么此处就需要给定圆心位置。当前速度：运动的整个过程中，相应测试数据可以通过这个文本框实时读取运行速度。

插补运动参数设置：用来设置前面所选的测试轴运动的驱动速度、加速度、减速度以及 S 段参数。

3.2.2 系统通信设计

系统的接口通信设计有多种选择，首先上位机本身内部可以使用总线传输模式，而计算机与外部硬件的总线通信模式^[78]包括有 GPIB 通用接口总线、USB 接口、普通并行通信和 RS232 串口通信等模式。本课题实验主要采用串口通信模式与外部通信，并结合使用 USB 接口模式以及后期指标测试使用专用仪器的 GPIB 通用接口总线模式。

串口通信（Serial Communication）^[79]原理一般比较简单。通信之际，其传输模式殊异于并行通信者，以比特（bit）作为基本单位进行数据的发送与接收。此种逐位传送的特性，相较于以字节为单位的并行通信方式，势必导致其通信速度之缓慢与效率之低微。但是，我们可以利用计算机多串口的设计模式，在使用串口通信发送数据的同时，再使用另一组数据线来接收数据。当然，选择使用串口通信也有其独有的优势，就是其可以实现长距离的通信设计并且传输稳定。在使用串口通信传输时，ASCII 码字符^[80]是最为显著的。ASCII 码传输时的串口通信数据线由地线、发送数据线、接收数据线所构成。其原因是由于串口通信是异步机制，串口首先在发送数据线发送数据，与此同时可以从接收数据线上接收数据，在两个通信的端口，波特率、数据位、停止位以及奇偶校验这些参数必须是匹配的，同时这些参数也是串行通信中最重要的参数。

串口的通信协议^[81]包括如 RS232、RS485、RS422 等协议模式。正常情况下，RS422 在使用时可以连接 10 个设备，而 RS485 在此基处上做了进一步的改进，使得可以外接连接的设备达到了 32 个左右，并且重新定义了串口通信的电气特性使得在连接多设备的情况下，仍保持稳定的信号电压。在设备网络连接的过程中，可以看出 RS485 的卓越特性，其中引人注目的便是其抗噪能力，以及它出色的多点连接能力。这两点特质，恰恰使得通过单个 RS485 接口来组建一个完整的设备网络成为可能，且操作过程异常便捷。

实验通信控制卡使用以 48 个通用数字输入口和 32 个通用数字输出口的配置，以及光耦隔离和集电极开路的方式进行设计。DMC2C80 控制卡每轴的 PUL 和 DIR 信号是采用 26LS31 差分驱动输出的，通过定义 J1-J24 跳线来设定脉冲为差分输出或单端输出两种方式，原理图如图 3-21 和图 3-22 所示。

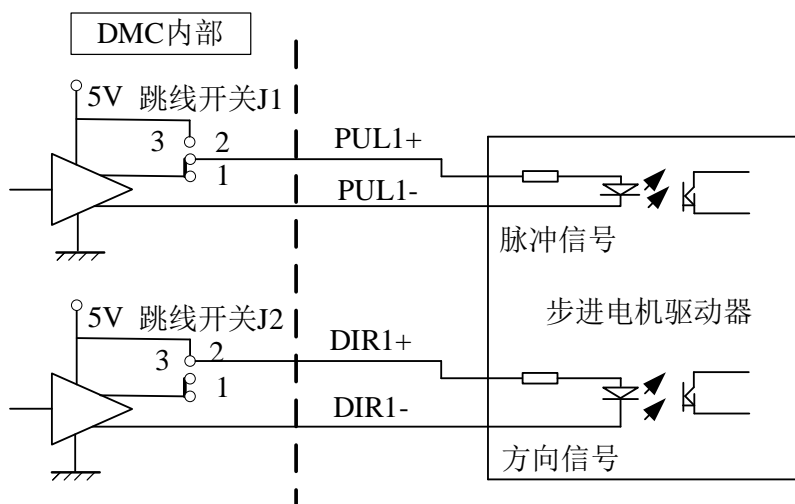


图 3-21 差分方式设置及接口电路图

Fig. 3-21 Differential mode setting and interface circuit diagram

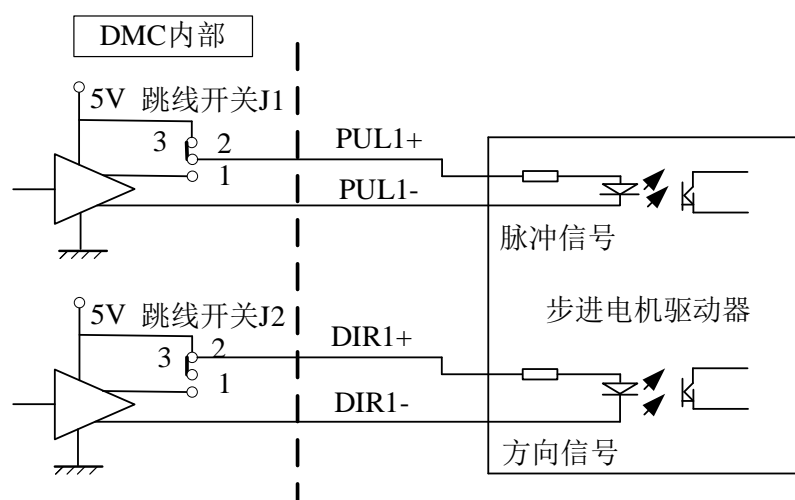


图 3-22 单端输出设置及接口电路图

Fig. 3-22 Single-end output setting and interface circuit diagram

当脉冲输出为单端输出模式，PUL 与 DIR 两端所承载的电流务必维持在 20 mA 以下，以防止过载。同时，电机驱动器中光耦组件的工作电流则定格在 10 mA 上下，来确保适当的限流电阻配置，以平衡电流大小并保障设备的安全运行。此外，PUL 和 DIR 两端的电流正是由 DMC2C80 内部的 5 伏特电源所提供，这一设计确保了信号的稳定传输和输出的高效性。

当设定脉冲为差分输出或单端输出两种模式时，这两个输出口可以由程序设定成 CW/CCW 双脉冲模式或 PUL/DIR 脉冲+方向模式。表 3-2 为接口 X1 的脉冲输出信号表。

表 3-2 脉冲输出测试信号表

Table 3-2 Pulse output test signal table

X1 引脚号	信号	说明	X1 引脚号	信号	说明
1	PUL1+	第 1 轴脉冲	35	PUL4+	第 4 轴脉冲
2	PUL1-	信号	36	PUL4-	信号
3	PUL1+	第 1 轴脉冲	37	PUL4+	第 4 轴脉冲
4	PUL1-	信号	38	PUL4-	信号
5	PUL2+	第 2 轴脉冲	39	PUL5+	第 5 轴脉冲
6	PUL2-	信号	40	PUL5-	信号
7	PUL2+	第 2 轴脉冲	41	PUL5+	第 5 轴脉冲
8	PUL2-	信号	42	PUL5-	信号
9	PUL3+	第 3 轴脉冲	43	PUL6+	第 6 轴脉冲
10	PUL3-	信号	44	PUL6-	信号
11	PUL3+	第 3 轴脉冲	45	PUL6+	第 6 轴脉冲
12	PUL3-	信号	46	PUL6-	信号

3.3 自动耦合系统算法与实现

结合搭建完成的硬件设备和开发完成的软件系统，采用传统爬山算法模型的基础上结合模式搜索算法来实现光纤与芯片光波导间的耦合对准通光以及寻找最大耦合光功率。通过对传统耦合对准寻优算法原理的了解和实验对比，在原有传统算法的基础上，根据测试数据的耦合效率加入另一种算法模型，从而补足了单一算法测试的缺陷，最后将新结合的算法模型运用到测试中，使得耦合效率与耦合光功率明显提高。

3.3.1 光耦合自动对准算法

对于光耦合自动对准算法的研究，通常都是基于最为原始的几种单一算法，最为经典的包括退火法、爬山法和遗传法。

退火法的基本原理来源于金属材料的退火形式。当对某一金属材料进行加热到较高温度时，这时金属材料本身的内能就会不断增大，内部的粒子也就由未加热之前的排序演变为无序状态，而当让其自然慢慢冷却下来的过程中又会恢复到原始的有序状态。金属熔化后，其原子开始激烈无序运动，力图达到能量最低状态。这一过程伴随能量转换，起初能量高，随冷却逐渐降低，至凝固时降至最低。在这过程中，金属原子仿佛在探索最优路径，其跳跃幅度逐渐缩小，直至找到并稳定在全局最优解上。其缺陷也是十分明显，就是在耦合寻优过程中，对准搜索的过程一部分会以概率性的方式位移搜索，最后测试结果也将会不稳定。

遗传法的基本原理来源于自然界生物进化的形式。算法模拟自然物竞天择，结合遗传机理与选择机制，实现最优解的搜寻。它不断迭代优化，为复杂问题提供有

力解决方案。首先，寻找一种对目前问题进行编码的方法，接下来，进行随机初始化一个群体，这里所指的是设置各个轴的初始坐标，解码后并使用适应性函数来评估每个基因。然后，根据特定的预定义规则进行选择，淘汰不适合的同时保留优秀基因，在这个过程中，意味着保留具有较高光功率的坐标。最后，让特定的个体基因进行交叉和突变，以形成下一代群体，并重复这个过程直到找到最佳的解。虽然此算法相比于前两种的算法，弥补了陷入局部搜索的缺陷，拥有了进行较为全面全局搜索寻优的能力，但是其牺牲了单轴运动时局部搜索能力，导致单轴运动时耗时很长，后期搜索效率降低。而且在实际生产线中遗传法很容易出现早熟收敛的问题。

而爬山法的基本原理来源于生活中爬山过程中不断向着最高峰行进的形式。首先对进行初始粗略扫描到的位置信息进行采集，并随机的抽取一些相邻位置的采集点选择最优的个体，不断替换前一步采集的最优个体，如此重复这个搜索替代过程。此算法在高精度对接耦合过程中的搜索理念与人工操作的思路几乎不差，所对接一端的光纤会沿着垂直通光光轴的位置做设定好的小步长一维扫描搜索，进行设定步长搜索、逻辑判断和闭环反馈，并最终停止在输出功率极大值的位置上。此算法在耦合系统平台运行过程中，在进入耦合曲线峰值在 93% 的区域后，在判断下一步位移走向时需要前后测试值进行精确比较，从而确定是否取得最大值。虽然此算法可以将搜索的极值耦合范围缩小到一定区域从而减少下一步的搜索时间，但是理论上搜索峰值附近左右的光功率变化都比较平缓，而且轻微的噪音都会产生采集数据的波动，这会使得耦合系统误判，采集到的结果并不是极值，造成使得搜索结果紊乱，并且其循环过程极易陷入局部的最优解个体，从而停止搜索进程，最终导致无法寻找到整体的最优解，使得测量精度降低。

在此期间，研究者们对高精度光波导自动耦合系统对准耦合算法提出了减小传统算法微小变值误判的算法，比如质心耦合算法、半值耦合算法、中心搜索耦合算法等。这些耦合算法最基本的出发点均是通过代数平均来减小随机产生的误差，即便带有很强的鲁棒性，也需要进行多次循环的光功率搜索。所以需要结合算法进行改进以及相结合，本文对耦合系统引入爬山并行模式搜索算法，使得集成光波导系统测试测量误差可控，精度升高，提升了耦合系统的性能指标以及系统的稳定性。

3.3.2 爬山并行模式搜索算法

1、算法测试流程

由于传统爬山算法作为一维算法，在进行多自由度切换搜索时需进行反复循环，从而造成需要采样的点数增多和耗时更长，并且在数据结果采集时容易受到交叉耦合带来的影响导致搜索无效。所以，本实验在此基础上引入模式搜索算法即爬山并行模式搜索算法，有效减少了搜索过程中对采集的基点数，并且提高了光波导自动耦合效率以及器件指标更优。

模式搜索法源于 Hooke 和 Jeeves 在 1961 年的研究。它与爬山法有相似的位移原

理，却无需目标函数的导数信息。此算法仅通过比较目标函数值的大小来确定迭代点的移动方向，来解决光纤对准等问题。其独特之处，在于无需复杂的导数计算，便可实现目标优化。在此基础上并行上传统的爬山算法，经过设计，成功让该系统在多个自由度上并行地进行优化迭代，其过程依托于模式移动技术的运用，确保每次迭代均精准地朝着最大耦合功率的方向趋近。如此，多自由度搜索得以高效开展。由设计爬山并行模式搜索法，可以通过灵活的探索移动与精准的模式移动，实现对目标函数最大值的全面搜索。系统运行主要算法流程图，如图 3-23 所示。

搜索基本流程为：假设初始点为一个基点 X_1 ，从 X_1 出发，沿 X 和 Y 方向进行探测性位移，直到发现功率值更高的第二个基点 X_2 。随后，依循 X_2 到 X_1 的方向指引，以每步 0.5 微米的精确进度，持续前行，展开模式位移。这一过程旨在通过系统性的探测和精确的位移，找到最佳的功率采集位置。然后从模式搜索位移到达的位置 X_1 再次进行模式探测位移，多自由度循环迭代，直至功率值开始下降，这个过程中需要 3-4 次的功率值采集判定。这时的模式位移与搜索移动在此情况下均失效，需回归至上一次的标定基点，重新设定位移值，减小步长，重启模式搜索。持续此过程，直至步长满足预设的探索精度目标，确保搜索的有效与准确。

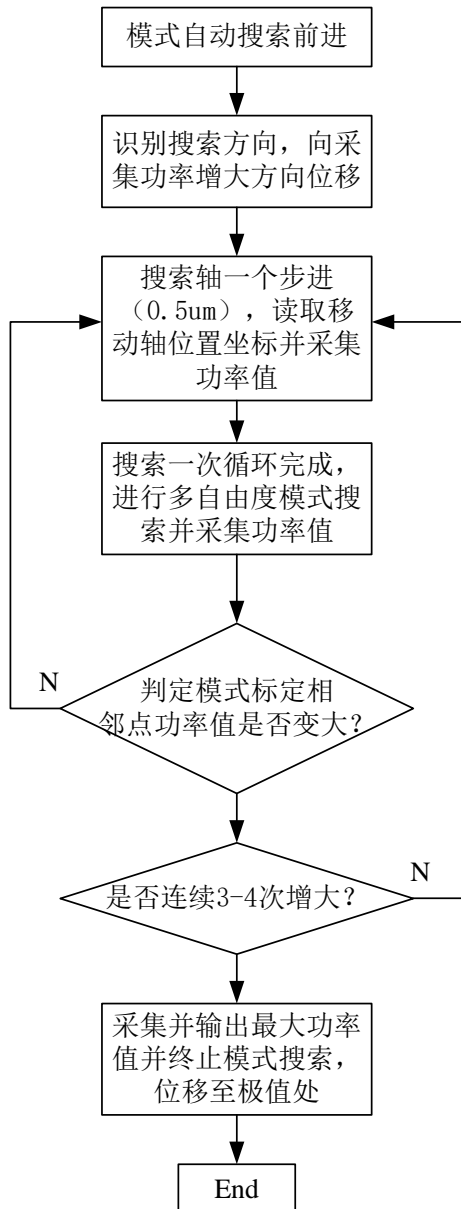


图 3-23 算法流程图

Fig.3-23 Algorithm flowchart

2、算法测试参数

爬山并行模式搜索算法参数在爬山算法的基础上加入了新的搜索参数，包括加速因子、减速因子以及误差条件限制，而传统的爬山算法搜索参数则包括有基础定义步长、检测点、迭代次数以及终止条件。

(1) 基础定义步长是指在各个控制轴上，步进电机在驱动自动臂位移时需要检测的最小长度。

(2) 检测点是指防止在进行初始搜索时陷入局部的峰值条件也就是局部所出现的最大功率值，从而使其能继续执行搜索指令。

(3) 迭代次数是指当搜索进行到峰值后，搜索步长将进行减半处理，再进行反复搜索，从而更精确的接近真实峰值位置，其重复的次数也就代表了反复减小的步

长搜索次数。

(4) 终止条件是指系统开始执行时自定义的阈值或者执行完毕设定的反复搜索次数，系统就可以停止本次搜索。

(5) 加速因子是指在初始搜索进行位移时，在设定搜索方向正确的情况下，进行加速搜索模式，减少运行时长。

(6) 减速因子是指在进行多维度搜索均没有出现最大或者更大的功率值时，需要在当前位移位置执行缩减步长指令，小范围内位移进行搜索峰值从而有效探测出最大功率值。

(7) 误差条件是指在在进行搜索多维度搜索后，多次所缩减的步长，以及定义步长所减小到的最小值域，不能无限制减小带来更多时长损耗。

3、算法测试程序

在上位机上通过运用 Visual Studio 对爬山并行模式算法进行扩展编程，Visual Studio 是一款由微软公司开发的集成开发环境 (IDE)，支持多种编程语言，如 C++、C#、VB.NET、F#等，应用于桌面应用程序、Web 应用程序、移动应用程序等开发。此软件集成了强大的调试工具，可快速定位和修复代码中的错误，如断点、监视变量、调用堆栈、跟踪日志等功能。此外，Visual Studio 还提供了代码编辑器，具有语法高亮、自动补全、代码片段、重构等功能，并且支持集成第三方插件以扩展其功能，部分运行程序如下：

```
dmc2c80.d2c80_set_pulse_outmode(0, 0);
dmc2c80.d2c80_set_pulse_outmode(1, 0);
//进行脉冲模式的选择
if (Low_Speed.Checked)
home_speed = 0;
else
home_speed = 1;
//回零速度选择
if (CW.Checked)
home_mode = 1;
else
home_mode = 2
//回零方向选择
if (Only_Home.Checked)
home_signal = 0;
else
home_signal = 1;
//回零模式
```



```

dmc2c80.d2c80_config_HOME_PIN_logic(nAxis, 0, 1);
dmc2c80.d2c80_config_EZ_PIN(nAxis, 0, 1);
dmc2c80.d2c80_config_home_mode(nAxis, home_mode, m_nSpeed, home_signal,
number_EZ);
//设置原点信号为低电平有效，允许信号滤波
dmc2c80.d2c80_set_profile(nAxis, m_nStart, m_nSpeed, fAcc, fAcc);
dmc2c80.d2c80_home_move(nAxis);
//设置速度、加速度
private void button2_Click(object sender, EventArgs e)
{
dmc2c80.d2c80_decel_stop(nAxis, 0);
}
private void button3_Click(object sender, EventArgs e)
{
dmc2c80.d2c80_emg_stop();
}
private void button4_Click(object sender, EventArgs e)
{
dmc2c80.d2c80_set_position(nAxis, 0);
}
private void timer1_Tick(object sender, EventArgs e)
{
label1.Text="      运      行      速      度      :      " +
Convert.ToString((dmc2c80.d2c80_read_current_speed(nAxis))) + " 当前位置 : " +
Convert.ToString((dmc2c80.d2c80_get_position(nAxis)));
}
//记录保存当前运行速度和当前位置

```

4、算法测试结果

通过测试的流程图，对爬山并行模式算法进行了数据测试，并对搜索采集的功率值通过所迭代的步数计算出自动耦合系统的耦合效率，其结果均达到设定目标和生产测试标准，结果如表 3-3，图 3-24 所示。

表 3-3 脉冲输出测试信号表

Table 3-3 Pulse output test signal table

组数	爬山并行模式搜索算法	
	耦合效率	迭代步数
1	0.9978	12
2	0.9991	17
3	0.9964	14
4	0.9974	9
5	0.9987	10
6	0.9980	12
7	0.9988	13
8	0.9965	8
9	0.9982	13
10	0.9966	11

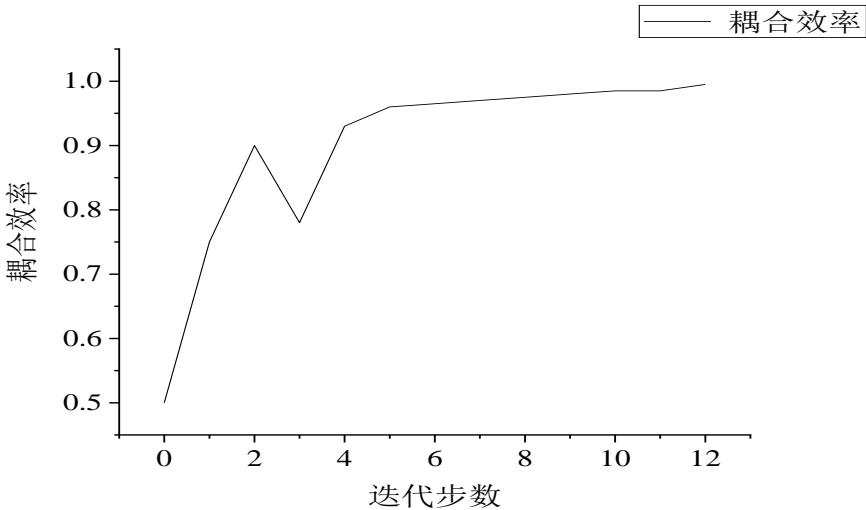


图 3-24 算法测试结果

Fig.3-24 Algorithm test results

从算法测试的结果可以看出，爬山并行模式模式搜索算法在设定目标参数的情况下，随着迭代步数的增长，在设定的范围值内是系统达到了最佳的耦合效率，可以达到了 90% 以上，相应迭代步数均在 20 以内。算法可以很快的搜索并找出到最大光功率值，收敛速度快，推动了自动耦合系统整体的稳定性提升和性能参数的优化。

3.3.3 自动耦合系统的实现

根据之前搭建完成的硬件设备和设计完成的耦合测试软件系统这两大主体部

分，就可以进行整个光波导的耦合测试以及性能指标的对比分析。在此之前还需要进行操作前实验材料的制作工艺步骤环节和最后的自动耦合步骤环节，其中实验材料的制作工艺环节主体包括晶圆的切割和波导芯片的研磨抛光两大步骤。

（1）晶圆切割

在进行这一环节时，需要首先检查好操作过程中所需要用到的仪器设备以及操作工具，包括切割机、晶圆、显微镜和切割以及 UV 膜等，其中主要仪器为切割机，如图 3-25 所示。首先要打开设备间的制气设备，因为在运行过程中会产生大量热量，因此要使用制气设备进行实时降温以免影响仪器切割精度；然后接通电源，启动切割机，开机后打开操作程序并检查切割水流气压是否在阈值内，再对切割刀片进行测高，确保在标准高度范围内；最后进行切割参数设置，主要是确定好数值单位以及切割精度。



图 3-25 晶圆切割机

Fig.3-25 Wafer cutting machine

在检查好切割仪器后，接下来需要对进行切割的材料进行检查以及记录切割标准的要求。按照实际生产中的质量标准和技术标准进行操作，质量要求方面要切割边缘平滑无锯齿并且在显微镜下观察无崩裂破口，技术标准方面指标包括材料、尺寸、厚度、进刀速度、步进以及刀片厚度等，如表 3-4 所示。

表 3-4 技术标准指标

Table 3-4 Technical standard specifications

技术标准指标	材料	砷酸锂晶片
	尺寸	直径 80 mm
	厚度	1 mm
	工艺面	圆晶正面，切片背面
	UV 厚度	50 μm
	进刀速度	0.5 mm/s
	步进	20.68 mm
	切割行程	80 mm
	切度	0.05 mm
	刀片高度	0.07 mm
	衬底厚度	0.05 mm

完成上述两步环节后，就可以将处理好的晶圆放入切割机中，放置好位置并关好阀门，再从切割机的操作台上设定好运行程序即可。具体操作步骤如下：

①切晶圆

首先将晶圆正面涂胶保护好，烘干后准备切割，将工作件贴在那个 UV 膜上，贴平后将晶圆放在 UV 膜的中心位置贴好，如图 3-26 所示，打开切割软件，当观察到气压值达到 0.5 - 0.6 之间，水压达到 1 kg 时，进入操作系统，先测量刀片高度，测量完成后准备切割，将工作件放在吸盘上洗好，对准焦距找到第一刀切割位置，用 CH1 对齐，CH2 设置逆时针旋转 80 度，切割行程为 100 mm，切割刀数为 4 刀，步进 21.68 mm，进刀速度为 0.5 mm/s，设置好参数后进行切割，切割完成后取下单条晶片使用同样的方法切成片。



图 3-26 晶圆放置与固定

Fig.3-26 Wafer placement and fixation

②切片

先将晶圆正面涂胶保护好，烘干后准备切割，将工作件贴在那个 UV 膜上，贴平后将晶圆放在 UV 膜的中心位置贴好。打开切割软件，设置气压值达到 0.5 - 0.6 之间，水压达到 1 kg，进入操作系统，先测量刀片高度，测量完成后准备切割，将工作件放在吸盘上洗好，对准焦距找到第一刀切割位置，设置好参数后进行切割，切割完成后的片如图 3-27 所示。

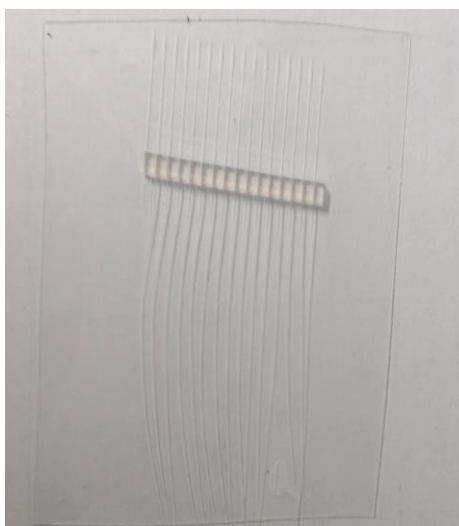


图 3-27 切片

Fig.3-27 Slice

③样片划槽

同样先将晶圆正面涂胶保护好，烘干后准备切割，将工作件贴在那个 UV 膜上，贴平后将晶圆放在 UV 膜的中心位置贴好。打开切割软件，设置气压值达到 0.5

- 0.6 之间，水压达到 1 kg，进入操作系统，设置好参数后进行切割，切割完成后使用显微镜观察以及观察图，如图 3-28 所示。



图 3-28 显微镜与观察图

Fig.3-28 Microscope and observation image

(2) 研磨抛光

这一环节是对上一环节切割完成的工件进行研磨抛光，目的是防止在进行自动耦合时端面粗糙对芯片波导端面造成损伤，从而影响耦合精度和耦合完成后器件的性能指标。所需要的仪器设备包括有研磨抛光机、夹具、夹具托、压臂、研磨片底衬和研磨片实验操作台等，操作过程如下：

①清洗

先用纯净水冲洗砂纸正面（砂纸背面是发亮的），去掉表面上的杂质。然后用喷壶快速扫过研磨机工作面，在表面喷一层薄薄的水雾，再把砂纸贴在工作面上，反复推几下，使得砂纸黏贴牢固。

②固定

将需要抛光的晶片固定在特定的夹具上，在固定时选取两块相同形状的片当作陪片置于晶片两侧，抛光时通过夹具带动晶片在砂纸上打磨。晶片表面涂光刻胶对波导进行保护，整个过程应在热板上进行。两片之间的间隙用石蜡完全填满同时调制两片位于同一高度，防止因抛光而导致间隙中卡入颗粒或碎屑，致使晶片端面划痕或崩边。

③磨抛

磨抛砂纸总共分为七种尺寸，按照颗粒度分为 30 μm 、15 μm 、9 μm 等尺寸。先用氮气枪与无纺布对研磨抛光机如图 3-29 所示，进行清洁，再将砂纸与转台完全贴合，防止气泡的出现，以为气泡会导致晶体崩边，甚至晶片破裂。将安装好的夹具放在抛光机上，放下悬臂，开启机器开始工作，机器进行研磨轨迹运动，每过几分钟使用氮气枪对砂纸、晶片端面吹干净。



图 3-29 研磨抛光机

Fig.3-29 Polishing and grinding machine

(3) 自动耦合

在完成前面两步耦合前的准备工作后，将切割和研磨抛光的晶圆放置在自动耦合台上与芯片波导进行最后的耦合。自动耦合过程大致分为端面调平、粗找光与精调光、数据采集和点胶固化；在这个耦合过程中，最主要就是观察通光找光过程中的输出功率值变化以及在最佳耦合位置处的最优消光比和最大输出光功率，这两个参数指标直接表明了耦合完器件的性能优劣。

①端面调平

将光纤头放上对应的夹具并固定好（使用镊子夹取光纤头嵌入夹具固定槽内，不要拉扯光纤，否则会损坏光纤头，不能损伤光纤头端面和光纤，光纤头端面尽量平行于芯片端面），输入端光纤使用连接器与耦合器相连，再使用空间光功率计测得输入光纤头的功率并换算成实际的输入功率（更换光源和耦合器有可能影响对标准确性需重新对标）记录下输入功率，将两输出端光纤接入快接头并放入功率计中，调平过程中功率变化曲线如图 3-30 所示。

同时也需要手动将固定芯片的载物台调节到相应高度。首先使用脱脂棉沾上酒精将光纤头端面擦拭干净，用镊子取出芯片至无尘纸上并用棉签和酒精将芯片仔细擦拭干净，而后使用镊子将芯片放到载物台指定位置并固定好（芯片顶端要对准载物台顶端，夹取芯片时防止芯片掉落）。

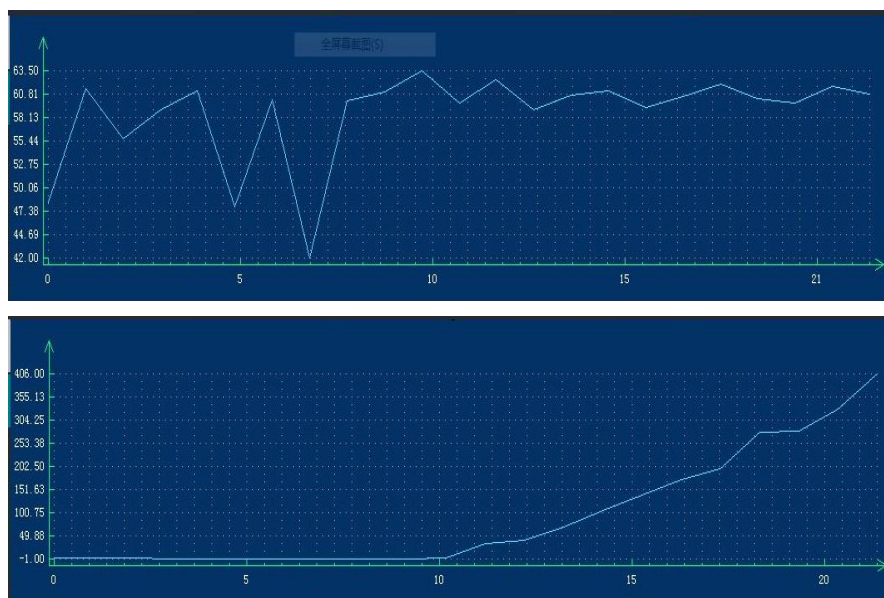


图 3-30 调平功率变化

Fig.3-30 Leveling power change

②耦合找光

自动耦合寻光过程中，首先将输入端光纤头靠近所测光波导的输入端，从水平、垂直方向都要进行调平，并开启红光功率计，微调进行找光。然后，将输出端左臂光纤头靠近波导输出端左侧，水平、垂直调平（在使用芯片调平时需额外注意输出左侧机械臂不能撞到载物台），再次进行微调找光，调到功率最大值，将输出左侧快接头插入消光比测试仪中，进行消光比的调整，调整完成后记录下输出臂左侧消光比。

再将快接头重新插回功率计下侧端口中，移开输出臂左侧光纤头；再将输出端右臂光纤头靠近波导输出端右侧，再从水平、垂直方向进行调平，微调找光，调到功率值最大，将输出右臂快接头插入消光比测试仪进行消光比的调整，调整完成后记录下输出臂右侧消光比，将快接头重新插回功率计端口上侧端口中；最后将输出端光纤头移回原位，分别微调输入、输出光纤头，得到波导两个输出端的最大功率值，并记录此时功率值，调节过程如图 3-31 所示。



图 3-31 耦合寻光过程参数变化

Fig.3-31 Parameter change of coupling light seeking process

③点胶固化

在完成耦合调平与找光，并确定好最大功率值后，首先拉开输入端光纤头一定距离，进行点胶操作，然后再使其靠近芯片波导，输入端胶水涂抹后需要进行微调自动臂的 X 轴、Y 轴与 Z 轴，并以此得到最大输出功率值，记录下此时的功率值，再开紫外固化灯进行固化照射一定时长。

再次重新固定好芯片，调整好位置，并微调输出端光纤头至功率最大值，记录下此时输出的功率值。首先拉开两个输出端光纤头一定的距离，输出左臂光纤头进行点胶，然后再靠近输出波导，进行微调 X 轴、Y 轴与 Z 轴并获得最大输出功率值，并记录下此时功率值，而后开紫外固化灯进行固化照射一定时长，操作过程如图 3-32 所示。

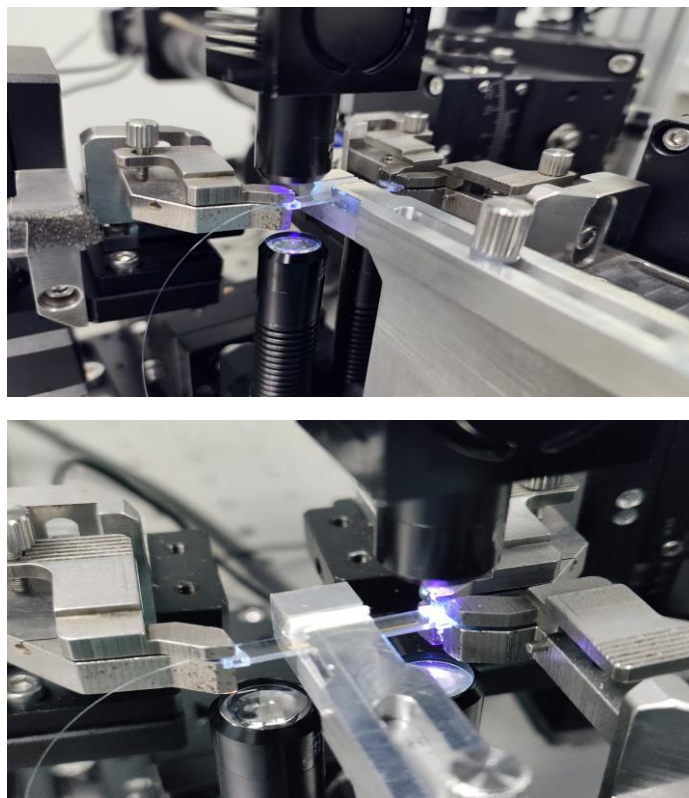


图 3-32 耦合点胶与固化

Fig.3-32 Coupling dispensing with curing

3.4 本章小结

本章第一部分讲述了集成光波导自动耦合系统的硬件设计和使用新的优质碳素结构钢材料制作的耦合夹具，包括有光路系统设计、观察系统设计和机械系统设计。首先通过对光路系统的设计，选型出测试用光波导为 Y 型光波导芯片和测试用光纤为熊猫型保偏光纤以及测试用红光光源工作波长为 1310 nm；对观察系统的设计中，设计了由高精度 CCD、显微镜以及 4 路成像分割器组成的耦合观察体系，并对其耦合聚焦过程中俯视观察图和侧视观察图测试对比；最后机械系统设计中，对耦合系统最为重要的自动六维台进行了选型设计，并对波导芯片固定台进行改进设计以及选用的耦合过程所使用的光学气垫式隔震平台。第二部分对自动耦合系统的软件部分进行了构造与设计，包括系统整体的软件架构和通信设计。耦合系统的软件架构方面设计并编写出了上位机的操作系统界面和驱动轴的控制程序，通信设计方面选用了 RS232 串口通信模式以及通信控制卡输入输出端的设定。第三部分介绍了自动耦合系统算法与基本测试。先说明了传统算法的形式和缺陷，然后将设计的爬山并行模式算法引入搭建完成的自动耦合系统中，并完成了基本测试，测试出的结果显示本算法的引入，缩短了耦合光功率值的寻找时间，显著提高了耦合效率。

4 集成光波导自动耦合系统的测试

通过前文中对集成光波导自动耦合系统的搭建与设计，成功的完成耦合系统建立并进行了基本调试和测试材料的选用。为检验所搭建耦合系统的各项性能，接下来对其最直接反馈性能的光学指标和稳定性进行标准的测试，包括有模场分布测试、分束比测试、消光比测试和插入损耗测试以及系统整体耦合效率的测试。

4.1 光学测试

1、模场分布测试

光波导的模场分布测试一般也需要搭建好的专业测试平台，通常用模场直径（MFD）作为性能指标来描述模场分布状况。模场直径的定义为当模场模式强度位于峰值位置时，光强降低到轴线最强光强的 $1/e^2$ 处的直径。模场直径还可以用来表示基模的尺寸大小，当所测的模场尺寸越小，也就表示其有更高的模式限制和更强的光强度。

实验采用近场扫描技术对器件的模场分布进行测试，模场分布观测系统如图 4-1 所示。

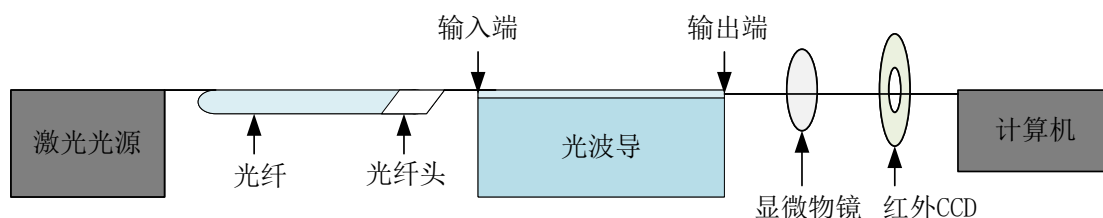


图 4-1 模场观测系统

Fig.4-1 Mode field observation system

实验测试使用包层直径为 $80\ \mu\text{m}$ 的保偏光纤，所通红光光源为 $1550\ \text{nm}$ ，测试时波导的输出端通过物镜聚焦成像在红外 CCD 上，由计算机解析后输出完整的模场分布图案，模场分布测试场景如图 4-2 所示。

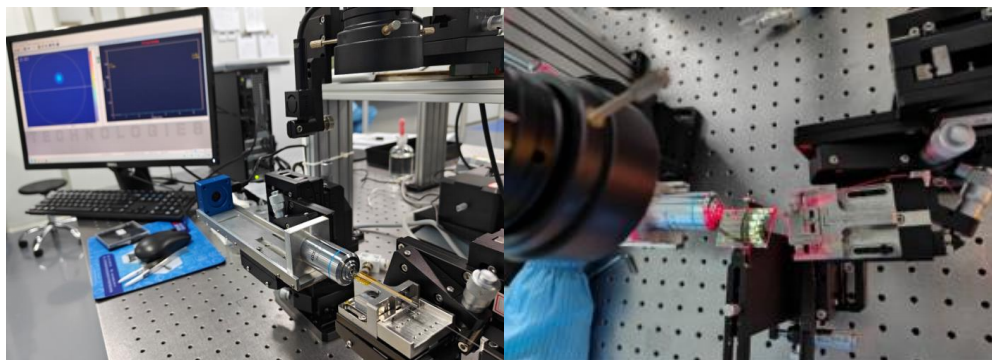


图 4-2 模场测试场景

Fig.4-2 Model Field test scenario

实验测试的流程为：

①首先准备好测试用 1550 nm 的光源、红光光源、一端带有点胶完成的光纤头的光纤、光纤熔接机、米勒钳、无尘纸、无水乙醇、光纤适配器和计算机模场分布测试软件等，如图 4-3 所示。



图 4-3 模场测试工具

Fig.4-3 Mould field test tool

②测试光纤：将手动台右边部分装上光纤头夹具及光纤，载物台向后退，左边部分拆卸后装上模具及物镜，调平光纤的位置，然后再调整两台距离并让光纤靠近物镜。

③测试芯片：将手动台右边部分装上光纤头夹具及光纤头后，在载物台上放置好芯片，左边部分拆卸后装上模具及物镜，调平光纤头位置，调整两台距离并让其两端靠近芯片。

④测试光纤进行通红光，调整右边光纤位置，让红光透过物镜后聚成一个点，调节过程中要注意它们之间的距离，再挪到靶心中间，打开盖子，把光斑调到线中间的圆心位置处。

⑤测试芯片进行通红光，让光纤头和芯片耦合后保持右边不动，调整左边物镜位置，让红光透过物镜后聚成一个点，调节过程中也要注意它们之间的距离，再两个输出点位依次挪到靶心中间位置，打开盖子，再把光斑调到线中间的圆心位置。

⑥打开计算机软件，如图 4-4 所示。然后点击 live mode→Beam width，选择模式并改成 Fit Gauss 测量模式，再点击 View-cross section→Beam results，添加 Width X、Y 宽度（show in 2D view）到左上角，调整圆圈位置到线位中间并让它形状达到最小，最后读取 X、Y 数值，再分别乘以系数 23.68，测量完成后把镜头盖装回原位。

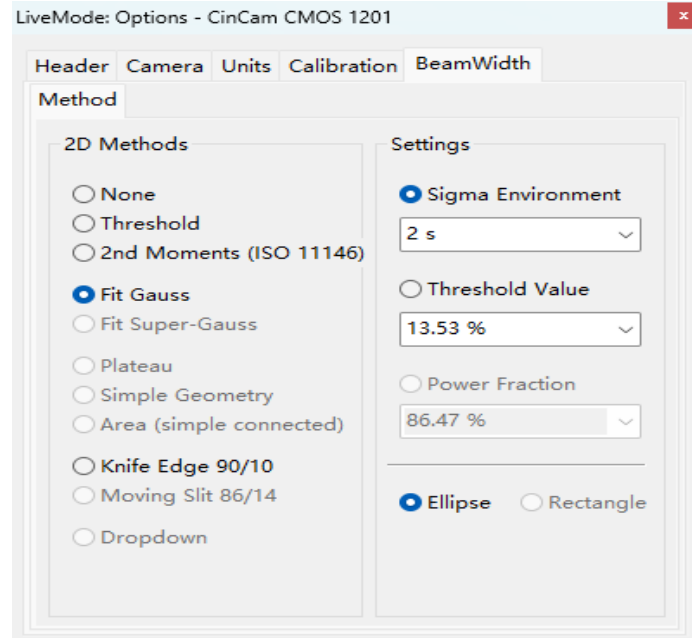


图 4-4 模场测试软件

Fig.4-4 Mold field testing software

实验测试过程中，再进行通完红光以后，发现波导出现了条纹图案而不是汇聚到一个光斑点，如图 4-5 所示。

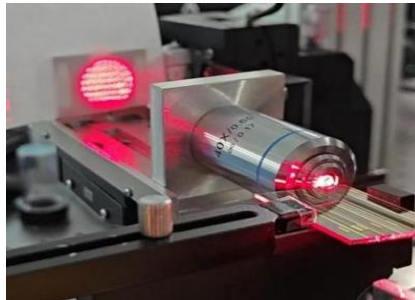


图 4-5 条纹图案

Fig.4-5 Stripe pattern

通过对操作流程和测试系统的检查分析后发现，原因在于系统的物镜与光的接收器之间出现了倾斜角度，导致芯片距离物镜太远所造成。进行适当距离与角度调整后，成功的接收到了测试出的红斑斑点，模场分布测试结果如图 4-6 所示。

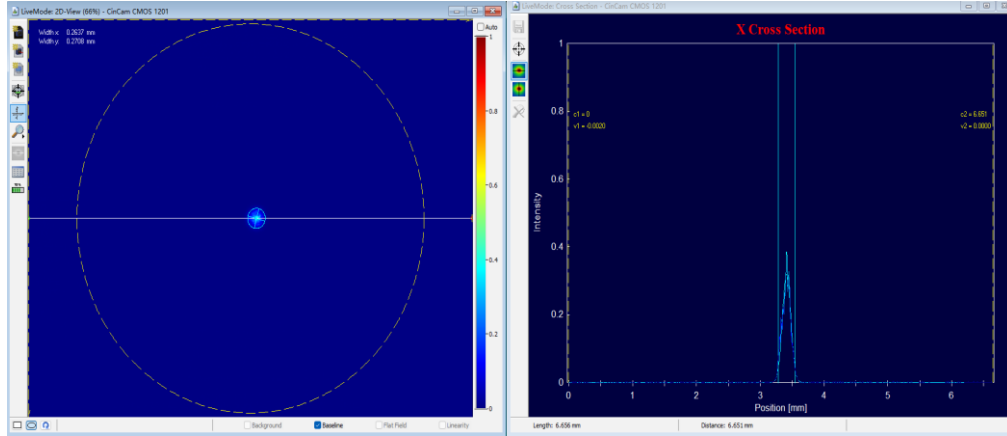


图 4-6 条纹图案

Fig.4-6 Stripe pattern

通过测试出的分布图可以得出 X 轴宽度为 0.2704 mm，Y 轴宽度为 0.2877 mm，系数为 23.68，由公式得出 X 模场直径为 6.4030 mm，Y 模场的直径为 6.8127 mm。通过以上数据可以分析得出，经自动耦合系统所耦合完成后，波导的模场分布数据均达到了生产标准并且分布良好。这也间接证明了经耦合系统所产生的损耗更低、功率值更大。

2、分束比测试

Y 波导的分束比（D）基本定义为：在特定情况下集成光学分束器各分支输出光功率相对于总输出光功率相对值的比值，而对于 Y 波导调制器为器件两根尾纤输出光功率分别占总输出光功率的比值，计算公式为：

$$D = \left[\frac{P_1}{P_1 + P_2} \times 100 \right] : \left[\frac{P_2}{P_1 + P_2} \times 100 \right] \quad \text{式(4-1)}$$

其中，D 为分束比， P_1 为尾纤左臂输出光功率， P_2 为尾纤右臂输出光功率。

测试使用包层直径为 80 μm 的保偏光纤，光源为 1550 nm 激光光源、功率计、消光比测试仪、光纤夹具、酒精、无尘纸等实验用品，连接完成后开启激光光源并通过实时的功率计和消光比测试仪分别采集输出端尾纤两臂的光功率值，测试如图 4-7 所示。



图 4-7 分束比测试系统

Fig.4-7 Beam splitting ratio test system

选取五组样品在自动耦合系统上进行分束比的测试并计算比值，如表 4-1 所示。

表 4-1 分束比测试参数

Table 4-1 Beam splitting ratio test parameters

测试编号	测试分束比	分束比变化量
Y-1	49.9 / 51.1	1.1%
Y-2	49.7 / 51.3	
Y-3	49.1 / 51.9	
Y-4	49.6 / 50.4	
Y-5	49.4 / 50.6	
平均值	49.54 / 51.06	

由上表可得，在同一批次测试光波导芯片中，五组测试样品在经耦合系统测试后分束比基本均接近 50/50，并且分束比的变化量为 1.1%，造成其微小波动的原因可能是由光源不稳定性分量和 Y 波导端面外形以及 FC 插头等引入的不确定分量所带来。实验测试结果的波动变化量符合正常指标，所以本文设计的耦合系统完全符合并且达到了测试标准，并优于同行业分束比的测试指标参数，如图表 4-2 所示。

表 4-2 不同耦合系统分束比测试

Table 4-2 Beam splitting ratio test for different coupling systems

作者	耦合模式	分束比
Rensselaer Polytechnic Institute	手动型	45.5 / 48.3
New Port	半自动型	46.3 / 48.5
日本骏河精机	自动型	47.2 / 49.4
台湾机械研究所	自动型	48.1 / 50.2
本文	自动型	49.54 / 51.06

3、插入损耗和消光比测试

耦合系统的插入损耗主要是指发送端的光信号和接收端接收光信号的衰减状况。而造成插入损耗的主要原因是由光波导模场和光纤模场中的重叠积分所带来的，包括菲涅尔反射损耗、光纤与波导对准偏差及模场匹配损耗，这些引起的插入损耗，共同构成了端面损耗，需精心控制以提高传输效率。

菲涅尔反射损耗：实则描述的是光在这二者之间传递过程中，由于界面的反射效应所引发的能量耗散现象，其存在无疑影响了光的传输效率。其与光纤和波导的折射率、入射角以及传输距离都有关。光束射入不同折射率介质，一部分光线发生反射，折射规律影响了反射程度；另一部分会经过光的折射而产生光的损耗，因为空气与光纤的折射率不同，所以当传播方向为光纤-空气-光纤时，光在光纤中就极易造成菲涅尔反射，带来耦合损耗。

对准偏差损耗：线与光波导之间的耦合对准偏差损耗是目前生产生活中最主要的耦合效率损耗，其中包括三种类型偏移，分别为：侧向间距偏移、纵向间距偏移以及角度偏移，偏移的程度直接影响到耦合的损耗大小。

第一种侧向间距偏移。其因光纤与光波导之间的匹配模场中心不对称，引起轴向间的误差，表现在对准轴的 X 轴和 Y 轴方向上的偏移，如图 4-8 所示。

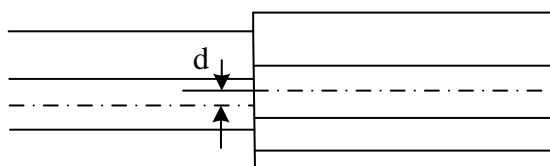


图 4-8 侧向间距偏移

Fig.4-8 Lateral spacing offset

第二种纵向间距偏移。其是因光纤端面与芯片距离不匹配，从而引起模场之间失配造成损耗，主要表现在 Z 轴方向上的位置间隙偏移，如图 4-9 所示。

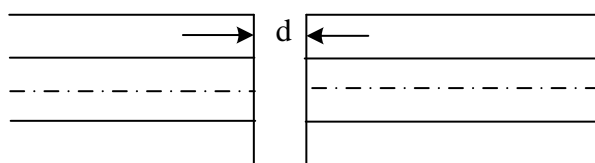


图 4-9 纵向间距偏移

Fig.4-9 Vertical spacing offset

第三种角度偏移。其是因为光纤光轴与光波导芯片对准耦合时存在角度偏移而造成损耗，主要表现在 θ_x 、 θ_y 和 θ_z 角度上引起的对准耦合位置偏移，如图 4-10 所示。

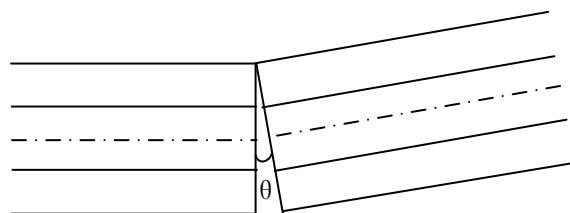


图 4-10 角度偏移

Fig.4-10 Angle Offset

模场匹配损耗：成光波导与光纤模场不匹配的主要原因，在于芯片光波导与光纤模场的半径差异。也就是说，即使在光波导芯片与光纤的光轴几乎完整对准耦合时，所测得的耦合效率也达不到理想状态，最高效的方法就是从整体上保证所用光纤的模场与芯片波导的模场基本上保持一致。

在分析完插入损耗的主要由来后，来进行耦合系统测试损耗数据。这一步的测试需要确保好测试的环境，关键部位必要时采集遮光措施，以消除环境光的干扰，同时确保好测试使用光源的稳定性以及波长的准确度，测试系统如图 4-11 所示。

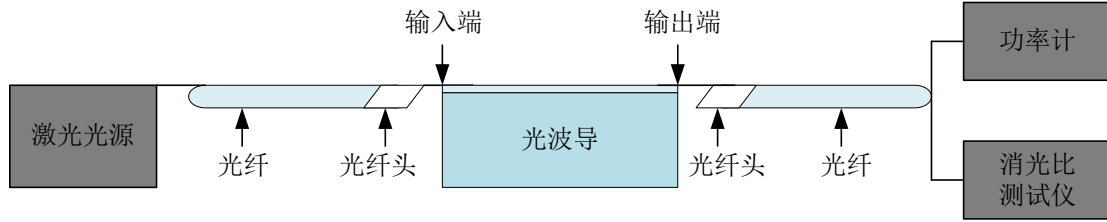


图 4-11 插入损耗与消光比测试系统

Fig.4-11 Insertion loss and extinction ratio test system

测试使用包层直径为 80 μm 的保偏光纤，光源为 1550 nm 激光光源、功率计、消光比测试仪、光纤夹具、酒精、无尘纸等实验用品，并通过实时的功率计和消光比测试仪显示读取数据，测试场景如图 4-12 所示。

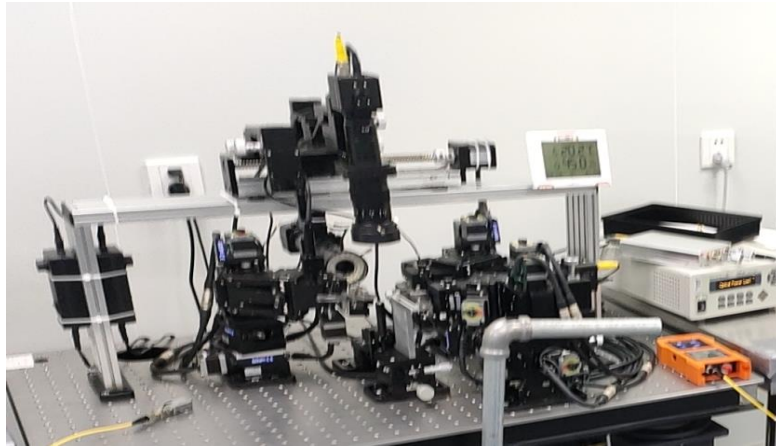


图 4-12 插入损耗与消光比测试场景

Fig.4-12 Insert loss and extinction test scenario

实验测试的流程为：

①先用空间光功率计测量出输入端光纤头的功率 P_1 （如果过程中更换光源和耦合器有可能影响到对标准确性则需进行重新对标）并记录下来。

②微调节输入光纤头、输出光纤头直至输出的功率值 P_2 和 P_3 达到最大，将输入输出光纤头拉开一定距离，并在输入光纤头端面 and 输出光纤头端面点上折射率匹配液，再调节输入输出光纤头直至输出功率值 P_2 和 P_3 达到最大，记录下此时的功率值 P_2 和功率值 P_3 。

③将测试出的数据按照公式：

输出端-1 插入损耗：

$$IL_1 = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{4P_2} \right) \quad \text{式(4-2)}$$

输出端-2 插入损耗：

$$IL_2 = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{4P_3} \right) \quad \text{式(4-3)}$$

整体输出端插入损耗:

$$IL=10\log_{10}\left(\frac{P_1}{P_2+P_3}\right)-3 \quad \text{式(4-4)}$$

消光比:

$$(ER)=-10\log_{10}\left(\frac{P_{\max}}{P_{\min}}\right) \quad \text{式(4-5)}$$

计算出输出两端的插入损耗和消光比的值, 如表 4-3 所示。

表 4-3 系统测试参数

Table 4-3 System test parameters

测试编号	输入 P_1	输出 P_2	输出 P_3	插入损耗	$ER-2$	$ER-3$
Y-1	695.8 μW	89.6 μW	92.5 μW	3.45 dB	-33 dB	-32.1 dB
Y-2	688.2 μW	88.2 μW	90.3 μW	3.38 dB	-35.1 dB	-34.4 dB
Y-3	715.6 μW	88 μW	89.6 μW	3.36 dB	-36.3 dB	-36 dB
Y-4	725.3 μW	90.5 μW	91.2 μW	3.43 dB	-36.8 dB	-34.6 dB
Y-5	885 μW	104.3 μW	104.5 μW	3.28 dB	-39.6 dB	-36.4 dB

由上表可得, 五组样品在经过自动耦合系统测试后, 最低插入损耗稳定在 3.30 dB 左右, 输出端的最优消光比都达到了-33 dB 以上, 平均在 36 dB 左右, 五组测试样品的标准插耗均为 3.00 dB, 使得经前文耦合效率公式计算出耦合效率达到了 98.74%, 耦合精度也达到了 90% 以上。

对于耦合精度值的定义, 通常情况下是指当耦合系统的输入端与芯片波导完成耦合通光时, 此时在芯片波导输出端所输出的最大功率值与理论上标准耦合系统输出的最大功率值之比。本文所采用的理论上标准耦合系统最大输出功率值为现阶段实验室生产中成熟的手动定标耦合台所测出, 首先将同批次五组样品在手动定标耦合台上完成与同一个型号芯片波导通光, 然后通过观察功率计的输出功率值变化, 经过手动进行 3-4 次的不断微调, 如图 4-13 所示, 取到最大输出功率值。最后, 在手动定标平台上取下测试样品和芯片放到本文设计的自动耦合系统进行测试, 将自动耦合系统采集到的最大输出功率与手动定标耦合台上的数据进行对比, 所测出的最大输出功率偏差值即为耦合系统的耦合精度值。

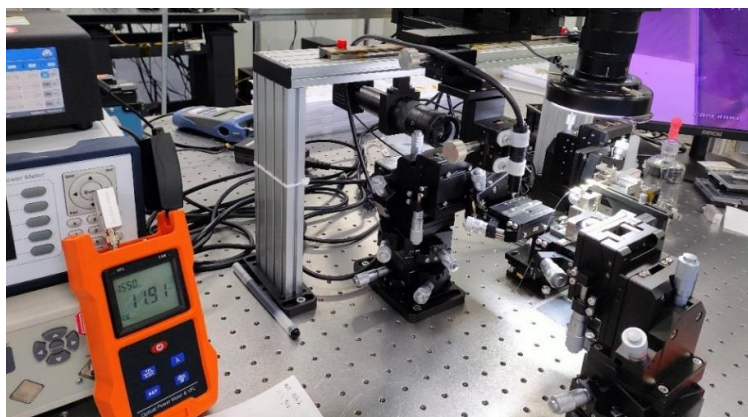


图 4-13 手动定标耦合台测试

Fig.4-13 Manual calibration coupling test

在同一批次测试光波导芯片中，系统耦合损耗测试在 0.1 dB - 0.3 dB 范围内波动，消光比在 1 dB - 3 dB 范围内波动，而本文设计的耦合系统损耗测试在此范围内，数据均达到了器件测试参数的标准指标，并优于同行业中如表 4-4 所示的测试数据。

测试过程中参数指标出现微小的波动，是因为实验过程中始终存在不可避免的不可控因素，例如系统耦合过程中周围空气流动以及温湿度的变化等，但最终测试结果均达到了最优值。表明了本文所搭建设计的自动耦合系统完全符合制作要求，达到了预定目标值。

表 4-4 不同耦合系统的测试参数

Table 4-4 Test parameters of the co-coupled system

作者	系统模式	插入损耗	消光比	耦合效率%	耦合精度%
Rensselaer Polytechnic Institute	手动型	16.62 dB	-25 dB	43%	60.1%
New Port	半自动型	12.35 dB	-27.1 dB	82%	68.4%
日本骏河精机	自动型	10.85 dB	-30.3 dB	90%	74.3%
上海理工大学	自动型	9.83 dB	-32.8 dB	/	81.4%
台湾机械研究所	自动型	4.63 dB	-34.6 dB	95.7%	86.4%
本文	自动型	3.30 dB	-36 dB	98.74%	91.6%

4.2 稳定性测试

通过对光波导自动耦合系统进行参数指标测试后，还需要考虑到其自身的测试稳定性。通常对一个系统性能优劣的评判标准，不仅仅在于要考虑它的测试性能也要对系统在符合测试生产的环境要求下，长时间或者连续运行时长过程的稳定性，这主要体现在测试样品数据参数指标的变化量以及规定范围内的耦合效率值。

数据测试的原理与前一节相同，本次对系统所处的所测试环境做出严格规范。

在温度保持在 $18^{\circ} - 22^{\circ}$ 范围内、湿度保持在 50% 以下的超净间进行系统的稳定性测试，如图 4-14 所示。



图 4-14 测试超净间

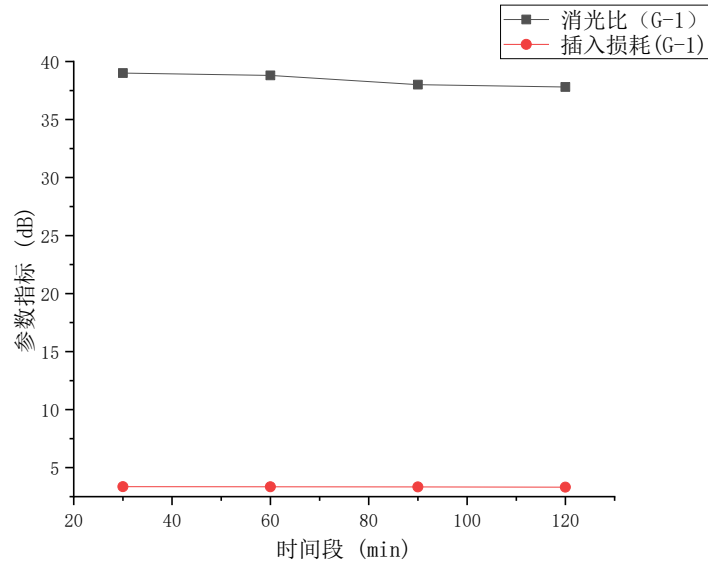
Fig.4-14 Test clean room

本次使用两组样品分别在时间段为 30 min、1 h、90 min 和 2 h 的规定范围内，对耦合系统的稳定性进行了测试，测试数据如表 4-5 所示，测试时间段最值如图 4-14 所示。

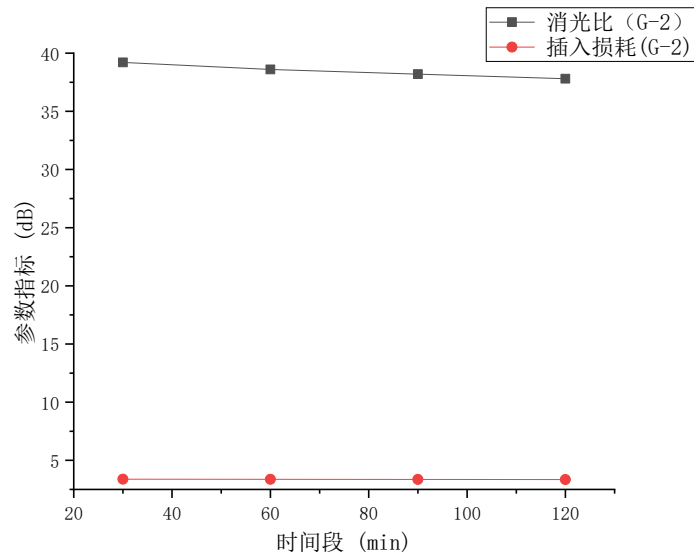
表 4-5 系统稳定性测试数据

Table 4-5 System stability test data

测试编号	时长	输出 P_2	输出 P_3	插入损耗	$ER-2$	$ER-3$
G-1	30 min	78.7 μw	76.6 μw	3.36 dB	-37 dB	-39 dB
	1 h	78.5 μw	76.4 μw	3.35 dB	-37.7 dB	-38.9 dB
	90 min	77.8 μw	75.6 μw	3.34 dB	-36.9 dB	-38 dB
	2 h	77.3 μw	75.4 μw	3.32 dB	-35.7 dB	-37.8 dB
G-2	30 min	88.7 μw	86.8 μw	3.38 dB	-37 dB	-39.2 dB
	1 h	88.6 μw	86.6 μw	3.37 dB	-37.8 dB	-38.6 dB
	90 min	87.6 μw	85.6 μw	3.37 dB	-36.7 dB	-38.2 dB
	2 h	86.8 μw	84.8 μw	3.35 dB	-35.6 dB	-37.7 dB



(a)编号 G-1



(b)编号 G-2

图 4-14 系统稳定性测试

Fig.4-14 System stability test

通过上述表格的测试数据和时间段最值图可以看出，所测试的两组样品在分别经过 30 min、1 h、90 min、2 h 的稳定性测试之后，耦合输出的两端功率值在 30 min 以内的变化值均在 $0.1 - 0.2 \mu\text{W}$ 以内，插入损耗在 0.01 dB 范围内波动，两端的消光比在 1 dB 范围内波动，这些微小波动可能由于测试周围空气的流动所导致，总体上初始时间段和末尾时间段基本无明显波动；当超过 1 h 以上在 2 h 范围内时，耦合输出两端功率值在 30 min 以内的变化值均在 $0.5 - 1 \mu\text{W}$ 以内，插入损耗在 0.02 dB 范围内波动，两端的消光比在 1 dB 范围内波动，并且初始时间段和末尾时间段基本也无明显波动，得出系统的耦合效率达到了 98% 以上。由此测试数据的变化值可以得

出，耦合系统在标准规定范围内的稳定性很高，测试参数指标不会出现明显波动。

4.3 本章小结

本章主要介绍了对设计完成集成光波导自动耦合系统性能指标的测试，包括光学指标测试和稳定性测试，光学测试指标测试包括模场分布的测试、插入损耗和消光比测试。在模场分布测试中，通过设计的测试系统，使用包层直径为 $80\text{ }\mu\text{m}$ 的保偏光纤和 1550 nm 红光光源以及红外 CCD 完成模场的测试，并对测试过程中出现的模场光斑不能聚焦成一个点的问题进行排除解决，成功测试出系统的模场分布图，得出 X 模场直径为 6.4030 mm 和 Y 模场直径为 6.8127 mm ，均符合规范标准；通过使用耦合系统对五组样品插入损耗和消光比的测试，得出最终测试的插入损耗数据稳定在 3.30 dB 左右，消光比达到 -33 dB 以上，均值在 36 dB 左右，达到了器件测试参数的标准指标，并高于同行业的测试指标。对系统的稳定性测试中，通过两组样品在 30 min 、 1 h 、 90 min 、 2 h 四个时间段对耦合系统测试，得出插入损耗和消光比的结果均在标定范围内，系统稳定性良好。

5 总结与展望

5.1 工作总结

本文通过对高性能集成光波导自动耦合系统硬件夹具的设计改造和算法优化升级,成功完整的搭建出了自动耦合系统并完成了系统的性能指标测试,并对测试参数指标进行了详细的研究分析,验证了设计与优化的自动耦合系统的可行性。

本文研究的主要内容包括:

(1) 集成光波导自动耦合系统的设计与搭建。硬件方面主要是在位于输出臂端设计使用新的优质碳素结构钢材料的三维调节光纤夹具以及三维调节的定焦镜头和调节机构,设计并引入四路成像分割器和双通道高速光功率计,同时也对光路系统设计、观察系统设计和机械系统设计进行了选配;软件方面主要在原有爬山算法的基础上引入融合了模式搜索算法,使爬山并行模式搜索算法直接以光学性能指标作为系统评价函数,有效弥补了传统单一算法时效性不足和数据采集紊乱的缺陷,同时也验证出了设计与优化自动耦合系统的可行性。

(2) 集成光波导自动耦合系统的性能指标。在设计与优化搭建完成的自动耦合系统上采用波导为 Y 型的光波导芯片和熊猫型的保偏光纤以及通光工作波长为 1310 nm 红光光源进行性能测试。为了防止实验测试结果的偶然性和随机性,共计设计进行五组样品实验,通过优化后的自动耦合系统测试出耦合样品的最低插入损耗和最优消光比,经过最后系统采集数据的分析,得出最低插入损耗数据稳定在 3.30 dB 左右和最优消光比达到-33 dB 以上,其均值在 36 dB 左右,系统测试结果达到了器件测试参数的标准指标,并优于同行业的测试指标;同样使用五组样品在 30 min、1 h、90 min、2 h 四个时间段对系统的稳定性进行了测试,耦合输出的功率值在测试时间段内浮动值均在 0.1 - 0.2 μW 以内,插入损耗浮动值在 0.01 dB 范围内,消光比浮动值在 1 dB 范围内,耦合效率达到了 98.74%,本系统测试的性能指标误差均在合理的范围内并符合行业生产标准,虽然存在一些不可控的因素所到来的数据干扰,但优化后的自动耦合系统完全达到了预期的最优设计结果。

5.2 未来展望

虽然目前设计完成的自动耦合系统有效的测试结果,但是在设计与制作中也存在一些问题。通过引入爬山并行模式算法将耦合系统测试最低插入损耗降到 3.30 dB 左右和使最优消光比可达到 36 dB 左右,在后续的研究中可以对其更优异的算法进行融入结合,以进一步降低系统耦合过程中的损耗以及提高耦合器件消光比的值;此外,系统的硬件设计方面,可以在今后的研究中引入新型耦合夹具的结构并加入新的耦合自动臂,通过更多的测试数据分析再加入一些可抗拒机械间干扰等微型集成器件,使得整体构成可以进一步有效提升系统的耦合效率和测试稳定性。

6 参考文献

- [1] 唐天同, 王兆宏等. 《集成光学》[M]. 科学出版社, 20045 (高等院校电子科学与技术专业系列教材), pp.3.
- [2] 叶培大, 吴彝尊, 光波导技术导论. 北京: 人民邮电出版社, 1981. 李翔. 光纤通信技术特点及未来发展趋势[J]. 中国新通信, 2012, 16 期: 25-26.
- [3] 林雨. 基于柔性基底的超材料结构与光电特性调控研究[D]. 中国科学技术大学, 2020.
- [4] 樊帅, 陈抱雪. 阵列波导光栅 (AWG) 与光纤列阵的自动化对接耦合技术研究[J]. 光学仪器, 2014 (6): 228-233.
- [5] 王红. 光无源器件技术发展综述. 光通信技术. 2001 年, 25(3): 193-195.
- [6] Meddeb H, GötzKöhler M, Flathmann C, et al. Novel semi-transparent solar cell based on ultrathin multiple Si/Ge quantum wells[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2022, 31(12): 1396-1408.
- [7] Alexander V, Andrey U, Sergey A, et al. Double-Clad Bismuth-Doped Fiber with a Rectangular Inner Cladding for Laser Application[J]. Photonics, 2022, 9(11): 788-788.
- [8] Christian K K, Wanuk C, Donghui J, et al. Synthesis and structure of the medium-pore zeolite PST-35 with two interconnected cages of unusual orthorhombic shape. [J]. Chemical science, 2022, 13(35): 10455-10460.
- [9] Valco J G, Kapoor J V, Biedenbender D M, et al. Plasma Deposited Silicon Nitride for Indium Phosphide Encapsulation[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2019, 136(1): 175-175.
- [10] 半导体材料[J]. 电子科技文摘, 2003, (04): 6.
- [11] 孔辉, 沈浩, 张忠伟等. 面向光电子器件的铌酸锂键合技术研究进展[J]. 压电与声光, 2023. 45(06): 926-934.
- [12] 梁友亭. 低损耗高性能片上铌酸锂光子器件[D]. 华东师范大学, 2023.
- [13] Sergey K, Alexey R, Mikhail K, et al. Hierarchical Multi-Scale Coupled Periodical Photonic and Plasmonic Nanopatterns Inscribed by Femtosecond Laser Pulses in Lithium Niobate[J]. Nanomaterials, 2022, 12(23): 4303-4303.
- [14] 王昌文. 薄膜铌酸锂波导中非线性频率转换及调控的研究[D]. 华东师范大学, 2023.
- [15] 周密秘. 光学微纳结构中低维半导体的光调制[D]. 贵州民族大学, 2022.
- [16] Vinnakota K R, Dong Z, Briggs F A, et al. Plasmonic electro-optic modulator based on degenerate semiconductor interfaces[J]. Nanophotonics, 2020, 9(5): 1105-1113.

- [17]Le Q K . ITO-based electro-optical modulator integrated in silicon-on-insulator waveguide using surface plasmon interference[J]. *Physica B: Physics of Condensed Matter*, 2020, 602(prepublish): 412313-.
- [18]Physics , Findings from Skolkovo Institute for Science and Technology Broaden Understanding of Physics (Edge-plasmon assisted electro-optical modulator)[J]. *Electronics Newsweekly*, 2019.
- [19]Luan J, Fan M, Zheng P, et al. Design and Optimization of a Graphene Modulator Based on Hybrid Plasmonic Waveguide with Double Low-Index Slots[J]. *Plasmonics*, 2019, 14(1): 133-138.
- [20]Haffner C, Chelladurai D, Fedoryshyn Y et al . Low-Loss Plasmon-Assisted Electro-Optic Modulator, *NATURE*, 2018, 556 (7702): 483~486.
- [21]Gordon E I , A Review of Acoustooptical Deflection and Modulation Devices[J]. *APPL OPTICS*, 1966.
- [22]Weis, R S, Gaylord, T.K. Lithium niobate: Summary of physical properties and crystal structure[J]. *Appl. Phys. A*. 1985, 37, 191–203.
- [23]赵砚驰, 程建华, 赵琳. 惯性导航系统陀螺仪的发展现状与未来展望[J]. *导航与控制*, 2020, 19(Z1): 189-196.
- [24]蒋宏彬, 刘广智. 光纤陀螺的应用与发展[J]. *计算机光盘软件与应用*, 2012, (05): 76+48.
- [25]Gorecki C, Chollet F, Bonnotte E et al. Silicon-Based Integrated Interferometer with Phase Modulation Driven by Surface Acoustic Waves[J]. *OPT LETT*, 1997, 22 (23).
- [26]Liu X, Xiong B, Sun C et al. Wideband Thin-Film Lithium Niobate Modulator with Low Half-Wave-Voltage Length Product[J]. 2021.
- [27]V Y S, A I L, A G S et al. Rearrangement of Ferroelectric Domain Structure Induced by Chemical Etching[J]. *APPL PHYS LETT*, 2005, 87 (2).
- [28]H H, R R, W S, Low-Loss Ridge Waveguides On Lithium Niobate Fabricated by Local Diffusion Doping with Titanium[J]. *Applied Physics B*, 2010, 98 (4).
- [29]Zhang K, Chen Z, Feng H et al. High-Q Lithium Niobate Microring Resonators Using Lift-Off Metallic Masks[J]. 2021.
- [30]李翔. 光纤通信技术特点及未来发展趋势[J]. *中国新通信*, 2012, 16 期: 25-26.
- [31]Yamada E. Takara H. Ohara T. et al. 150 channel super continuum CW optical source with high SNR and precise 25 GHz spacing for 10 Gbit/s DWDM systems[J]. *IEEE Electronics Letters*. 2001, 37(5): 304-306.
- [32]K Takada. M Abe. T Shibata M Ishii. et al. 10 GHz-spaced 1010-channel AWG

- filter achieved by tandem connection of primary and secondary AWGs[J]. Conf. Optical Communication (ECOC). Munich, 2000: PD3-8.
- [33] Yoneyama M. Miyamoto Y. Otsuji T. et al. Fully electrical 40-Gb/s TDM system prototype based on In P HEMT digital IC technologies[J]. Lightwave Technology. 2000, 8(1): 34-43.
- [34] Vali V, Shorthill R W. Fiber ring interferometer[J]. Applied Optics, 1976, 15(6): 1 099-1 100.
- [35] LEFÈVRE H C. The fiber-optic gyroscope, a century after Sagnac's experiment: the ultimate rotation-sensing technology[J]. Comptes Rendus Physique, 2014, 15(10): 851–858.
- [36] C. Wang, M. Zhang, B. Stern, et al. Nanophotonic lithium niobate electro-optic modulators[J]. Optics Express, 2018, 26(2): 1547-1555.
- [37] Saruwateri. Beranek M W. Carlisle B R. et al. Fiber-optic pigtail assembly and attachment alignment shift using a low-cost robotic platform[J]. Proc Electronic Components and Technology Conference. Las Vegas, 1979:21-25.
- [38] Rensselaer Polytechnic Institute. Jeongsik Sin. et al. Reconfigurable micro-assembly system for photonics applications[J]. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1994: 1495-1500.
- [39] 丁桂兰, 陈才和, 陈本智等. 光纤—波导精密对准仪的设计与精度分析[J]. 天津大学学报, 1994, 27(5): 589-594.
- [40] Murakawa M. Noda Y. Higuchi T. An automatic fiber alignment system using genetic algorithms. Systems & Computers in Japan[J]. 1998, 35(11): 80-90.
- [41] Z Tang. R Zhang F G Shi. Effects of angular misalignments in fiber-optic alignment automation. Optics Communications[J]. 2002, 196(1-6): 173-180.
- [42] K Okamoto. Theory of Optical Waveguides[M]. Tokyo: Corona Publishing Co, Ltd, 2004.
- [43] 隋国荣. 光波导器件对接耦合的自动化技术研究[D]. 上海: 上海理工大学. 2008.
- [44] 张文修, 梁怡. 遗传算法数学基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
- [45] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [46] 李敏强, 寇纪淞, 林丹等. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [47] 段启宏. 演化算法的收敛理论与策略[M]. 西安: 西安交通大学, 2000.
- [48] 云庆夏. 进化算法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [49] 沙慧军, 陈抱雪. 基于遗传算法的光波导-光纤自动调芯系统的研究[J]. 仪器仪表学报, 2005 (11): 26-11.

- [50]隋国荣, 陈抱雪. 应用多目标演化算法的波导-光纤自动耦合系统[J]. 仪器仪表学报, 2008 (6): 1209-1214.
- [51]Rush Derek A. Swadling Roger D. Optical displacement transducers[M]. US Patent, Patent number: 4388613, 2020.
- [52]徐思聪, 周雯, 余建军. 少模光纤强耦合通信系统中的关键器件综述[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(23): 72-85.
- [53]Uk D K, Jae Y P, Yun D K, et al. Programmable photonic arrays based on microelectromechanical elements with femtowatt-level standby power consumption[J]. Nature Photonics, 2023, 17(12): 1089-1096.
- [54]白国财, 郑国康, 黄韬等. Y 波导调制波形对光纤陀螺零偏稳定性的影响研究[J]. 023: 4.
- [55]刘雪锋. 直接耦合技术在高精度光纤陀螺上的应用[J]. 现代信息科技, 2022, 6(01): 63-65.
- [56]熊霄, 曹启韬, 肖云峰. 铌酸锂集成光子器件的发展与机遇[J]. 物理学报, 2023, 72(23): 61-66.
- [57]刘欢. 平面光波导器件自动耦合系统[D]. 武汉邮电科学研究院, 2016.
- [58]董彬, 张娟, 王达伟等. 飞秒激光加工微纳光学器件[J]. 光电工程, 2023, 50(03): 79-105.
- [59]Magdalena B, Szymon R, Jerzy M. Vector-Field Visualization of the Total Reflection of the EM Wave by an SRR Structure at the Magnetic Resonance[J]. Energies, 2021, 15(1): 111-111.
- [60]谷东旭. 波导器件与光纤端面耦合问题研究[D]. 华中科技大学, 2011.
- [61]Iftekharyl M H A F, Pretom S, Galib M H, et al. Design of a Terahertz Regime-Based Surface Plasmon Hybrid Photonic Crystal Fiber Edible Oil Biosensor[J]. Plasmonics, 2023, 18(5): 1923-1932.
- [62]Hongying L, Fu L W. Three-Dimensional Compacted Optical Waveguide Mode Converter/Splitter Designed by Invariant Engineering[J]. IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, 2021, 57(5).
- [63]赵莉. 基于不同构型的微纳光纤耦合器传感特性研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2020.
- [64]P. L. Liu, S. L. Yang and D. M. Yuan. The semivectorial beam propagation method[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics[J]. April 1993, vol. 29, no. 4, pp. 1205-1211.
- [65]Wong K K. Integrated optical waveguides and devices fabricated by proton exchange: a review[C]. Proc of SPIE. 1988, 993: 13-25.
- [66]Song W, Chang L, Houyun Q, et al. Improved light coupling efficiency of organic

- light-emitting diode and polymer optical waveguide integrated device by grating coupler[J]. *Optoelectronics Letters*, 2021, 17(10): 598-603.
- [67]段敬民等. 基于退火算法的物流配送网的求优研究[J]. *中国工程科学*, 2012 (7): 25-28.
- [68]Li S, Wei M, Feng X, et al. Polarization-insensitive tunable terahertz polarization rotator[J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): 16966-16974.
- [69]Vakarin V, Ye W N, Ramírez J M, et al. Ultra-wideband Ge-rich silicon germanium mid-infrared polarization rotator with mode hybridization flattening[J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 9838-9847.
- [70]李让. 离子束制备金属纳米颗粒对介电材料光学特性的调控及应用[D]. 山东大学, 2020.
- [71]Siliang T, Jinming Y, Hangyu S, et al. Modeling and simulation of erbium-ytterbium co-doped optical waveguide amplifiers with dual-wavelength pumping at 980 nm and 1480 nm[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2023, 56(34).
- [72]V. H, Ashok N. Mid-IR supercontinuum generation using a slab with D-shaped/semi-ellipse core waveguide at 4um[J]. *Optical Materials*, 2024, 147114668.
- [73]Sipan Y, Jinbin X, Yaqian L, et al. Highly-efficient thin film LiNbO₃ surface couplers connected by ridge-waveguide subwavelength gratings[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2021, 32(17): 21932-21943.
- [74]Kuldeep C, Santosh K. Optimized plasmonic reversible logic gate for low loss communication[J]. *Applied optics*, 2021, 60(16): 4567-4572.
- [75]Melati D, Morichetti F, Melloni A. A unified approach for radiative losses and backscattering in optical waveguides[J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(5): 055502-055502.
- [76]Panagiotis P, Tassos B, Charalampos S. Existence and Stability of Localized Oscillations in 1-Dimensional Lattices With Soft-Spring and Hard-Spring Potentials[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2004, 126(4): 520-527.
- [77]陈德沅, 张会新, 刘文怡等. 一种双模通讯的外系统等效器设计[J]. *现代电子技术*, 2016, 39(11): 74-78.
- [78]田勇勇. 工业通信平台的设计[D]. 西安石油大学, 2023.
- [79]Kun W, Wenhao L, Yitao L, et al. Electron Oscillation-Induced Splitting Electroluminescence from Nano-Leds for Device-Level Encryption[J]. *Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)*, 2023, 36(3): e2306065-e2306065.
- [80]A. A A, Muzaffar M H, A, R S, et al. Enhancing Security in the Internet of Things: A Trust-Based Protocol for Resilient Communication[J]. *SN Computer*

Science, 2023, 5(1).

- [81]Zhengang Z, Fasong C, Sifei W, et al. Study on optical coupling characteristics of a high-radial-tolerance thick-lens beam expanding fiber collimator[J]. Infrared Physics and Technology, 2023, 133.

7 攻读硕士学位期间发表论文情况

- [1] 平面光波导自动耦合测试分析系统[M]. 中国国家版权局: 2023SR0029940, 2022-07-05
- [2] 波导耦合数字模型解析系统[M]. 中国国家版权局: 2023SR0032315, 2023-05-25
- [3] SCI审稿中: Acousto-optic modulator with FEDUT electrode structure.[J]. Applied Physics B,2024
- [4] SCI审稿中: Analysis and Study of DC Phase Drift and Half-wave Voltage in LN Electro-optic Modulators[J]. Applied Physics B,2024
- [5] 项目名称: 波导调制器芯片光纤自动耦合技术的研发
- [6] 项目名称: 低半波电压铌酸锂电光相位调制器的研发

8 致谢

行文至此，落笔为终。三年的研究生生涯也到此画上了圆满的句号，此时也意味着作为学生的生涯就此结束。回望整个学生生涯，虽非皆为坦途，但学途中所遇之人，皆是良师益友，如烟火，满眼繁华，目之所及，皆是回忆。

花开花落万物道，聚散别离终有时。首先感谢我的导师张维佳，张老师从论文的选题到撰写这期间少不了他对我的指导和帮助，同时在这三年期间，张老师在日常生活在中也对我们如同自己孩子一般，给予了我们无微不至的关怀和鼓励，我也时刻铭记张老师那一丝不苟的工作状态和积极自律的生活态度，终将让我受益终生。愿恩师万事顺遂，桃李芬芳。

三人行必有我师。我也要感谢同师门下的饶前程师兄和谷珍杰师姐，在我学习中迷茫困惑的时候，他们总是耐心真诚的为我解惑开导我，并引导我积极向上的学习热情和乐观豁达的生活态度，和师兄师姐相处的时光将是我研究生生涯当中一道靓丽的风景线，同时也要感谢师妹张文轩、李佳琦和师弟果梦然在我学习中为我带来的一切帮助和快乐，惟愿师兄师姐余生所行皆坦途，师弟师妹们学业一切顺利，未来可期。

春晖寸草，山高海深。我要感谢女朋友，这三年异地恋对我的不离不弃和在我困惑难过时对我的安慰和鼓励。我也要感谢我的家人们，是他们教会我为人处事的道理、教我善待这个世界，让我懂得了要学会去感恩。从小到大，他们总是无条件尊重并支持我的任何决定，从不给我施加压力，尽他们所能给我最好的生活，做我最坚强的后盾才使我能肆无忌惮的追求自己的理想。养育之恩，无以为报，我会继续努力成为他们的骄傲，希望我的家人们永远平安健康。

道阻且长，行则将至。最后感谢不曾放弃的自己，无数个奋笔疾书的日夜，无数个含泪坚持的时刻，无数个自我治愈的瞬间，都是成长的印记。心若有之向往，何惧道阻且长，希望自己能继续保持热忱，坚定前行。

回头看，轻舟已过万重山。风有起止，人有聚散，认真生活，不负遇见。想告诉自己人生是旷野，希望我能永远勇敢、真诚坦然，做不受拘束的风，永远自由。

那就毕业快乐，未来可期！