



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

片上铌酸锂光子器件的制备和表征

作者姓名: 张健皓

指导教师: 程 亚 研究员

中国科学院上海光学精密机械研究所

学位类别: 理学博士

学科专业: 光 学

培养单位: 中国科学院上海光学精密机械研究所

2021 年 6 月

Fabrication and characterization of on-chip lithium niobate
photonic devices

A dissertation submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Philosophy
in Optics

By

Zhang Jianhao

Supervisor: Professor Cheng Ya

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences

June 2021

中国科学院上海光学精密机械研究所

博士学位论文

论文题目 片上铌酸锂光子器件的制备和表征

专 业 光 学

研究生姓名 张健皓

导师姓名 程 亚 研究员

研究生入学时间 2016 年 9 月

2021 年 6 月 1 日

中国科学院大学
研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位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。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名：



日 期：

2021.05.31

中国科学院大学
学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：



导师签名：



日 期： 2021.05.31

日 期： 2021.05.31

摘要

物联网、5G、人工智能等新一代信息技术已经逐步走进我们的生活，日新月异的新技术背后需要极其庞大的算力和数据传输速率支持，这对现有的通信行业提出了新的挑战，即我们需要尺寸更小、集成度更高、损耗更低、调谐效率更高的通信和计算芯片。

铌酸锂晶体作为一种传统的非线性光学材料，兼具较宽的透明窗口（0.4~5.5 μm ）、较大的非线性系数（ $d_{33} = -41.7 \pm 7.8 \text{ pm/V}$ ）和电光系数、极低的吸收损耗（ $\sim 0.17\% \text{ cm}^{-1}$ @1.32 μm ）、双折射效应等多种特质，因此是下一代片上光学光子芯片的重要备选材料。

近年来，利用离子注入剥离技术所制备的商用铌酸锂单晶薄膜逐渐被用于构建片上铌酸锂微纳光子器件。相比传统硅基片上的光子器件，铌酸锂片上光子器件在保留的硅基器件的高集成度的优良特性的同时，极大增强了其电光调谐效率并且降低了光传输损耗。其已经被验证可有效制备各种光子学元件如微腔、波导、定向耦合器、分束器等。已经实现低阈值激射、光频梳、量子光源、光机械等前沿应用，有望构建更加复杂的光子学回路集成芯片，具备更加广阔的应用前景。

目前，片上铌酸锂光子器件的制备方法主要以电子束曝光、紫外光刻结合反应离子束干法腐蚀为代表的平面光刻技术和以飞秒激光直写结合化学机械抛光的飞秒激光微加工技术两种。前一种技术工艺成熟，具有并行加工的特点，易于实现大规模生产，但是制备工艺相对复杂，需要对薄膜样品做前期的匀胶、曝光复刻等工序，所使用的掩模板造价昂贵，研发周期较长，对仍处于原型制备阶段的片上铌酸锂光子器件及相关研究而言缺少灵活性。而飞秒激光光刻结合化学机械抛光的微纳光子器件制备技术是本文的主要工作，利用飞秒激光直写技术灵活的加工特性和化学机械抛光超高光滑度的表面处理能力，可灵活高效快速的实现高品质铌酸锂微腔及其他微纳光子器件的制备。

本论文的工作创新性的将飞秒激光光刻技术与化学机械抛光技术相结合，开展了高品质的片上铌酸锂微纳光子器件的制备技术研发，并且表征了所制备光子器件的性能。主要包括：

- 1、利用飞秒激光刻蚀结合化学机械抛光，实现了超高的品质因子的铌酸锂微光学微盘谐振微腔的制备，所制备铌酸锂光学谐振腔的品质因子在世界范围内首次超过一千万，达到 1.47×10^7 。后通过优化化学机械抛光工艺在通信波段将其品质因子提升至 4.7×10^7 ，并且实现了微盘边缘的楔角从 9° 至 51° 连续可调。
- 2、通过结合飞秒激光刻蚀结合化学机械抛光技术，成功制备了高折射率对比度的模场大小为 $0.9\mu\text{m}$ 的片上铌酸锂单模波导。通过设计制备完美分光的马赫曾德干涉仪表征了其损耗为 $0.130 \pm 0.008 \text{ dB/cm}$ 。
- 3、通过结合飞秒激光刻蚀、聚焦离子刻蚀和化学机械抛光等技术，成功制备了氮化硅波导与铌酸锂微环谐振腔的片上高集成度的上下耦合耦合结构，并且通过精确控制耦合距离（ $\sim 10\text{nm}$ ）实现了耦合状态调控。

关键词：铌酸锂，回音壁模式微腔，飞秒光刻，化学机械抛光，单模波导

Abstract

A new generation of information technology such as IoT, 5G and artificial intelligence have gradually come into our lives. The ever-changing new technologies require enormous computing power and data transmission rate support, which poses new challenges to the existing communications industry, namely, we need smaller, more integrated, lower loss, and more efficient tuning of communications and computing chips.

As a kind of traditional nonlinear optical material, lithium niobate crystal, which has a wide transparent window (0.4 ~ 5.5 μ m), a large nonlinear coefficient ($D_{33} = 41.7 \pm 7.8$ pm/V), electro-optic coefficient, very low absorption loss ($\sim 0.17\%$ cm⁻¹@1.32 μ m), birefracton effect and other characteristics, is an important candidate material for the next generation of on-chip optical photonic chips.

In recent years, commercial lithium niobate single crystal films prepared by ion implantation stripping technology have been gradually used to construct on-chip lithium niobate micro-nano photonic devices. Compared with the photonic devices on traditional silicon substrates, the photonic devices on lithium niobate plates retain the excellent characteristics of high integration of silicon-based devices, and at the same time greatly enhance the electro-optic tuning efficiency and reduce the optical transmission loss. It has been proved to be effective in the fabrication of various photonic components such as microcavity, waveguide, directional coupler, beam splitter, etc. and has realized cutting-edge applications such as low threshold laser, optical frequency comb, quantum light source and optomachinery. Thus, the photonic devices on lithium niobate plates is expected to build more complex photonic circuit integrated chips and has a broader application prospect.

At present, the preparation methods of on-chip lithium niobate photonic devices are mainly planar lithography, which is represented by electron beam exposure and ultraviolet lithography combined with reactive ion beam dry etching, and femtosecond laser micromachining, which is combined with femtosecond laser direct writing and chemical mechanical polishing. The first technology is mature and has the characteristics of parallel processing, which is easy to realize mass production, but the preparation process is relatively complex. This method needs to do pre-phase

homogenizing and exposure reprinting of thin film samples and the development cycle is long. Therefore, it lacks flexibility for on-chip lithium niobate photonic devices which are still in the prototype preparation stage. Femtosecond laser lithography, by virtue of the flexible processing characteristics of femtosecond laser direct writing technology and the surface treatment ability of chemical-mechanical polishing with ultra-high smoothness, can flexibly, efficiently and quickly realize the fabrication of high-quality lithium niobate microcavity and other micro/nano photonic devices.

In this paper, femtosecond laser lithography and chemical-mechanical polishing technology are innovatively combined to develop the preparation technology of high-quality on-chip lithium niobate micro-nano photonic devices, and the performance of the prepared photonic devices is characterized. The main contents include:

1. Using femtosecond laser lithography combined with chemical mechanical polishing, the quality factor of lithium niobate optical resonator is over 10 million for the first time in the world, reaching 1.47×10^7 . After that, the quality factor was improved to 4.7×10^7 by optimizing the chemical-mechanical polishing process, and the wedge angle of the edge of the microdisk was continuously adjustable from 9° to 51° .
2. Femtosecond lithography combined femtosecond laser etching with chemical-mechanical polishing was used to fabricate on-chip LiNbO_3 single-mode waveguides with high refractive index contrast and mode field size of $0.9 \mu\text{m}$. A perfect Machzender interferometer was designed and fabricated to characterize the waveguide loss $\sim 0.130 \pm 0.008 \text{ dB/cm}$.
3. By combining femtosecond laser etching, focused ion etching and chemical mechanical polishing techniques, the on-chip coupling structure of Si_3N_4 waveguide and LiNbO_3 microring resonator was successfully fabricated with high integration, and the coupling state was controlled by precise control of the coupling distance ($\sim 10 \text{ nm}$).

Key Words: Lithium niobate, Whispering gallery mode microresonator, Femtosecond lithography, Chemical mechanical polishing, Single mode waveguide

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 铌酸锂片上光子器件概述	2
1.1.1 铌酸锂晶体	2
1.1.2 铌酸锂薄膜	5
1.1.3 基于铌酸锂薄膜的片上光子器件	7
1.2 飞秒激光微加工技术	11
1.2.1 飞秒激光直写技术原理与优势	11
1.2.2 飞秒激光制备片上光子器件的发展与挑战	15
1.3 化学机械抛光技术	16
1.3.1 化学机械抛光的动力学原理	16
1.3.2 化学机械抛光设备	18
1.3.3 影响化学机械抛光的因素	19
1.4 本文的研究目的与主要内容	21
第 2 章 超高品质因子铌酸锂微腔的制备	23
2.1 片上微纳谐振腔概述	23
2.1.1 介质微腔中的回音壁模式	23
2.1.2 微腔的表征参数	26
2.1.3 微腔模式的激励与耦合	29
2.1.4 微腔制备技术的发展历程	34
2.2 超高品质因子铌酸锂微腔的制备	38
2.2.1 飞秒光刻系统	38
2.2.2 化学机械抛光系统	40
2.2.3 铌酸锂片上微盘谐振腔的制备流程	41
2.3 超高品质因子铌酸锂微腔光学性能的表征	43
2.4 边缘楔角可调的铌酸锂微盘腔	49
2.5 本章小结	55
第 3 章 高折射率对比度的铌酸锂单模波导的制备	56
3.1 高折射率对比度铌酸锂波导的临界单模模拟	57

3.2 高折射率对比度铌酸锂波导的制备.....	59
3.3 铌酸锂多模干涉耦合器与锥形波导.....	61
3.4 基于完美分光的马赫曾德干涉仪和环形延时线的波导损耗测量.....	63
3.5 本章小结.....	66
第4章 氮化硅波导与铌酸锂微环腔的耦合	78
4.1 氮化硅在片上光子学领域的发展现状.....	78
4.2 铌酸锂微环谐振腔与氮化硅波导耦合结构的制备.....	81
4.3 垂直型倏逝波耦合结构的光学性能表征.....	83
4.4 不同耦合状态的调控.....	86
4.6 本章小结.....	89
第5章 总结和展望	91
5.1 全文总结.....	91
5.2 展望.....	92
参考文献.....	94
致 谢.....	106
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	108

图表目录

图 1.1 铌酸锂的晶体结构: (a)晶胞顺电相; (b)晶胞铁电相[2].....	2
Fig. 1.1 Crystal structure of lithium niobate : (a) cell cis-electric phase; (b) crystal cell ferroelectric phase[2].	2
图 1.2 铌酸锂单晶薄膜样品示意图 (蓝色为铌酸锂晶体, 黄色为二氧化硅)	6
Figure 1.2 Schematic illustration of LNOI (blue:LN, yellow:silica).	6
图 1.3 铌酸锂薄膜制备流程示意图[15].....	6
Figure 1.3 Schematic illustration of fabrication process of LNOI. [15].....	6
图 1.4 基于电子束曝光和结合反应离子刻蚀技术制备的铌酸锂波导[120].....	8
Figure 1.4 Lithium niobate waveguide based on electron beam exposure and combined reactive ion etching. [120]	8
图 1.5 基于光刻技术和聚焦离子刻蚀技术制备的铌酸锂微盘谐振腔[18].....	9
Figure 1.5 Lithium niobate microdisk resonators prepared by lithography and focused ion etching.....	9
图 1.6 铌酸锂微盘谐振腔中的多边形二阶非线性光场[19].....	9
Figure 1.6 Polygonal second order nonlinear optical field in a lithium niobate microdisk resonator. [19]	9
图 1.7 高调制速率的铌酸锂光电调制器[20].....	10
Figure 1.7 Nanophotonic LN modulators with high modulation rate. [20]	10
图 1.8 单光子吸收与多光子吸收机制[142].....	12
Figure 1.8 Mechanism of single photon absorption and multi-photon absorption. [142]	12
图 1.9 飞秒激光能量分布与多光子吸收能量分布[143].....	13
Figure 1.9 Actual beam profile (solid line) and spatial distributions of laser energy absorbed by transparent materials by two-photon (dashed line) absorption. The solid horizontal line indicates the reaction threshold. [143].....	13
图 1.10 飞秒激光与透明材料作用过程中各个物理现象的时间尺度[144].....	14
Figure 1.10 Timescale of the physical phenomena associated with the interaction of a femtosecond laser pulse with transparent materials.....	14
图 1.11 (a) 纳秒激光 (b) 皮秒激光 (c) 飞秒激光对铁表面进行打孔烧蚀的扫描电子显微镜照片[145].....	14
Figure 1.11 SEM photograph of a hole drilled in (a)nanosecond, (b)picosecond, and (c)femtosecond laser. [145].....	14
图 1.12 飞秒激光直写技术制备的片上光子器件[148-149].....	15
Figure 1.12 On-chip photonic devices fabricated by femtosecond laser micromachining. [148-149].....	15

图 1.13 化学机械抛光原理示意图.....	17
Figure 1.13 Schematic diagram of chemical mechanical polishing principle.	17
图 1.14 化学机械抛光设备结构示意图[31].....	18
Figure 1.14 Schematic diagram of the principle of chemical mechanical polishing General chemical mechanical polishing equipment structure diagram[31].....	18
图 2.1(a) (b)京天坛皇穹宇 (c) (d)伦敦圣保罗大教堂 (图片源自网络)	23
Figure 2.1 (a) (b)Whispering gallery structure in the Temple of Heaven in Beijing (c) (d) Whispering gallery structure in the St. Paul Cathedral in London.....	23
图 2.2 (a) 介质微腔中回音壁模式示意图 (b) 球坐标系中微球回音壁模式偏振 [37].....	24
Figure 2.2 (a) Schematic of whispering gallery mode (WGM) in dielectric sphere in ray optics (b) Polarization of WGM in a sphere in the spherical coordinate frame. [37]..	24
图 2.3 微球腔回音壁模式电场分布的解析解与数值解。微球腔旋转对称轴为竖直 方向, 黑色虚线为微腔边界。第一行为基模回音壁模式 $q=1, p=0$; 第二行模式数 为 $q=2, p=2$ 。右边插图为模式横截面的归一化电场振幅[3]	25
Figure 2.3 Field distribution of whispering gallery modes found analytically and numerically. The resonator rotation axis is vertical, and the dashed line indicates the resonator boundary. The top row represents the fundamental equatorial WGM with $q =$ $1, p = 0$. In the bottom row, $q = 2, p = 2$. The right-hand panel shows the field cross section along the lines shown on the left-hand panel. [3].....	25
图 2.4 (a) 棱镜耦合 (b) 光纤头耦合 (c) 波导耦合 (d) 光纤锥耦合	30
Figure 2.4 Sphere coupled with (a) prism, (b) angle-polished fiber, (c) waveguide and (d) fiber taper.....	30
图 2.5 铌酸锂波导与铌酸锂微环腔的耦合[43].....	31
Figure 2.5 Coupling of lithium niobate waveguide to lithium niobate microring cavity. [43].....	31
图 2.6 (a) 微腔的耦合模型 (b) 耦合效率与谐振频率失谐量的关系 (c) 耦合 效率 K_{res} 、负载 Q 值与本征 Q 值的比值 Q/Q_0 与系数 r 的关系[43].....	32
Figure 2.6 (a) Schematic of microresonator coupled with a waveguide. (b) Coupling efficiency K as a function of frequency detuning $\delta\nu$ for $\nu_0 = 3$ MHz and $r = 2$ with the maximum K_{res} at resonance and the linewidth $\Delta\nu$. (c) Coupling efficiency K_{res} and ratio Q/Q_0 between total and intrinsic quality factor as a function of r . [43]	32
图 2.6 不同方式制备的回音壁模式微腔[86-90].....	34
Figure 2.6 WGM microresonator fabricated by various methods. [86-90]	34
图 2.7 基于耦合微泡腔结构的自参考光流生物探测器 (a) 耦合微泡腔光学显微 镜图, (b) 两个利用电弧加热方法吹制的微泡腔在赤道处耦合形成自参考光流生 物探测器, (c) 耦合微泡腔与单个微泡腔探测热稳定性对比[96-98].....	35
Figure 2.7 Self-referencing optofluidic ring resonator (SR-OFRR) sensor for highly sensitive biomolecular detection (a) picture of an SR-OFRR sensor (b) Schematic of an SR-OFRR biosensor fabricated by the fuse-and-blow technique, and the two OFRRs	

were placed in contact with each other at their equators. (c) Thermal stability test results of the SR-OFRR (black squares) and a single OFRR (blue circles). [96-98].....	35
图 2.8 (a)光刻工艺制备二氧化硅微腔的步骤示意图, (b)环芯腔扫描电镜图 [100-102].....	35
Figure 2.8 (a)Schematic fabrication of silica microtoroid resonator by lithography. (b) SEM image of the microtoroid. [100-102]	35
图 2.9 飞秒激光直写技术在石英玻璃中制备三维回音壁模式光学微腔.....	36
Figure 2.9Three dimensional WGM microresoantors fabricated in silica glass using femtosecond laser direct writing.	36
图 2.10 三种铌酸锂晶体薄膜微腔制备工艺[114-116].....	37
Figure 2.10 Methods for fabrication of LN microdisk.	37
图 2.11 飞秒激光直写设备示意图.....	38
Figure 2.11 Schematic setup of a femtosecond laser micromachining system.	38
图 2.12 (a)飞秒激光器(b)三维微纳加工平台	39
Figure 2.12 (a) The femtosecond laser system (b) 3D micromachining stage.	39
图 2.13 化学机械抛光设备(a) 化学机械抛机 (b) 化学机械抛光过程示意图	40
Figure 2.13 (a) Chemical mechanical polishing equipment (b) Diagram of chemical mechanical polishing process.	40
图 2.14 飞秒光刻结合化学机械抛光的制备制备铌酸锂微腔的工艺的流程图中.....	41
Figure 2.14 Illustration of fabrication flow.....	41
图 2.15 飞秒激光直写聚焦扫描轨迹.....	42
Figure 2.15 Scanning trajectory of the focused femtosecond laser.	42
图 2.16 铌酸锂单盘微腔的显微镜照片.....	43
Figure 216 Micrograph of single disk microcavity of lithium niobate.....	43
图 2.17 微腔透射谱的测试装置图.....	44
Figure 2.17 Experimental setup for characterization of the whispering gallery mode (WGM) distribution of the microresonator.	44
图 2.18 光纤锥的制备 (a) 热拉法制光纤锥的主要装置: 线性平移台与氢氧焰喷嘴 (b) 光纤透过率监测谱线 (c) 光纤锥与微腔样品耦合平台.....	45
Figure 2.10 Fabrication of optical fiber taper (a) Main setup for fabricating fiber taper by heat-pull method: Linear moving stage and oxyhydrogen flame nozzle (b) Transmission of the fiber during the pulling step (c) Stage for fiber taper coupling...45	45
图 2.19 铌酸锂微盘谐振腔的投射谱与平直因子.....	45
Figure. 2.19 (a) Transmission spectrum and (b) Q factor	45
图 2.20 铌酸锂微盘谐振腔的扫描电镜照片(a) 制备铌酸锂微盘谐振腔的俯视图 SEM 图像。(b) (a)中红色框所示区域的高放大倍率的 SEM 图像。(c) 制备铌酸锂微盘谐振腔的侧视图 SEM 图像	46

Figure 2.20 Scanning electron microscope image of lithium niobate microdisk resonator (a) Top view SEM image of a fabricated LN MDR. (b) Close up view SEM image of the area indicated by the red box in (a). (c) Side view SEM image of the fabricated LN MDR.46

图 2.21 探测微谐振腔中非线性光学过程的实验装置.....47

Figure 2.21 Experimental setup of nonlinear optical processes in the microresonator.47

图 2.22 微腔的倍频与拉曼信号 (a) 波长为 775nm 附近的光谱, (b) 倍频转换效率与泵浦功率的关系 (c) 拉曼峰 S1 功率与倍频光功率的关系 (d) 拉曼峰 S1 功率与倍频光功率的关系.....48

Figure 2.22 (a) Spectrum around wavelength of 775 nm (b) SHG conversion efficiency as a function of pump power (c) Power of Raman S1 as a function of SHG power and (d) Power of Raman S2 as a function of SHG Power.48

图 2.23 (a) 制作的 LN 微盘谐振器的俯视图扫描电子显微镜(SEM)图像。(b) 近距离观察(a)中红色框所示区域的 SEM 图像。(c) 铌酸锂微盘腔边缘的原子力显微镜(AFM)图像。(d) 不同直径(55 μm 、85 μm 、105 μm 、135 μm 、155 μm 、185 μm 、205 μm)微盘谐振器的光学显微镜图像.....50

Figure 2.23 (a) Top view scanning electron microscope(SEM) image of a fabricated LN microdisk resonator. (b) Close up view SEM image of the area indicated by the red box in (a). (c) atomic force microscope(AFM) image of microdisk wedge. (d) optical microscope image of microdisk resonator with different diameters (55 μm , 85 μm , 105 μm , 135 μm , 155 μm , 185 μm , 205 μm).50

图 2.24 (a) 不同直径的铌酸锂微盘腔的品质因子(b) 在直径为 105 μm 的微盘腔中对劈裂模式的洛伦兹拟合.....51

Figure 2.24 (a) Measured Q factors of the microdisks of different diameters. (b) The Lorentz fitting (red curve) of a splitting mode in the microdisk of a diameter of 105 μm51

表 2.1. 不同尺寸的铌酸锂微盘腔的品质因子.....51

Table 2.1 Q factors of microdisks of different diameters.51

图 2.25 铌酸锂微盘谐振腔的模场分布模拟。微盘结构的侧视图(a)和俯视图(b)。直径为(c) 50 μm , (d) 100 μm , (e) 200 μm 的微盘谐振器的基模。直径为(f) 50 μm , (g) 100 μm , (h) 200 μm 的微盘谐振器的二阶模52

Figure 2.25 Side view (a) and top view (b) of structure of simulated microdisk resonator. Fundamental modes in microdisk resonator of a diameter of (c) 50 μm , (d) 100 μm , (e) 200 μm . Second-order modes in microdisk resonator of a diameter of (f) 50 μm , (g) 100 μm , (h) 200 μm52

图 2.26 (a)-(f) 9°, 14°, 22°, 30°, 40° 以及 51° 边缘楔角的铌酸锂微盘腔的扫描电镜侧视图 (g) 不同边缘楔角的微盘腔的品质因子.....53

Figure 2.26 (a)-(f) Side view scanning electron microscope(SEM) image of fabricated LN microdisks with different wedge angles of 9°, 14°, 22°, 30°, 40° and 51°, respectively. (g) Q factors of microdisks of the different wedge angles.53

图 2.27 抛光时间超过 90 分钟的铌酸锂微盘谐振腔的扫描电子显微镜的侧视图

.....	54
Figure 2.27 Side view scanning electron microscope (SEM) image of a fabricated LN microdisk resonator with a long polish duration of 90 mins.	54
图 3.1 基于 PLACE 技术制备的五氧化二钽覆盖下的铌酸锂单模波导	56
Figure 3.1 Lithium niobate single mode waveguide covered by tantalum pentoxide based on PLACE technique.	56
图 3.2 截面为梯形的铌酸锂单模波导的临界条件模拟	57
Figure 3.2 Critical condition simulation of a single mode lithium niobate waveguide with trapezoidal cross section.	57
图 3.3 截面为矩形的铌酸锂单模波导的临界条件模拟	58
Figure 3.3 Critical condition simulation of a rectangular lithium niobate single mode waveguide.	58
图 3.4 截面为复合构型的铌酸锂单模波导的临界条件模拟	58
Figure 3.4 Critical condition simulation of a lithium niobate single mode waveguide with a composite configuration.	58
图 3.5 高折射率铌酸锂单模波导的制备流程图 (a) 铌酸锂薄膜的构型 (b) 金属铬膜的生长 (c) 飞秒直写形成铬掩膜图案 (d) 化学机械抛光将铬掩膜图案转移到铌酸锂薄膜层上 (e) 化学腐蚀去除铬同时进行二次抛光 (f) 二氧化硅层的沉积	59
Figure 3.5 Process flow of fabricating high-index-contrast single mode lithium niobate waveguides. (a) Configuration of LNOI wafer. (b) Deposition of Cr layer on top of the LN thin film. (c) Femtosecond laser micromachining of Cr film to form the stripe pattern. (d) Transferring the mask pattern from the Cr to LN by chemo-mechanical etching. (e) Removal of Cr followed by a secondary CMP. (f) Coating the LN waveguides with the SiO ₂ cladding layer.	59
图 3.6 (a) 制备的 LN 波导的俯视图扫描电镜(SEM)图像(b) LN 波导的横截面扫描电镜图像 (c) LN 波导中 1550 nm 处的红外光模场 (d) LN 波导中 TE 模式的模拟电场	60
Figure 3.6 (a) Top view scanning electron microscope (SEM) image of a fabricated LN waveguide (b) cross-sectional view SEM image of LN waveguide. (c) Infrared light mode field at 1550 nm in the LN waveguide. (d) Simulated TE electric field in the LN waveguide.	60
图 3.7(a)多模干涉(MMI)耦合器的俯视图扫描电子显微镜(SEM)图像(b)模拟 MMI 耦合器中的 TE 电场	62
Figure 3.7(a) Top view scanning electron microscope (SEM) image of a multi-mode interference (MMI) coupler. (b) Simulated TE electric field in the MMI coupler.	62
图 3.8 (a) 所制备的波导锥度(红虚线框)和其模场分布的红外 CCD 照片(下行)(b) 波导锥度俯视图 SEM 图像	63
Figure 3.8 (a) Micrographs (upper row) of the fabricated waveguide taper (red dashed box) and mode profiles (lower row) at the different positions indicated by the r. (b) Top view SEM image of waveguide tapers.	63

图 3.9 通过测量微环品质因子的方法表征对应构型的波导损耗.....	64
Figure 3.9 The waveguide loss was characterized by measuring the microring quality factor.	64
图 3.10 产生理想五五分光的级联马赫曾德干涉仪示意图.....	64
Figure3.10 MZI block configurations with the ideal 50 : 50 split.	64
图 3. 11 (a)测量波导传播损耗的器件原理图 (插图为器件相对于一元硬币的照片) (b)测量损耗器件的的显微镜照片 (c)线圈形延迟线 B 的显微镜照片.....	65
Figure 3.11 (a) Schematic diagram of the device for measuring the waveguide propagation loss. (b) Micrograph of the device. (c) Micrograph of the coil-shaped delay lines B.	65
图 3.12 (a)归一化下 L 口出射功率随施加电压的关系 (b)对数坐标下的消光比	66
Figure3.12(a) Normalized transmission spectra of output Ports L as a function of applied voltage V, featuring sinusoidal-like curve. (b) Extinction ratio in logarithmic terms.	66
图 4.1 发表的 Si_3N_4 , SOI 和 InP 波导的弯曲半径、传播损耗和透明窗口[151]... ..	79
Figure 4.1 Bend radii, propagation loss, and window of transparency for published Si_3N_4 , SOI, and InP waveguides. [151]	79
图 4.2 三种氮化硅波导类型截面构型图和 SEM 照片 (a)单层约束型 (b)多层约束型 (c)完全约束型波导[152]	80
Figure 4.2 Si_3N_4 waveguide types, cross sections and SEM photographs: (a) single stripe; (b) multilayer structures comprising both double stripe (DS) and asymmetric double stripe (asymmetric double-stripe, ADS and box shapes); and (c) buried waveguides. [152].....	80
图 4.3 基于磷化铟与氮化硅的混合外腔激光器 (a)主要组件:基于磷化铟的增益放大器连接到氮化硅的可调谐腔镜 (b)装置的实物照片[153]	81
Figure 4.3 An InP- Si_3N_4 hybrid external cavity laser[84]. (a) Principle components: InP-based gain section (SOA) connected to tunable mirror in Si_3N_4 platform. (b) Assembled device as seen in[153].	81
图 4.4 氮化硅波导与铌酸锂微环谐振腔在垂直方向上的耦合偶结构的制备流程图 (l) 所制备结构的 3D 结构示意图.....	83
Figure 4.4 (a~k) Process flow of fabricating a lithium niobate (LN) microring resonator coupling with a silicon nitride (Si_3N_4) waveguide in the vertical configuration. (l) 3D diagram of the coupling structure.	83
图 4.5 氮化硅波导与铌酸锂微环谐振腔耦合结构的扫描电镜图(a)氮化硅波导与铌酸锂微环谐振腔在垂直方向上的耦合偶结构的扫描电子显微镜俯视图像 (b)图 2(a)中蓝虚线框位置结构的截面的 SEM 图像 (c) 图(a)中黄色虚线框位置结构的剖视图 SEM 图像	84
Figure 4.5 Scanning electron microscope image of the coupling structure of silicon nitride waveguide and lithium niobate microring resonator (a) Top view SEM image of LN microring resonator and Si_3N_4 waveguide. (b) Sectional view SEM image of the	

structure at the location of the blue dashed box in Fig. 2(a). (c) Sectional view SEM image of the structure at the location of the yellow dashed box in Fig. 2(a).....84

图 4.6(a)制备的 LN 微环谐振器的俯视图 SEM 图像。(b)在 SiO₂ 包层中制备的沟槽的俯视图 SEM 图像。(c)和(d)分别是(a)中微环表面和(b)中沟槽表面的 AFM 图像.....85

Figure 4.6. (a) Top view SEM image of the fabricated LN microring resonator. (b) Top view SEM image of the trench fabricated in the SiO₂ cladding layer. (c) and (d) AFM images of the surfaces of the microring in (a) and the trench in (b) respectively.85

图 4.7 结构透射谱的测试装置示意图。插图光纤透镜与波导耦合的光学显微照片。85

Figure 4.7 Schematic of experimental testing setup. Inset: optical micrograph of the fiber lens coupling with the Si₃N₄ waveguide.85

图 4.8 (a) 铌酸锂微环谐振腔的透射谱。(b)对图 4(a)中红色虚线处的劈裂模式进行洛伦兹拟合, 品质因子分别为 1.49×10^7 (红色实线)和 1.09×10^7 (绿色实线)。86

Figure 4.8. (a) Transmission spectrum of the LN microring resonator. (b) The Lorentz fitting of the splitting modes at the location of the red dotted box in Fig.4(a) reveals a Q-factor of 1.49×10^7 (red solid line) and 1.09×10^7 (green solid line), respectively. .86

图 4.9 分别为 1100 nm (a)、600 nm (b)和 100 nm (c)时耦合结构的扫描电镜剖面图。(d)、(e)和(f)分别为(a)、(b)和(c)中结构模式的洛伦兹拟合。87

Figure 4.9 Sectional view SEM images of the coupling structures when the thickness of the SiO₂ cladding layer are 1100 nm (a), 600 nm (b), and 100 nm (c), respectively. The Lorentz fitting of the modes of the structures in (a), (b), and (c) are illustrated in (d), (e), and (f), respectively.....87

图 4.10 优化后的飞秒光直写结合化学机械抛光制备氮化硅波导与铌酸锂微环谐振腔的耦合结构的工艺流程图.....89

Figure 4.10 The process flow chart of the optimized femtosecond optical direct writing combined with chemical mechanical polishing to fabricate the coupling structure of Si₃N₄ waveguide and LiNbO₃ microring resonator89

第1章 绪论

二十世纪末，伴随着原子能技术、低损耗光纤、计算机技术和互联网技术的出现，人类进入第三次工业革命，其重要特征就是人类的生活开始出现高度的数字化。时至今日，物联网（Internet of things, IOT）、5G 以及人工智（Artificial intelligence, AI）能等技术正在彻底改变我们的生活。这些新时代的信息技术都依赖于超高数据的传输带宽、超低的芯片驱动功率、超低的信息传递损耗以及与互补金属氧化物半导体工艺（Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS）相兼容。但是就目前的技术而言，硅基的芯片在面对上述的种种需求已然碰到瓶颈，在面对近年激增的互联网数据处理需求上，硅基电子芯片的运算速度被电子弛豫时间所限，同时受限于隧穿效应和加工难度的双重影响，硅基电子芯片的集成度被限制在 2nm 的单个晶体管尺度。在可见的未来，硅基的电子芯片的制备工艺很难再有新的突破，这与人们持续增长的对信息的传输和处理运算能力的需求相矛盾。所以如何高效的低成本的解决这一难题，是目前学界的研究热点。

在面对上述难题光子芯片有其独特的优势，光子的弛豫时间短、传播速度快、可控的自由度多（偏振复用、波分复用等）且没有电磁串扰，这些特殊的优势让光子芯片更有可能下一代信息技术变革的核心器件。1969 年贝尔实验室的 Miller 先生最早提出了集成光学（Integrated Optics）的概念。集成光学元件相比于传统的离散的形体的光学元件，克服了其尺寸大、稳定性差以及能耗较高等诸多缺点的同时，也存在着制备工艺更加困难、光子操控难度更大等挑战。

近年来，随着商用铌酸锂薄膜的出现，由于其极低光学损耗、光电功能丰富、广场限制能力较强等优秀特性，人们相信基于铌酸锂的光子学芯片将在光通信、大数据中心、光量子计算、量子通信、人工智能等各个领域彰显出巨大的应用价值。哈佛大学在 2017 年发布了题为“Now entering, lithium niobate valley”（人类正在进入铌酸锂谷的时代）的公告，公告指出：“铌酸锂对于光子学的意义，等同于硅对于电子学的意义”，“铌酸锂有望在光子学领域替代硅材料，为突破通信领域功耗大、速度慢的瓶颈性问题提供解决方案”。本文将重点以基于铌酸锂薄膜的片上光子器件的制备与表征展开。

1.1 铌酸锂片上光子器件概述

1.1.1 铌酸锂晶体

自然界中并不存在天然的铌酸锂单晶 (Lithium niobate, LiNbO_3 , LN), 1965 年贝尔实验室的 Ballman 等人首先提拉生长法, 在实验室中长出了铌酸锂单晶, 自此之后铌酸锂作为一种新型的光学材料便保守关注。铌酸锂无色 (或略带黄绿色) 无味, 密度为 $4.65 \times 10^3 \text{Kg/m}^3$, 莫氏硬度为 5, 居里温度大约是 1140°C , 熔点为 $1260 \pm 5^\circ\text{C}$ 。铌酸锂单晶属于 $3m$ 晶系, 是由氧八面体构成, 晶格常数 $a=0.5147 \text{nm}$, $c=1.3856 \text{nm}$, 如图 1.1 所示, 晶胞的空隙部分分为三等分, 分别由空位、锂原子以及铌原子构成。当晶体温度低于 1140°C 时, 在晶胞中由于弹力的作用, 锂原子和铌原子相对于氧八面体的位置发生偏移, 这个过程中产生的电荷分离现象导致晶体产生自发极化, 形成铁电畴, 有统一的畴方向, 此时我们称之为铁电相。当温度晶体温度高于 1140°C 时, 晶体中的锂原子以及铌原子不会发生位置的偏移, 晶体中的正负电荷中心重合, 所以不会产生自发极化, 此时我们称之为顺电相。在居里温度之下 (低于 1140°C), 铌酸锂晶体的自发极化方向可以沿晶胞中心向上或晶胞中心向下两个方向, 当我们在铌酸锂晶体上加入外加电场时, 可以使得晶体的畴结构实现反转 (domain inversion) [1]。

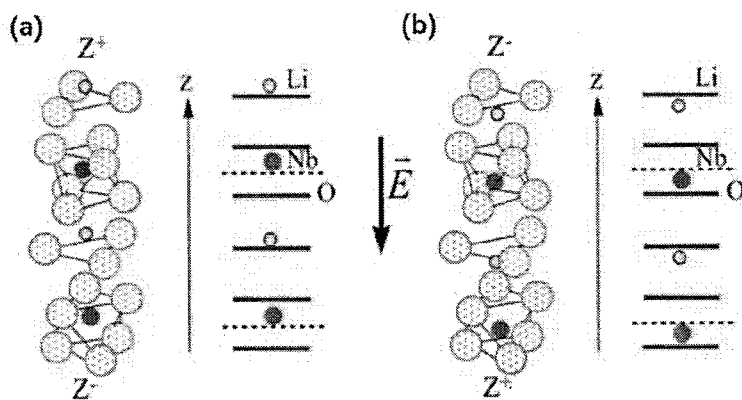


图 1.1 铌酸锂的晶体结构: (a)晶胞顺电相; (b)晶胞铁电相[2]

Fig. 1.1 Crystal structure of lithium niobate : (a) cell cis-electric phase; (b) crystal cell ferroelectric phase.[2]

铌酸锂晶体的透光范围约在 350 纳米到 5500 纳米之间, 无论是在可见光波段或是近红外波段的透过率都很高, 这就可以弥补硅基材料可见光波段不透光的劣势。铌酸锂晶体是典型的双折射晶体, 当波长为 1550 纳米时, 寻常光折射率

为 $n_o=2.2112$ ，非寻常光的折射率为 $n_e=2.1376$ ；当波长为 632.8 纳米时，寻常光折射率为 $n_o=2.2864$ ，非寻常光的折射率为 $n_e=2.2024$ 。较高的折射率可以使得铌酸锂在各种光学器件的应用中适配不同的覆盖层材料。此外铌酸锂晶体的机械性能稳定、耐高温、极耐腐蚀（常温下几乎不和强酸强碱反应）、易于生长且价格低廉。除此之外，铌酸锂晶体还有非常丰富光学特性，包括电光效应、声光效应、光弹效应、压电效应、逆压电效应、热光效应以及光折变效应等等。下面我们着重讨论铌酸锂晶体的热光效应和线性电光效应。

1. 热电效应 (Thermo-optic effect)

铌酸锂是典型的热电固体，即铌酸锂晶体的自发极化强度会伴随着温度的变化而改变，居里温度之下，可以近似的将自发极化强度的该变量 ΔP 与晶体温度的该变量 ΔT 的关系看作线性的，即写成 $\Delta P = \eta \Delta T$ ，这里的 η 称之为热电张量，在铌酸锂中，自发极化是由锂原子和铌原子相对于氧原子层的位置偏移而引起的，而锂原子和铌原子的运动受晶胞对称性的限制，只能沿 c 轴方向运动，故铌酸锂的热电张量可以写成：

$$\eta = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \eta_3 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

式中 $\eta_3 = -4 \times 10^{-5} \text{C}/(\text{K} \cdot \text{m}^2)$ 这里 η_3 为负值，表面铌酸锂晶体会随着温度降低自发极化强度会增强。利用这个特性，2016 林强等研究人员制备出了温度敏感的片上铌酸锂微盘谐振腔用于温度传感[3]。

2. 线性电光效应 (Linear electro-optical effect)

线性电光效应又称泡克尔斯效应 (Pockels effect)，即晶体的折射率随外加电场呈线性变化的现象。与克尔电光效应 (Kerr effect) 不同，线性电光效应的折射率该变量与外加电场是一阶数值的关系，可表示为：

$$\Delta \left(\frac{1}{n^2} \right)_{ij} = \sum r_{ijk} E_k \quad (1.2)$$

式中 E_k 是外加电场强度， r_{ijk} 是电光系数，对于铌酸锂而言其电光系数的张量形式可以表示为

$$r_{ijk} = \begin{bmatrix} 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{42} & 0 \\ r_{42} & 0 & 0 \\ r_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

式中, $r_{13}=9.6 \times 10^{-12}$ m/V, $r_{22}=6.8 \times 10^{-12}$ m/V, $r_{33}=30.9 \times 10^{-12}$ m/V, $r_{42}=32.6 \times 10^{-12}$ m/V。由此可以计算铌酸锂在电场下的线性电光效应引起的折射率变化 $n_o(E)$ 、 $n_e(E)$ 。

对单轴晶体而言,在主轴坐标系中,在没有外加电场时,有 $n_1=n_2=n_o$, $n_3=n_e$ 。有:

$$\eta_{ij}^{(0)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{n_o^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{n_o^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{n_e^2} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

为了利用铌酸锂晶体中较大的电光系数 r_{33} , 我们假设电场方向沿着光轴方向, 则此时电场可表示为 $\mathbf{E}=(0,0,E)$, 由式 (1.4) (忽略二阶及以上电光效应), 并带入下标约化规则, 有

$$\eta_{ij} = \eta_{ij}^{(0)} + \sum_{ij} r_{ij} E_j \quad (1.5)$$

$$\eta_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{1}{n_o^2} + r_{13}E & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{n_o^2} + r_{13}E & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{n_e^2} + r_{33}E \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

将上式 (1.6) 带入折射率椭球方程, 有:

$$\eta_{11}x^2 + \eta_{22}y^2 + \eta_{33}z^2 = \left(\frac{1}{n_o^2} + r_{13}E\right)(x^2 + y^2) + \left(\frac{1}{n_e^2} + r_{33}E\right)z^2 = 1 \quad (1.7)$$

由 (1.7) 式可知, 当电场方向与光轴方向同向时, 折射率椭球的轴方向没有发生变化, 新的非寻常光折射率与寻常光折射率分别为 (利用了少量近似):

$$n_o(E) \approx n_o - \frac{1}{2}r_{13}n_o^3E \quad (1.8)$$

$$n_e(E) \approx n_e - \frac{1}{2}r_{33}n_e^3E \quad (1.9)$$

铌酸锂具备优秀的线性电光效应对其成为下一代光子芯片的备选材料至关重要, 线性电光效应可以让我们得以利用电信号去控制光的相位偏振以及强度, 实现电光互联。综上铌酸锂晶体拥有诸多优异的的光学性能, 对热、声、电、光均存在响应, 可实现不同物理体系的耦合和转换, 这使得铌酸锂享有“光学硅”的美誉。

1.1.2 铌酸锂薄膜

相对于电子芯片, 光子芯片有弛豫时间短、工作带宽大、可控的自由度多 (偏振复用、波分复用等) 且没有电磁串扰等独特优势。在过去的十年间, 硅基光子学得到了极大的发展, 这是得益于绝缘体上的单晶硅片 (Silicon on insulator, SOI) 制备工艺[4]的发展与成熟。这种技术使得表面的硅薄膜与下层的二氧化硅层之间存在较大的折射率差, 较大的折射率差使得硅基的光波导的模场面积可以小于 600 纳米, 转弯半径可以小于 10 微米[5], 这极大的提升的片上光子元器件的集成度, 使得商用的小型化的硅基光子器件成为可能[6-9]。相对于硅, 铌酸锂有着低损耗、宽通光窗口、高的电光响应等优势, 但是在商用的铌酸锂薄膜 (Lithium niobate on insulator, LNOI) 出现之前, 人们只能在铌酸锂体块中用离子扩散的办法制备折射率差较小的扩散波导[10], 较小的折射率差使得波导模场横截面积较大、转弯半径较大 (通常大于 500 微米), 这严重限制了基于铌酸锂的光子器件的小型化、集成化的发展。

为了得到高质量的铌酸锂薄膜, 研究人员们尝试各种办法, 如化学气相沉积 [11] (Chemical vapor deposition, CVD)、磁控溅射 (Magnetron sputtering)、分子束外沿生长[12] (molecular beam epitaxy, MBE)、溶胶-凝胶法[13] (Sol-gel)、键合-抛光减薄[14] (Bonding-polish)、脉冲激光沉积法 (Pulsed laser deposition) 等多种薄膜制备技术。但是这些方法都难以获得厚度均匀质量稳定的铌酸锂单晶薄膜。直

至 1995 年, 发展出利用氦离子 (He^+) 或者氢离子 (H^+) 注入体块晶体后再剥离的晶体薄膜制备方法, 这种技术被称为离子注入-键合剥离技术或者离子切割技术 (Crystal ion slicing), 并且后来成功应用到铌酸锂薄膜的制备上[15]。

如图 1.2 所示, 铌酸锂薄膜由通常是由三层结构组成, 最上层是铌酸锂单晶薄膜, 厚度范围为 100-5000 nm, 按光轴方向可分为有 X 切或 Z 切, 中层为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 厚的二氧化硅层, 与铌酸锂薄膜层可形成 0.7 的折射率差。最下层为 0.5 mm 厚的铌酸锂或者硅衬底。

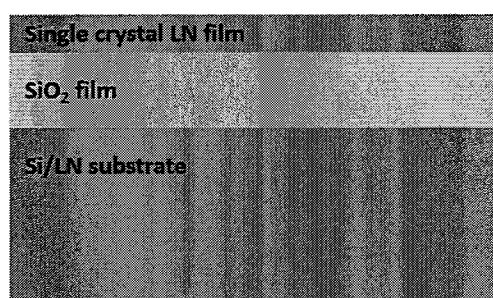


图 1.2 铌酸锂单晶薄膜样品示意图 (蓝色为铌酸锂晶体, 黄色为二氧化硅)

Figure 1.2 Schematic illustration of LNOI (blue:LN, yellow:silica).

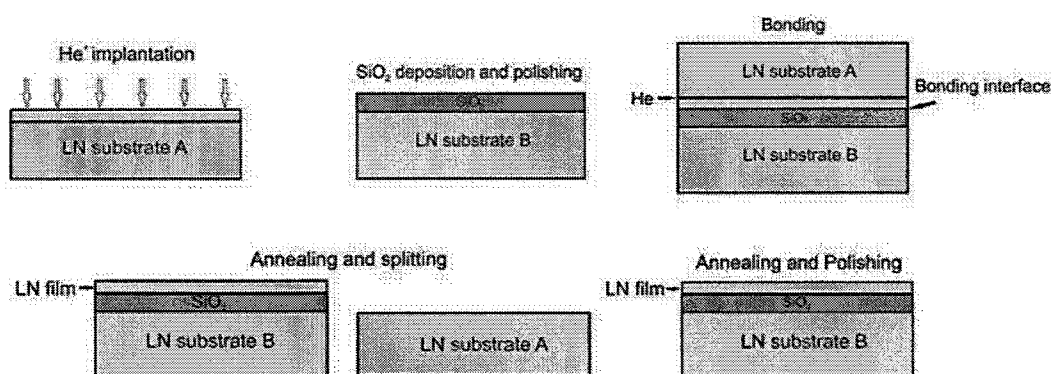


图 1.3 铌酸锂薄膜制备流程示意图[15]

Figure 1.3 Schematic illustration of fabrication process of LNOI. [15]

这种三层的铌酸锂薄膜结构已于 2010 年被国内的济南晶正科技公司 (NANOLN) 实现三英寸/四英寸铌酸锂晶圆的商业化生产。其使用的方法正是离子注入-键合剥离技术, 如图 1.3 所示, 制备这种铌酸锂单晶薄膜的工艺过程主要是: (1) 对铌酸锂晶体 A 进行一定深度的氦离子 (He^+) 注入; (2) 在另外一片铌酸锂晶体 B 表面利用化学气相沉积一层二氧化硅薄膜并进行抛光预处理以

保证键合步骤的顺利进行；(3) 将这 A、B 两片铌酸锂晶体键合在一起，加热后氢离子气化并且膨胀使得整个注入层断裂，脱落下来的铌酸锂薄膜就留在铌酸锂晶体 B 的二氧化硅层之上；(4) 对键合后的铌酸锂薄膜材料进行退火和抛光，至此铌酸锂薄膜层的粗糙度可以减小至 0.5nm。此工艺生产的铌酸锂单晶薄膜产品为单晶，完全保持了铌酸锂体材料优异的物理性质。本文在后续所讨论的所有铌酸锂薄膜光子器件的制备都是使用济南晶正科技公司的商用铌酸锂薄膜。下一节我们将讨论基于铌酸锂薄膜的片上光子器件的研究进展。

1.1.3 基于铌酸锂薄膜的片上光子器件

本小节我们将介绍目前在铌酸锂薄膜上已经制备出的各类片上光子微纳器件，包括波导波导结构、光电调制器，片上谐振结构等，将着重介绍这些器件的制备方法，参数性能以及它们的应用场景。

1. 片上波导类结构

类似于电子芯片中的导线层，光波导是光子芯片中连接不同功能模块的基础光学器件。对于片上光波而言，它的两个参数值得我们特别关注。一是光波导对光场的束缚能力。波导的束缚能力越强，对应的波导转弯半径就越小，相对的光子芯片的集成度就越高。而光波导对光场的束缚能力主要依赖于两个因素：1. 波导层与衬底和覆盖层材料折射率的差值；2. 光波导的横截面尺寸。波导层与衬底和覆盖层材料折射率的差值越大、光波导的横截面尺寸越小，光波导对光场的束缚能力就越强。二是波导的损耗，波导损耗是反应了光在波导中传输中能量流不断衰减的参数，单位常用 dB/cm。足够低的波导损耗对于降低芯片的整体功耗提升光子器件性能有着重要意义。波导损耗一般由散射损耗、辐射损耗、吸收损耗三部分共同决定。其中辐射损耗由光波导几何结构决定，吸收损耗由波导材料和包层材料决定，散射损耗由波导表面的光滑度清洁度决定。而我们在制备工艺研发中主要关注的是材料的散射损耗，即如何将光波导做的足够光滑。

铌酸锂片上光波导可分为脊型波导和扩散型波导两种类型。扩散型波导常见的有钛扩散 (Ti diffusion) 和质子交换 (Proton exchange) 两种制备方案[16]。钛扩散的制备方案需要将铌酸锂晶体置于高于一千摄氏度的高温中，将钛金属扩散进铌酸锂中，达到改变铌酸锂折射率形成波导的目的。这种方法显然不适用于铌酸

锂薄膜样品, 因为超过一千摄氏度的高温会破坏铌酸锂薄膜层于二氧化硅衬底层的键合[17]。所以制备过程中温度要求更低的质子交换 (低于 400°C) 的制备方案可能更适合于铌酸锂薄膜片上光波导的制备, 2009 年山东大学胡卉教授团队利用质子交换技术制备出了对 TE 模式损耗为 0.2dB/cm 的铌酸锂片上波导[119]。虽然这种方法可以制备低损耗的片上的铌酸锂波导, 但是由于其波导层和包层的折射率差过小导致波导的拐弯半径通常大于 1mm , 所以很难应用到对高集成度有较高需求的光子芯片上。此外这种技术只能支持铌酸锂薄膜的非寻常光 e 光传输, 所以通常只能支持一种偏振状态的光传输, 会限制其的应用。

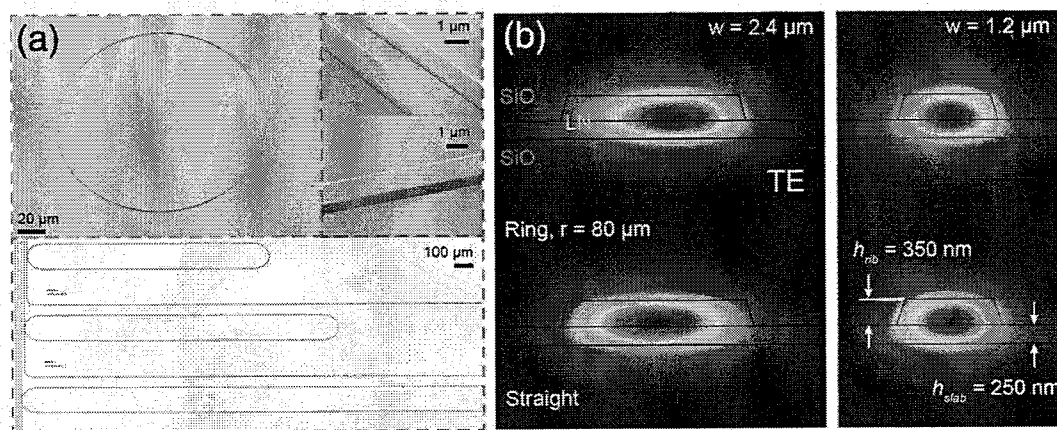


图 1.4 基于电子束曝光和结合反应离子刻蚀技术制备的铌酸锂波导[120]

Figure 1.4 Lithium niobate waveguide based on electron beam exposure and combined reactive ion etching. [120]

综上脊型波导对于铌酸锂薄膜而言，由于较强的广场约束能力，可能是更有应用潜力的波导构型。如图 1.4 所示，2017 年来自哈佛大学的 Marko Loncar 团队利用电子束曝光技术（Electron beam lithography, EBL）结合反应离子刻蚀技术（Reactive ion etching, RIE）制备出了 1550nm 波段本征损耗为 0.27dB/cm 的铌酸锂单模波导[120]。值得注意的是这里 Marko Loncar 团队并非直接测得波导损耗数据，而是利用微环谐振腔的品质因子（实载品质因子为 5×10^6 ）反推出拥有相同构型的波导损耗。

2. 片上谐振类结构

谐振类结构是光子芯片的重要组成部分，按照谐振结构可分为微盘谐振腔、法布里珀罗腔、微环谐振腔、跑道谐振腔、光子晶体微腔等等。这里我们重点介绍微盘谐振腔。微盘谐振腔也称回音壁模式微腔。其几何结构具有旋转对称性，

腔体与外界环境之间存在着较大折射率差异,因此微盘谐振腔可以有效地通过全内反射束缚光场,以使得光场在微腔内部获得局域的增强。这使得此类的微盘谐振腔成为研究需要局域超高场强的研究如非线性光学的理想载体,其理论分析将在第二章具体展开。

随着铌酸锂薄膜的成功市场化,越来越多的科研人员把目光投入了基于铌酸锂薄膜的片上微腔的研究中。2015 年南开大学的薄方教授团队利用光刻技术和聚焦离子刻蚀技术制备出了如图 1.5 所示的片上铌酸锂微盘谐振腔[18],其在谐振波长在 1.548nm 处品质因子高达 1.19×10^6 。

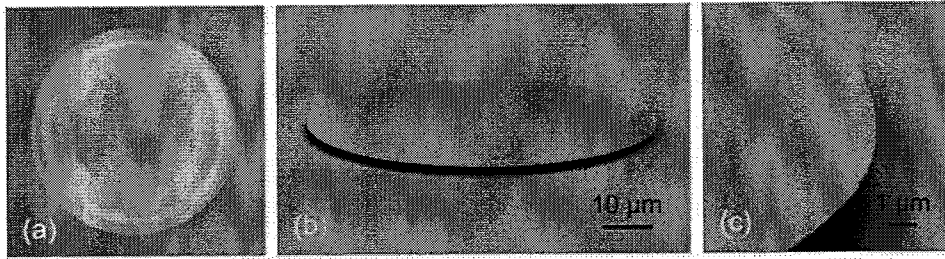


图 1.5 基于光刻技术和聚焦离子刻蚀技术制备的铌酸锂微盘谐振腔[18]

Figure 1.5 Lithium niobate microdisk resonators prepared by lithography and focused ion etching.

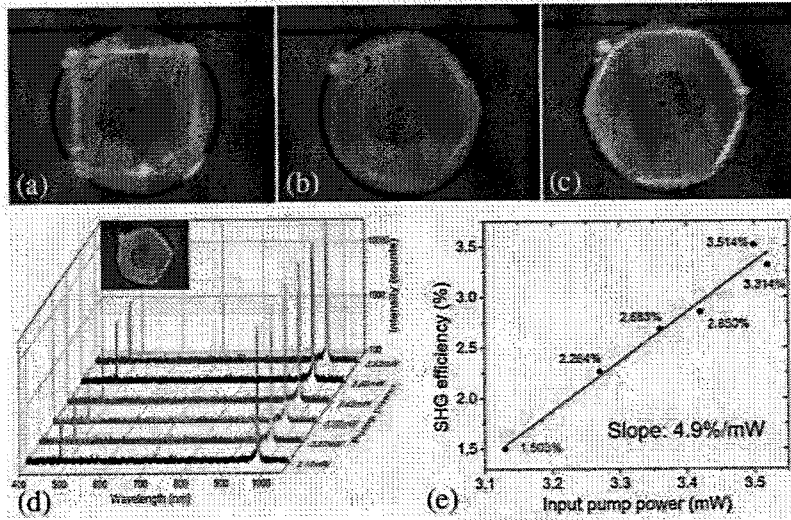


图 1.6 铌酸锂微盘谐振腔中的多边形二阶非线性光场[19]

Figure 1.6 Polygonal second order nonlinear optical field in a lithium niobate microdisk resonator. [19]

铌酸锂回音壁模式微腔由其较高的品质因子和较高的非线性系数,被广泛的应用于非线性光学研究中,并且以及产生了低阈值激射、光频梳、量子光源、

光机械等前沿应用。如图 1.6 所示是华东师范大学方致伟等研究人员在铌酸锂微盘谐振腔中发现的奇异的多边形模场的非线性光场信号[19]。

3. 光电调制器

如本章第一节中所介绍的，铌酸锂是一种典型的具备的线性光电效应（泡克斯效应）的铁电晶体。铌酸锂晶体的折射率随外加电场呈线性变化的现象。当所加电压与铌酸锂晶体的光轴方向一致时，可以利用到铌酸锂的光电张量中的最大系数 r_{33} ，此时拥有最大光电响应。一般而言片上光电调制器的核心元件是马赫曾德干涉仪（Mach Zehnder interferometer, MZI）。片上的马赫曾德干涉仪是由两条波导臂和定向耦合器（Directional coupler）或者多模干涉器（Multimode interferometer）构成。在马赫曾德干涉仪的两条波导臂上加上不同的电压，可以改变两条波导中的光程，而两条波导中的光场最终会在定向耦合器或者多模干涉器形成干涉输出。通过调控两条波导臂上的电压就可以实现对输出光场的高速调控。硅基的光子芯片无法兼顾调制速度与波导损耗，所以拥有较高电光系数的铌酸锂的光子芯片在光电调制器这项应用上有巨大优势。

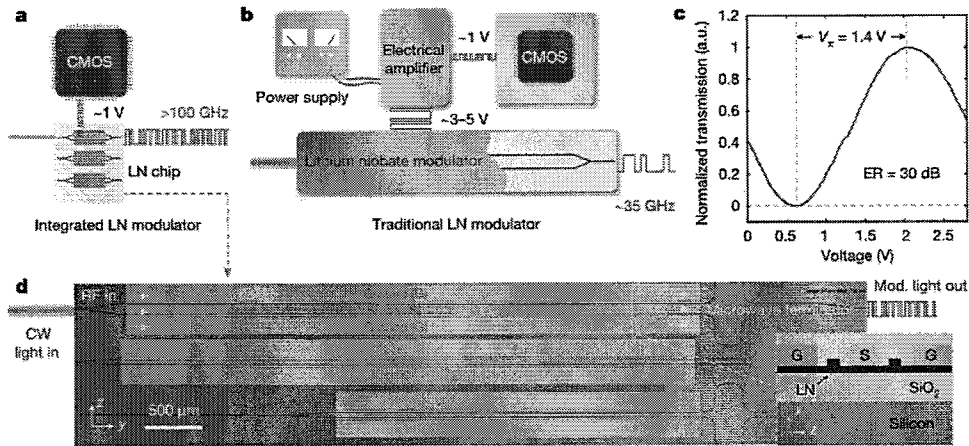


图 1.7 高调制速率的铌酸锂光电调制器[20]

Figure 1.7 Nanophotonic LN modulators with high modulation rate. [20]

哈佛大学的 Marko Loncar 团队利用电子束曝光结合反应离子刻蚀制备出了半波电压为 1.4V 最高调制速率可达 210GHz 的铌酸锂光电调制器芯片[20]，并且演示了使用 CMOS 兼容驱动电压驱动芯片完成光路调制，如图 1.7 所示。在该工作中哈佛的团队还实现了将光电调制器与铌酸锂微环谐振腔的集成，并成功演示了宽带光频梳的产生。

1.2 飞秒激光微加工技术

早在上个世纪八十年代末,飞秒激光技术就被应用于材料的表面处理,Küper、Stuke 和 Srinivasan 等人利用紫外波段的准分子激光刻蚀有机玻璃,在这些研究中他们发现被烧蚀区域边缘光滑、热影响区域较小[138, 139]。到九十年代中期,Hirao[140]和 Mazur[141] 小组率先使用高数值孔径的物镜聚焦的近红外飞秒超短脉冲激光实现了透明材料内部的改性,证明了利用超短脉冲激光可实现多种透明材料内部的折射率改变。至今,飞秒激光微加工技术已遍及表面处理、微流控、微光子学、微电子学等多个学科,所涉行业包括工业制造、生物医学、清洁能源、半导体、光子芯片等各个领域。

飞秒激光的微纳加工技术发展至今,按其加工效率和聚焦方式主要可分为两大类:飞秒激光直写技术和并行飞秒激光加工技术。其中并行飞秒光加工技术主要是利用透镜阵列、振镜、各种分光技术在待加工样品表面产生多个焦点的高效率的加工技术。而本文重点介绍的是飞秒激光直写技术,其具有更加优良的灵活性、分辨率和加工质量,尤其适合在透明介质材料三维微纳结构的微纳加工。

1.2.1 飞秒激光直写技术原理与优势

飞秒激光直写作为一种高效灵活的微加工技术,已经被广泛运用于金属、陶瓷、柔性材料以及脆性材料等各种材料的精密处理[21-24]。通常在加工时,需要利用透镜将飞秒激光聚焦到待加工材料的表面或内部,在焦点处,飞秒激光与物质强烈的相互作用,过程中包括传统激光技工技术不占主导作用的非线性吸收。相比于传统材料加工常用的连续激光或者宽脉冲激光如皮秒激光、纳秒激光等,飞秒激光加工因其独特的与物质相互作用的机制,在透明介质材料中具有明显优势。下面将从飞秒激光与物质相作用的物理机制探讨飞秒激光直写技术的优势。

1.2.1.1 多光子吸收

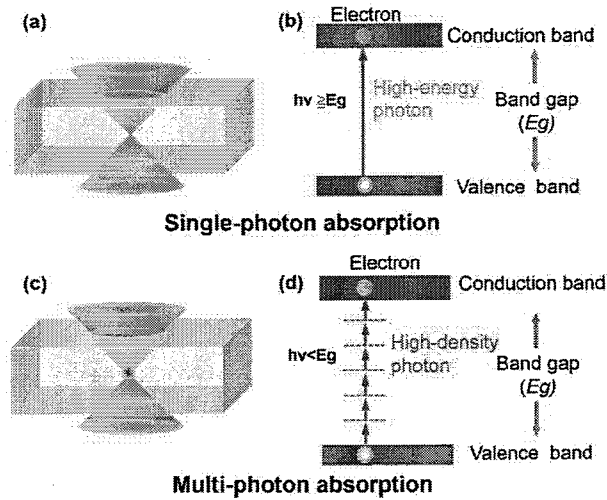


图 1.8 单光子吸收与多光子吸收机制[142]

Figure 1.8 Mechanism of single photon absorption and multi-photon absorption. [142]

飞秒的激光在单脉冲能量固定的情况下由于其极短的脉冲长度，具有极高的峰值功率的特点，借此特点可以基于多光子吸收实现对透明材料的加工[142]。首先，如图 1.8 (a) 所示，当一束连续激光经过聚焦入射到透明介质材料上时，只有当入射光子能量高于材料能带带隙时，激光才会与材料发生相互作用，对透明材料的加工才可能发生，这个过程叫做线性的单光子吸收。单光子吸收对光子能量由下限要求，即入射激光的频率必须高于特定频率，否则材料将不会吸收激光。然而一般的透明材料的带隙较大，往往要求光子频率达到了极紫外波段，这限制了多数连续激光在透明材料中的加工应用。然而，当入射激光是飞秒脉冲时，情况则会不同。同样是光子能量小于材料带隙能量，飞秒激光可以在材料内部的聚焦点处，由于其时域与空间域上极高的光场强度，可以达到材料的多光子吸收的阈值时，价带电子被激发到导带，如图 1.8 (b) 所示，如此飞秒激光利用其极高的峰值功率的特点便可以实现对透明材料的加工。此外，在飞秒激光的多光子吸收过程中，材料吸收的激光强度分布与原本激光强度分布关系和参与的光子数相关，如图 1.19 所示，一个典型的光场强度分布为高斯型分布的飞秒激光脉冲[143]。在发生单光子吸收时，其吸收能量的空间分布与光场强度的分布一致，如图中蓝色曲线所示；当发生多光子吸收时，吸收的能量的空间分布会随着参与光子数 n 的增加而减小，也即等效的光斑尺寸变小。聚焦光斑的实际光场强度分布尺寸 ω_0 与发生多光子吸收的有效尺寸 ω 的关系可以写为 $\omega = \omega_0 / \sqrt{n}$ 。利用这个特点，可

以实现突破衍射极限的加工分辨率。值得一提的是，这一物理机制在大多数透明材料中都能发生，使得该技术可以拓展至几乎所有的透明介质材料的微处理。

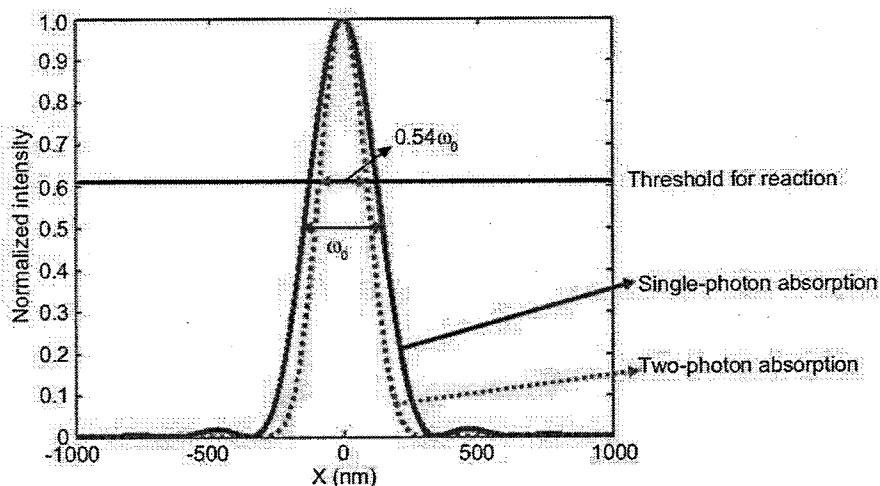


图 1.9 飞秒激光能量分布与多光子吸收能量分布[143]

Figure 1.9 Actual beam profile (solid line) and spatial distributions of laser energy absorbed by transparent materials by two-photon (dashed line) absorption. The solid horizontal line indicates the reaction threshold. [143]

1.2.1.2 材料改性

利用紧聚焦的飞秒激光所产生的强光场，可以在透明材料内部诱导多光子或隧穿电离，电离产生的种子电子与周围的原子进一步相互作用，诱发雪崩电离，焦点处附近会产生局域化的高温高密度等离子体，待高温等离子体快速淬冷并固化后，该区域的光学特性将发生改变，经过飞秒激光辐照的区域与本体材料的折射率吸收光谱等特性会不同。关于折射率变化的原因有许多理论和实验上的解释，一般认为它是新色心产生、热效应、材料稠密化、应力等多种效应综合作用的结果[145]。利用飞秒激光的材料折射率改性可以在透明介质材料内部中实现光波导等功能结构[144]。除此之外，飞秒激光辐照的区域的化学性质也会发生改变，尤其是耐腐蚀性质，辐照区的材料化学稳定性会变弱，在酸或碱中的腐蚀速率会明显快于未辐照区域[146, 147]，利用这一特性，可以在透明介质内部制备微流通道，实现各种功能的微流控芯片。

1.2.1.3 热效应抑制

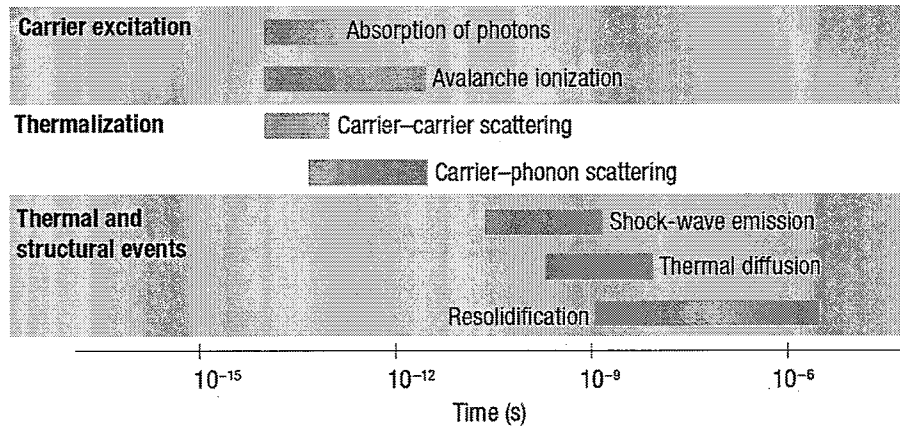


图 1.10 飞秒激光与透明材料作用过程中各个物理现象的时间尺度[144]

Figure 1.10 Timescale of the physical phenomena associated with the interaction of a femtosecond laser pulse with transparent materials.

图 1.20 为飞秒激光微加工过程中各种物理过程的时间尺度[144]，尽管材料与飞秒激光的相互作用在飞秒尺度，材料本身依然会经历微秒尺度的变化过程。当飞秒激光接近损伤阈值、且重复频率较低 (kHz~10 kHz 量级) 时，由于飞秒激光脉宽小于光与物质作用的电子声子耦合时间，大部分的激光能量都被电子吸收并快速传递到晶格，而不是通过声子振动导致的热扩散耗散掉，使得临近激光辐照的区域热效应达到最小。这一机制有利于提高飞秒激光的加工精度，尤其对于脆性材料的加工，显得尤为重要。

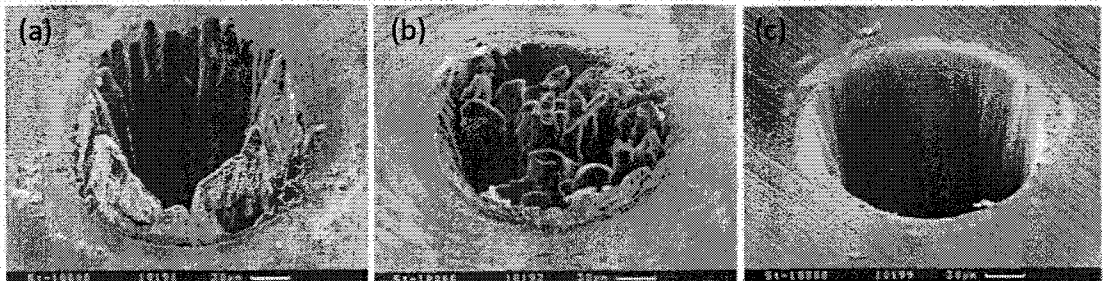


图 1.11 (a) 纳秒激光 (b) 皮秒激光 (c) 飞秒激光对铁表面进行打孔烧蚀的扫描电子显微镜照片[145]

Figure 1.11 SEM photograph of a hole drilled in (a)nanosecond, (b)picosecond, and (c)femtosecond laser. [145]

如图 1.11 所示，对比了纳秒、皮秒和飞秒激光在烧蚀微孔时的加工质量。图 1.1 (a)、(b) 是纳秒和皮秒激光打出来的微孔，其边缘的熔融现象比较严重。作为对照，图 1.1 (c) 所示的飞秒激光加工由于其热效应抑制作用，打出来的微孔

边缘就相对圆滑干净[145]。

1.2.2 飞秒激光制备片上光子器件的发展与挑战

飞秒激光加工由于上述的热抑制效应、超衍射极限的加工分辨率、可加工透明材料等种种优势，非常适合应用于片上的光子器件的加工。在结合后续的提高表面光滑度的处理技术之后，几乎可以加工任何透明材料，制备如回音壁模式微腔、低损耗波导、定向耦合器、多模干涉耦合器、微通道、微纳电极等等片上的多功能微纳结构。同时也能够便捷的实现微纳光子结构之间的耦合，例如微腔与微腔、微腔与波导、波导与波导之间耦合，这利于拓展片上光子器件的应用。

2012 年，我组的林锦添等人首次利用飞秒激光直写技术在石英玻璃中成功制备出了回音壁微环腔如图 1.12 (a) 所示，本课题组从此积极开展了基于微腔的功能化集成芯片研究，图 1.12 (d) 为与微流控混合器通道耦合的石英微腔，光纤锥被 CO₂ 激光有效焊接到了微腔上，实现了高度集成的折射率探测器，灵敏度可以达到 $1.2 \times 10^{-4}/\text{RIU}$ [148]。图 1.12 (e) 为飞秒激光同步制备的微加热器-微腔耦合芯片，可以实现石英微腔腔模的电控热光调制，调制效率为 $1.8\text{GHz}/\text{V}^2$ ，响应时间为 10s，优于传统热光调制的石英微腔[149]。这些前期工作为片上铌酸锂薄膜光子器件制备、调控和集成积累了宝贵的经验。

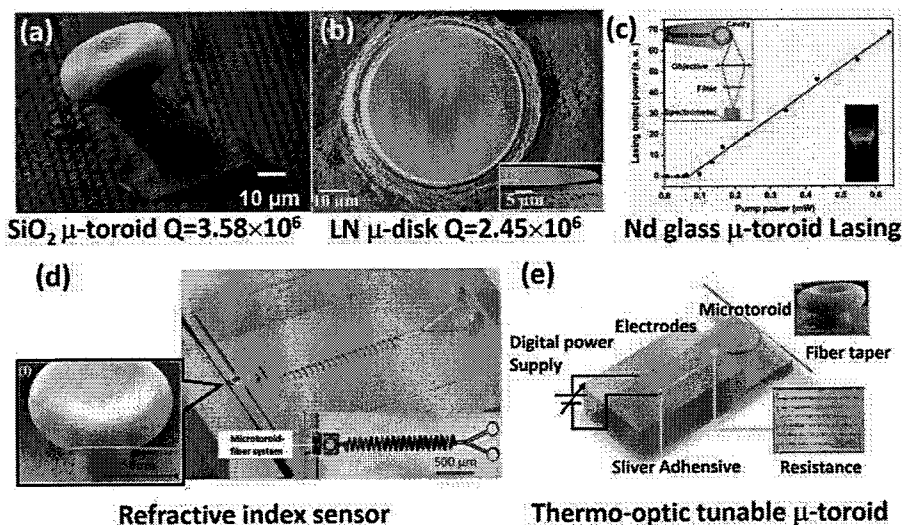


图 1.12 飞秒激光直写技术制备的片上光子器件[148-149]

Figure 1.12 On-chip photonic devices fabricated by femtosecond laser micromachining. [148-149]

飞秒激光直写技术与其他平面光刻微腔制备技术相比，最明显的优势就是工

艺灵活简单。由于不需要半导体工艺中复杂长时间的掩模板制备步骤，飞秒激光直写加工可以根据加工结果激光参数和所加工的图案。聚焦离子束的加工精细度也比反应离子束刻蚀要高，不足之处是其加工效率较低且成本高昂，难以实现大规模的并行加工，难以实现将光子器件的商业化。可以通过提高飞秒激光重复频率和直写速度的方式提升加工效率。相比之下，化学机械抛光加工效率很高，可以同时并行的加工多块晶圆，同时可以生产表面光滑度超高的样品。本文创新性的将化学机械抛光应用于铌酸锂片上光子器件的制备当中。目前来看，用飞秒激光直写结合化学机械抛光的方法制备的铌酸锂片上光子器件完全可以满足相关实验的需求，但工艺尚未成熟，仍有很大改进空间。针对用飞秒激光直写结合化学机械抛光的方法制备的铌酸锂片上光子器件的机遇与挑战，本文以发展飞秒激光直写结合化学机械抛光工艺为基础，开展了各种的片上光子器件制备实验，力求实现高集成度高表面光滑度低损耗的铌酸锂片上光子器件的制成，并探索其中丰富新奇的光学现象。

1.3 化学机械抛光技术

上个世纪九十年代中期，International Business Machines Corporation(IBM)公司首次提出化学机械抛光技术(Chemico-mechanical polishing,CMP)[26]。并于1988年将化学机械抛光技术首次应用到4M DAM的生产中，此后化学机械抛光技术就迅速发展成熟起来。于传统的机械抛光不同，化学机械抛光技术综合了化学反应过程与机械去除过程的综合作用，既避免了由单纯机械抛光造成的表面缺陷和损伤，又可以规避纯化学抛光造成的抛光去除速率慢、表面平整度较差等缺点。在一定抛光条件下，被抛光工件相对于抛光垫作相对运动，借助于研磨颗粒的研磨过程与抛光液提供的化学环境下的腐蚀过程的共同作用，使被抛光的工件的表面通过抛光得到超高的表面光滑度。在本文后续的章节中，将介绍我们创新性的将化学机械抛光应用到铌酸锂片上光子器件的制备工艺的工作。

1.3.1 化学机械抛光的动力学原理

化学机械抛光虽然已经为大规模集成电路制备工艺的必要环节之一且已经发展成熟，但是，目前我们对化学机械抛光中的具体动力学过程的了解依然不够清晰，这主要是被抛光工件与抛光垫、抛光液以及研磨颗粒之间的作用过程欠缺

完整严密的理论解释。下面我们从最基础 Preston 方程[25]入手, 给出化学机械抛光的动力学的基本框架, 这个模型可以解释在化学机械抛光中去除速率与抛光压力以及抛光线速度之间的关系。

$$R = K \times P \times V \quad (1.10)$$

式 (1.10) 就是经典的 Preston 方程, 其中, R 表示抛光的去除速率, P 表示被抛光工件收到指向抛光垫的压强, V 表示被抛光工件上任意点相对于抛光垫的线速度, K 是一个常量, 叫做 Preston 系数。

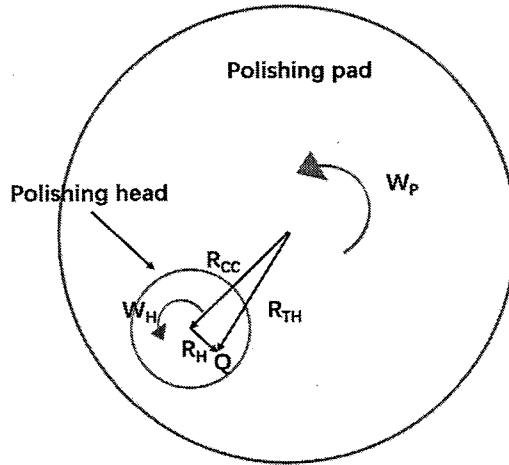


图 1.13 化学机械抛光原理示意图

Figure 1.13 Schematic diagram of chemical mechanical polishing principle.

如图 1.10 所示, R_{CC} 是抛光垫中心到抛光样品中心的直线距离。Q 记为抛光样品上任意一点, R_H 是抛光样品中心指向抛光样品上任意点 Q 的位置矢量。 R_{TH} 是抛光垫中心指向抛光样品上任意一点的位置矢量。 V_Q 是抛光样品上任意点的线速度, V_P 和 W_P 是抛光垫的线速度和角速度, V_H 和 W_H 抛光头的线速度和角速度。简单的几何关系有:

$$V_Q = V_P + V_H = -(W_P \times R_{TH}) + (W_H \times R_H) \quad (1.11)$$

将 $R_{TH} = R_{CC} + R_H$ 带入式 (1.11) 有

$$V_Q = - (W_P \times R_{CC}) + (W_H - W_P) \times R_H \quad (1.11)$$

可见当抛光垫转动的角速度与抛光头转动的角速度相同的时候, 即 $W_H = W_P$ 的时候抛光样品上任意一点的位置相对于抛光垫的速度都相同, 速度大小为 $W_P \times R_{CC}$, 根据 Preston 方程如果能控制加在抛光样品上任一点的压强相

同，那么可以实现抛光样品上任意一点的去除速率相同，即可以实现抛光样品的全域的均匀去除。

上述模型只是简单分析了化学机械抛光中的压力转速对样品抛光去除速率的影响，并未揭示研磨机制与化学反应机制。目前关于化学机械抛光的研究者提出的化学机械抛光机理还包括：基于流体力学的解释腐蚀研磨机理[28,29]、反应碰撞理论[30]等等。但是这些模型在解释化学机械抛光的本质动力学过程中都存在一定的局限性。

1.3.2 化学机械抛光设备

近些年来，半导体产业的需求量不断激增，使用于晶圆表面处理的化学机械抛光技术也得以飞速发展。化学机械抛光的设备市场从 1988 年至现在迅速扩大。目前精密化学机械抛光的设备的主要生产商有：日本的 Toshiba Machine 会社，其产品主要为 CMS-200 型单片式化学机械抛光机；英国的 Logitech 公司，其产品主要为 PM、DP 系列的大尺寸精密抛光设备；美国的 IPEC 公司，其产品主要为 IPEC472, 672 等设备。国内对化学机械抛光设备的研究起步较晚，高端精密抛光加工设备基本都从国外购入，这也在一定程度上制约了国内芯片相关产业的发展。

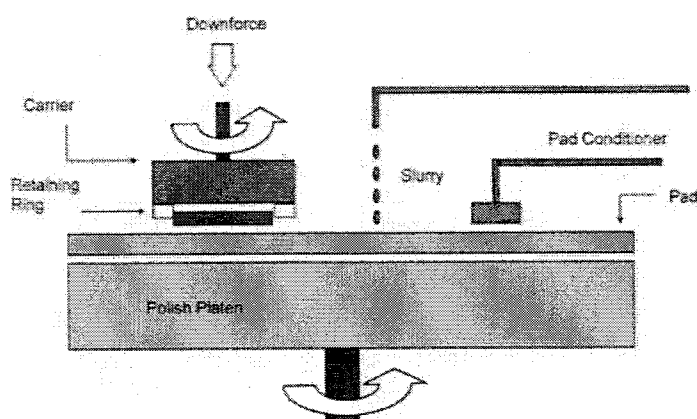


图 1.14 化学机械抛光设备结构示意图[31]

Figure 1.14 Schematic diagram of the principle of chemical mechanical polishing
General chemical mechanical polishing equipment structure diagram.[31]

通常，化学机械抛光技术所采用的设备包括[31]：CMP 设备、CMP 清洗设备、

抛光终点检测及工艺控制系统、抛光液输送系统、废液处理和测量设备等。如图 1.14 所示, 给出了化学机械抛光设备结构简图。它的基本组成部分包括: 旋转抛光台(Polish Plate), 抛光台上贴有抛光垫; 晶圆片固定装置, 称为抛光头(Carrier)。

在抛光过程中, 抛光垫的作用是携带传输磨料和抛光液, 同时通过对磨料的挤压, 在抛光样品表面形成反复的机械摩擦, 提高抛光速率。影响抛光垫输送抛光液效率的参数包括抛光垫的材质、花纹图案、材料表面内部的孔隙度以及抛光垫表面的绒毛线度的等。目前对抛光垫的研究, 除了上述内容外, 近几年也有报道利用数值分析的方法辅以抛光垫材料资料库的建立, 来模拟抛光垫的表面形貌, 期望能加速研磨垫的开发。现在商用抛光垫的材质一般为聚亚安酯, 抛光垫表面为四方形沟壑状。

在工业化设备中, 一般采用抛光头通过真空吸附的方法来固定晶圆片。在抛光运动中, 抛光台被下方旋转轴带动, 抛光液(Slurry) 则由导管控制以一定的速度喷出, 均匀的散布于抛光台上, 成为中间介质层。晶圆片被固定于抛光头与抛光台之间, 被施予向下的正压力, 并被抛光头带动旋转, 在含有悬浮颗粒的抛光液帮助下完成抛光。我们通常会在在抛光过程中将求抛光台的旋转方向与抛光头的旋转方向设置为相同, 以防止对抛光过程中对晶圆的摩擦力过大, 从而导致抛光样品崩坏。

1.3.3 影响化学机械抛光的因素

影响化学机械抛光的物理因素主要包括: 抛光液的种类、抛光垫、抛光液的流量、温度、压力以及转速。

1. 抛光液的种类

抛光液主要包含磨料(研磨颗粒)和化学试剂两部分。磨料与化学试剂对抛光材料的抛光速率、抛光表面光滑度、可抛光材料种类有直接相关的影响。对不同的抛光材料, 抛光液的化学成分组成与磨料组成都不一样。研磨颗粒在抛光过程中的作用是加强抛光的机械作用, 把压力传导到晶圆上, 通过与晶圆的碰撞完成切削, 打磨掉样品表面的反应产物。通常我们会关注磨料的粒径大小、硬度、浓度、悬浮性等参数。在化学机械抛光中常见的磨料包括氧化铈、氧化铝、金刚

石、二氧化硅等。化学试剂主要包含促进金属氧化与溶解的氧化剂、可加速金属或氧化物溶解的螯合剂、抑制金属过度腐蚀的抑制剂、降低抛光液表面张力使抛光后抛光材料表面易于清洗的表面活性剂、调节抛光液 pH 值的缓冲剂和提高磨料分散度的分散剂、防止抛光液长菌的防腐剂等。

2. 抛光垫

抛光垫也称为抛光皮、抛光布、抛光片等，按表面结构可分为：平面型、网格型和螺旋线型等；按表面材料类型可分为聚氨酯抛光垫、无纺布抛光垫和复合型抛光垫等。抛光垫的作用包括：把抛光液有效均匀地输送到抛光垫的不同区域；将抛光后便化学反应充分进行；的反应物、碎屑等顺利排出，达到去除效果；携带抛光液以维持抛光垫表面的抛光液薄膜，从而使得化学反应充分进行；保持抛光过程的平稳、表面不变形，以便获得较好的晶片表面形貌。通常我们会关注抛光垫硬度、压缩比、涵养量、粗糙度以及密度等参数，其中抛光垫的硬度决定了抛光过程中保持面形精度的能力，压缩比反应抛光垫的抗变形能力，涵养量则是单位面积的抛光垫存储抛光液的质量。

3. 抛光液的流量

抛光液的流量对抛光大速率、抛光后的表面粗糙度有很大的影响。当流量偏小的时候，晶圆片、磨料以及抛光垫之间的摩擦力增大，使抛光后的表面粗糙度增大。而且，摩擦力增大还会使抛光过程中局部温度过高，使晶圆表面缺陷增多。流速增大的时候，可以使抛光过程的温度稳定在一定的范围，而且反应生成的产物可以及时的被冲走。但是，如果流速过大，不仅造成浪费，而且导致局部化学作用过强，使抛光效率降低。一般工业界广泛采用的方法是先用小流速，等温度升高至合适范围后，将流速提高至平均水平，在最后阶段采用较大流速。

4. 温度

温度主要影响抛光液的状态和化学反应的剧烈程度，随着抛光液温度的升高，化学反应速度加快，抛光大速率提高。此外，温度的升高还会使抛光液的粘性降低。但是如果温度过高，化学反应过于剧烈，容易造成晶圆表面疲劳破损层的厚度增大，从而增大抛光后的表面缺陷。

5. 转速

一般来说,抛光垫和抛光头的转速慢的时候,如低于 20 转/分钟(rpm),抛光速率也较慢,且化学腐蚀造成的缺陷较严重。增加抛光垫以及抛光头的转速,抛光速率也会相应的提高。但是,当转速提高到一定数值的时候,抛光速率会停止上升甚至下降,机械划伤增多。主要原因是随着转速的提高,抛光垫上的抛光液存储量降低,等效的磨料与抛光样品的反应截面减小,化学反应的剧烈程度降低,从而导致抛光速率下降。

1.4 本文的研究目的与主要内容

本文的研究的主要目的是为了发展一套高效率、高质量、低成本的片上铌酸锂光子器件的制备方案,主要内容将分如下五个章节展开:

第一章,以光学性能为主,介绍了铌酸锂晶体的物理特性,回顾了铌酸锂薄膜技术发展的历史并介绍了其现在主流的生产工艺,并着重介绍了三类铌酸锂片上光子器件的制备工艺和应用场景。总结了飞秒激光微加工的原理与优势,并阐述了飞秒激光直写技术用于铌酸锂片上器件制备的挑战与机遇。介绍了化学机械抛光技术的发展历史,并阐明了化学机械抛光的基本原理与影响化学机械抛光的主要因素。

第二章,介绍了回音壁模式光学微盘腔的模式分布、表征参数、耦合方法;阐明了利用飞秒光直写和化学机械抛光的结合制备超高品质因子的铌酸锂微盘谐振腔的工艺流程,并利用光纤锥耦合,得到微腔的可见光波段的透射谱并且表征了其品质因子高达 1.47×10^7 。为了进一步提升微腔的品质因子,我们优化了抛光工艺进一步在 1550 波段将微腔的品质最高提升至 4.70×10^7 ,此外我们使用原子力显微镜表征了所制备的铌酸锂微盘腔的表面粗糙度,其表面粗糙度均方根 R_q 为 0.115nm。同时应用此方案制备了大量不同直径的片上铌酸锂微盘谐振腔验证制备方案的稳定性,并且研究了微腔 Q 值随微腔尺寸变化的规律,最后利用对制备过程中对化学机械抛光的精准控制,我们对铌酸锂微盘谐振腔的边缘楔角实现了 9° 至 51° 的连续可调,为控制铌酸锂微腔中的光场模式提供了一个额外的自由度。

第三章,介绍了我们如何进一步优化了飞秒激光直写辅助的化学机械抛光技术,并成功制备了高折射率对比度的铌酸锂单模波导。制备的工艺流程主要是 1.

在铌酸锂单晶薄膜上沉积一层 600nm 厚的金属铬膜；2. 利用飞秒激光直写将单模波导的掩模图案刻写到金属铬上形成铬波导掩模，掩模宽度 1.1 微米；3. 利用化学机械抛光将铬掩模图案转移到铌酸锂薄膜层上，形成铌酸锂波导；4. 利用铬腐蚀液清除残余的铬掩模；5. 利用化学气相沉积蒸镀上二氧化硅覆盖层。如此制备出的铌酸锂单模波导，波导层的铌酸锂与覆盖层二氧化硅的折射率差值达到 0.7，使得波导的转弯半径小于 50 微米。基于上述的技术，我们制备了分光比为 48: 52 的多模干涉耦合器。并基于多模干涉耦合器设计并制备了完美分光的马赫曾德干涉仪，并标定了其消光比为 28.8dB，半波电压为 15V。后用完美分光的马赫曾德干涉仪连接不同长度的铌酸锂单模波导回旋延时线，通过对比两根延时线的出口光场强度，得出所制备的铌酸锂单模波导损耗为 0.13dB/cm。为了提升光纤到所制备的铌酸锂光子芯片的耦合效率，我们利用选择性的化学机械抛光将铌酸锂光子芯片靠近端口的波导抛光至锥形，故端口处的模场得以放大，更加匹配光纤中的模场，实使用这种方法，光纤到芯片的耦合效率从 1%提升至 15%。

第四章，介绍了片上氮化硅波导的发展历史。并且阐明为了制备了氮化硅波导与铌酸锂微环谐振腔的片上高集成度的上下耦合耦合结构，在飞秒激光直写辅助的化学机械抛光中融入了聚焦离子刻蚀的制备方案。该结构中，我们使用氮化硅波导通过倏逝波将光耦合进铌酸锂微环谐振腔，得到了铌酸锂微环谐振腔的透射谱，其自由光谱范围 FSR 为 3.34 nm，品质因子最高高达 1.49×10^7 ，验证了在和半导体工艺的兼容中，我们提出的飞秒激光直写辅助的化学机械抛光技术依然可以保持超高的器件质量。同时，通过精确控制耦合距离（~10nm）实现了耦合状态调控，展示了过耦合、欠耦合和进临界耦合三种耦合状态。

第五章，总结本文工作中的创新点与不足之处，并且给与我们发展出的飞秒光直写结合化学机械抛光的铌酸锂片上器件制备工艺的总结和评价。并展望下一阶段研究工作。

第2章 超高品质因子铌酸锂微腔的制备

本章首先将回顾回音壁微盘谐振腔的基础理论与发展历史,后将介绍我组首创的飞秒激光直写结合化学机械抛光的超高品质因子的片上铌酸锂微盘谐振腔的制备方案和其参数的表征。

2.1 片上微纳谐振腔概述

回音壁模式微腔的几何结构通常具有高度旋转对称性。其光滑的表面以及腔体与外界环境(一般而言是空气)的高折射率对比度,使得其内部光场通过界面全内反射,形成回音壁模式,从而可以有效的约束光场,获得微腔内部光场的局域增强。

2.1.1 介质微腔中的回音壁模式

人们最早发现的回音壁模式现象是一种声学现象,在如图 2.1(a)北京天坛、(b)伦敦圣保罗大教堂等具有环形结构墙壁的建筑中,当有人靠墙边轻声说话时,另一个人在离声源很远的墙边,依然可以听到清晰声音,我们称这种声音沿着圆形墙壁传播的现象为回音壁模式。这一现象的理论解释首次由 Rayleigh 提出[33],而后被沿用到解释金球电磁辐射的散射理论[34],即米氏散射理论。1961年,实验上首次在氟化钙微球腔中观测的回音壁模式并以此实现了腔与增益介质同体的回音壁模式激光器[35]。1981年,微腔回音壁模式理论首次被用于解释液滴中的光场增强现象[36]。

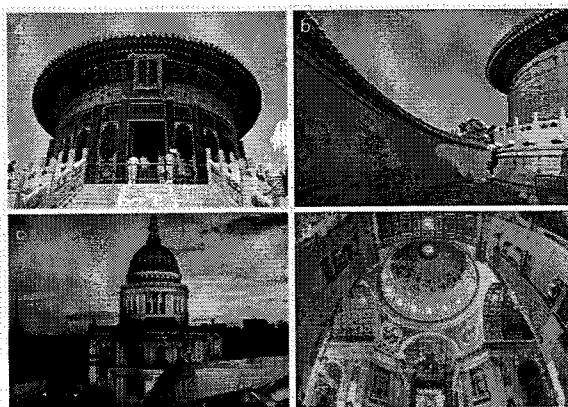


图 2.1(a) (b)京天坛皇穹宇 (c) (d)伦敦圣保罗大教堂 (图片源自网络)

Figure 2.1 (a) (b)Whispering gallery structure in the Temple of Heaven in Beijing (c) (d) Whispering gallery structure in the St. Paul Cathedral in London.

回音壁模式可以简单的从几何光学角度去解释，器腔体实际上是利用内部折射率高于外界环境中的折射率的特点，使得内部光场通过全内反射被约束在微腔内部，从而沿周期变化的波矢在腔内传播，如图 2.2(a) 所示。由于全内反射 (total internal reflection, TIR) 仅与入射角 (波矢) 和折射率相关，因此回音壁模式的谱分布可以存在在腔体材料完整的通光窗口内，是一个经典的宽谱现象。对光学回音壁模式微腔内光电场分布的最简单直观的理论分析可以从求解微球腔中光场传播的经典麦克斯韦方程开始[37]，下面我们从结论出发，描述微腔腔中的经典的回音壁模式。

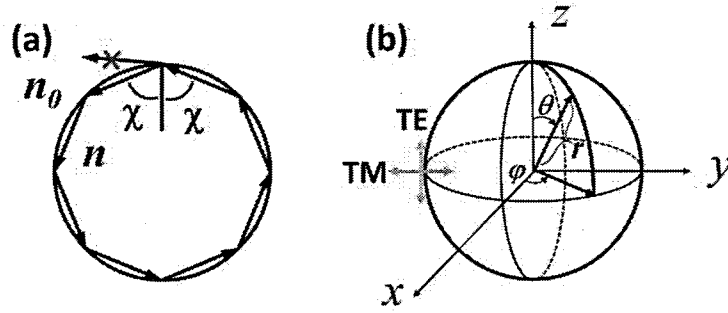


图 2.2 (a) 介质微腔中回音壁模式示意图 (b) 球坐标系中微球回音壁模式偏振[37]

Figure 2.2 (a) Schematic of whispering gallery mode (WGM) in dielectric sphere in ray optics (b) Polarization of WGM in a sphere in the spherical coordinate frame. [37]

1.1.1.1 微球腔中的回音壁模式

考虑一个在球坐标系下各向均匀的介质微球腔，假设其直径远大于波长 ($2R \gg \lambda$)，通常直径大于十倍波长即可看作远大于。假定光场模式分布在微球腔中保持恒定，即传播过程中偏振不发生变化。则麦克斯韦方程可化简为标量波方程，坐标系从直角坐标系 (x, y, z) 到球坐标系 (r, θ, ϕ) 的变换引入了一个离心势，即 Debye 势[37,38]，提供了一个束缚态条件，关于这种平面光与束缚态的相互作用在 Mie 的工作中已有研究[34]。根据 Debye 势理论，方程的解可以用六个独立变量 $(E_r, E_\theta, E_\phi, H_r, H_\theta, H_\phi)$ 描述，分为两组偏振互相正交的矢量场，分别为横电场 (Transverse electric field, TE 场) 和横磁场 (Transverse magnetic field, TM 场)，这里的“横”指垂直于微球腔赤道面，如图 2.2 (b)。当微腔半径远远大于波长时，TE 模电场主要分布在 θ 方向，TM 模电场主要分布在 r 方向，

两种偏振的电场均可表示为以下形式

$$\begin{aligned} E_{mlq}(r, \theta, \varphi) &\sim j_m(nk_0 r) \times P_l^m(\cos \theta) e^{im\varphi} \\ &= j_m(nk_q r) \times Y_l^m(\theta, \varphi) \end{aligned} \quad (1.1)$$

这里, j_m 为球坐标系下的 m 阶 Bessel 函数, P_l^m 为连带 Legendre 多项式, Y_l^m 为球谐函数。 (m, l, q) 为描述球腔内回音壁模式分布的三个指标, 其中 q 是径向模式数 (Radial mode number), 是球贝塞尔函数 j_m 在径向上的极大值数, q 取值为 1、2、3、..., 当 $q=1$ 时表示电场是 WGM 的基模; m 为角向模式数 (Angular mode number), 表示赤道线上波长数, 可用 $m = 2\pi Rn/\lambda$ 简单估算, R 为球腔半径, n 为球腔有效折射率, m 可以为负数, 表示反向传输的 WGM; 另有指标 $p = 1 - |m|$ 对应极向节点数, 对大腔基模而言, 一般 $1 = |m|$, 此时的腔模具有最高的 Q 值和最小的模式体积, 如图 2.3 所示。

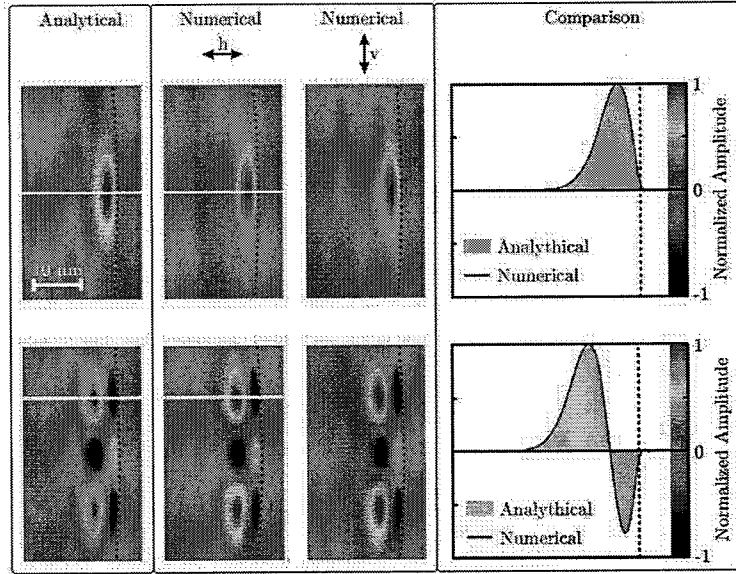


图 2.3 微球腔回音壁模式电场分布的解析解与数值解。微球腔旋转对称轴为竖直方向, 黑色虚线为微腔边界。第一行为基模回音壁模式 $q=1$, $p=0$; 第二行模式数为 $q=2$, $p=2$ 。右边插图为模式横截面的归一化电场振幅[32]

Figure 2.3 Field distribution of whispering gallery modes found analytically and numerically. The resonator rotation axis is vertical, and the dashed line indicates the resonator boundary. The top row represents the fundamental equatorial WGM with $q = 1$, $p = 0$. In the bottom row, $q = 2$, $p = 2$. The right-hand panel shows the field cross section along the lines shown on the left-hand panel. [32]

理想微球腔的回音壁模式本征频率 ν_{mlq} 可以利用渐近展开写为 $l^{1/3}$ 的幂级数展开式[40], 前四项为:

$$v_{mlq} \cong \frac{c}{2\pi nR} \left[\left(m + \frac{1}{2} \right) - \alpha_q \left(\frac{m + \frac{1}{2}}{2} \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{\zeta n}{\sqrt{n^2 - 1}} + \frac{3}{20} \alpha_q^2 \left(\frac{m + \frac{1}{2}}{2} \right)^{-\frac{1}{3}} \right]$$

$$\cong \frac{c}{2\pi nR} \left[l - \alpha_q \left(\frac{l}{2} \right)^{1/3} - \frac{\zeta n}{\sqrt{n^2 - 1}} + \frac{3}{20} \alpha_q^2 \left(\frac{l}{2} \right)^{-1/3} \right] \quad (\text{当 } l \sim |m| \gg 1 \text{ 时}) \quad (1.2)$$

$$\zeta = \begin{cases} 1 & TE \text{ mode} \\ n^{-2} & TM \text{ mode} \end{cases} \quad (n \text{ 为微球腔折射率}) \quad (1.3)$$

其中 α_q 为 Airy 方程的第 q 个负零点解, (m, l, q) 分别对应 WGM 的三个模式数。

2.1.2 微腔的表征参数

2.1.2.1 品质因子与损耗

描述微腔性能最重要的表征参数之一就是微腔的品质因子 (Quality factor), 或称为 Q 值, 用于表征腔内光子的寿命, 与微腔的损耗直接相关。其定义为

$$Q = \omega_0 \frac{U}{P} = -\omega_0 \frac{U}{dU/dt} \quad (1.8)$$

其中, U 为微腔中存储的能量, $P = -dU/dt$ 为耗散功率, ω_0 为腔的共振角频率。由于耗散的存在, 无激发源时, 腔内的光子存在一定寿命, 定义微腔中存储能量衰减初始值的 $1/e$ 所需要的时间为光子寿命, 由 (1.8) 式可得

$$U(t) = U_0 e^{-\omega_0 t/Q} \quad (1.9)$$

U_0 为初始 $t=0$ 时腔内储存能量, 可知光子寿命表达式为

$$\tau = \frac{Q}{\omega_0} \quad (1.10)$$

由 (1.9) 式可得电场的时域表达式 $E(t) = E_0 e^{-t/2\tau} \cos(\omega_0 t)$, 经傅里叶变换可得

$$E(\omega) = \frac{E_0}{2} \left[\frac{i}{\omega_0 - \omega + \frac{i}{2\tau}} - \frac{i}{\omega_0 + \omega - \frac{i}{2\tau}} \right] \quad (1.11)$$

当 $\omega \approx \omega_0$ 时, 腔内电场强度为

$$|E(\omega)|^2 \sim \frac{1}{(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{4\tau^2}} \quad (1.12)$$

是一个洛伦兹线型，其半高全宽为

$$\delta\omega = \frac{1}{\tau} = \frac{\omega_0}{Q} \quad (1.13)$$

根据微腔中损耗来源的不同，微腔的总的 Q 值 Q_{tot} 可以分为以下几个部分

$$Q_{tot}^{-1} = Q_{abs}^{-1} + Q_{rad}^{-1} + Q_{scatt}^{-1} + Q_c^{-1} \quad (1.14)$$

Q_{abs} 表征材料的本征吸收损耗，可近似表示为

$$Q_{abs} = \frac{2\pi\tilde{n}}{\lambda\tilde{\alpha}} \approx \frac{2\pi}{\lambda} \frac{[\int E^*(r,z)E(r,z)n(r,z)rdrdz]^2}{\int E^*(r,z)E(r,z)n(r,z)\alpha(r,z)rdrdz} \quad (1.15)$$

式中 $\tilde{n}$ 为有效折射率， $\tilde{\alpha}$ 为吸收损耗。

Q_{rad} 对应微腔固有的辐射损耗，在微腔内曲面发生的全反射实际上是不完全的[39]，会有一部分电场泄露出来，造成能量的损耗[42]。

Q_{scatt} 对应散射损耗，主要是微腔表面不均匀造成的能量损耗，可以通过优化制备工艺、提高微腔表面光滑度、增加表面洁净度等方法降低该损耗。这一项的大小与微腔的表面均匀度 s 和粗糙度的关联长度 B 相关[54]

$$Q_{scatt} \approx \frac{3\lambda^3 R}{8\pi^2 n B^2 s^2} \quad (1.16)$$

以上三项 Q_{abs} 、 Q_{rad} 、 Q_{scatt} 可以统称为微腔的本征 Q 值 Q_{int} ，在实际实验中，腔模的激发往往需要有波导、光纤锥、棱镜的外部装置参与，这些器件靠近微腔会给腔模引入新的损耗——耦合损耗，可以用负载 Q 值 Q_c 表征。至此，微腔总的 Q 值 Q_{tot} 也可写为

$$Q_{tot}^{-1} = Q_{int}^{-1} + Q_c^{-1} \quad (1.17)$$

2.1.2.2 模式体积

对微腔而言，其重要的优势不仅仅在于具有较高的 Q 值，还在于可以将光束束缚在一个足够小的体积内，提高单位能量密度，衡量这一特性的物理量为模式

体积 (Mode volume)。设 WGM 的能量密度为

$$w_e(\mathbf{r}) + w_m(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} \epsilon \mathbf{E} \mathbf{E} + \frac{1}{2\mu} \mathbf{B} \mathbf{B} \quad (1.18)$$

则模式体积定义为

$$V_m = \frac{\int (w_e(\mathbf{r}) + w_m(\mathbf{r})) dV}{\max(w_e(\mathbf{r}) + w_m(\mathbf{r}))} = \frac{\int \epsilon(\mathbf{r}) |\vec{E}(\mathbf{r})|^2 d^3r}{\max(\epsilon(\mathbf{r}) |\vec{E}(\mathbf{r})|^2)} \quad (1.19)$$

2.1.2.3 自由光谱范围和精细度

两个模式数仅差 1 的相邻谐振模式之间的波长差或频率间隔成为微腔的自由光谱范围 (Free spectral range, FSR)。简单地, 对大腔基频模式, 可以根据谐振腔原理近似估算微腔的 FSR。光在腔内发生谐振时应满足

$$n_{eff} L = m \lambda \quad (1.20)$$

其中 m 为模式数, L 为谐振腔腔长, 这里我们取微腔的周长 $L=2\pi R$, 根据自由光谱范围定义两个相邻模式波长差应该满足

$$\Delta \lambda_{FSR} = \frac{\lambda^2}{2n_g(\lambda)\pi R} \quad (1.21)$$

这里 $n_g(\lambda) = n_{eff}(\lambda) - \lambda \frac{dn_{eff}}{d\lambda}$ 是光场的有效群折射率, 若忽略色散 $\frac{dn_{eff}}{d\lambda}$, 则有

$$\Delta \lambda_{FSR} = \frac{\lambda^2}{2n_{eff}(\lambda)\pi R} \quad (1.22)$$

对应的频域的自由光谱范围为

$$\Delta \nu_{FSR} = \frac{c}{2n_g(\nu)\pi R} \quad (1.23)$$

对有解析解的微球腔和回转椭球体微腔, 也可从微腔的本征频率表达式 (1.3)、(1.5) 式得到模式的 FSR。

回音壁模式微腔的精细度可以表示为微腔自由光谱范围与模场共振时半高全宽之比

$$F = \frac{\Delta \omega_{FSR}}{\delta \omega} \quad (1.24)$$

2.1.2.4 有效折射率

由式 (1.20) 可得, 色散方程

$$v = \frac{mc}{2\pi R n_{eff}} \quad (1.25)$$

对比 (1.2)、(1.5) 和 (1.25) 式, 可以分别得到微球腔与回转椭球体微腔的有效折射率, 在大腔 (腔体尺寸远大于波长的情况下) 假设下可以写为:

$$\frac{1}{n_{eff}} \cong \frac{1}{n} \left[\left(1 + \frac{1}{2m}\right) - \alpha_q \left(\frac{1 + \frac{1}{2m}}{2m^2}\right)^{\frac{1}{3}} - \frac{\zeta n}{m\sqrt{n^2 - 1}} + \frac{3}{20} \frac{\alpha_q^2}{m} \left(\frac{m + \frac{1}{2}}{2}\right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (1.26)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{n_{eff}} \cong \frac{1}{n} & \left[1 - \alpha_q \left(\frac{1}{2m^2}\right)^{1/3} + \frac{2p(R - \rho) + R}{2m\rho} - \frac{\zeta n}{m\sqrt{n^2 - 1}} \right. \\ & + \frac{3}{20m} \alpha_q^2 \left(\frac{m}{2}\right)^{-1/3} \\ & - \frac{\alpha_q}{12m} \left(\frac{2p(R^3 - \rho^3) + R^3}{\rho^3} \right. \\ & \left. \left. + \frac{2n\zeta(2\zeta^2 - 3n^2)}{(n^2 - 1)^{\frac{3}{2}}} \right) \left(\frac{l}{2}\right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (1.27) \end{aligned}$$

其中, n 为体块材料折射率, 由于 (1.26) 式与 (1.27) 式中方括号内各项和均大于 1, 可见, 微腔中回音壁模式对应的有效折射率 $n_{eff} < n$ 。方括号中各项代表了不同参数对回音壁模式的修正, 其中共同的部分如 $(\sim \alpha_q)$ 项及其高阶是对不同波长和模式数 q 下 WGM 模式直径变化带来的修正项; $(\sim \zeta)$ 来自渐进近似过程中偏振相关的 Fresnel 相位, 与微腔的倏逝场相关, 值得注意的是, 当微腔折射率接近 1, 即与外界环境折射率 ($n_0=1$) 接近时, 这一项的值会急剧上升, 说明微腔对 WGM 束缚变差了。(1.27) 式中含有 (R, ρ) 的项则是由于微腔尺寸在回转轴向的压缩导致的修正项。因此, 微腔的有效折射率包含了材料本身、微腔形貌、模式分布等关键信息, 是一个描述微腔色散情况的重要参数。

2.1.3 微腔模式的激励与耦合

想要表征微腔中的回音壁模式的分布, 需要将外接光源耦合进微腔中, 并将

微腔中的模式信号携带出来。由于模式刚才在回音壁微腔中被束缚在微腔内表面附近，直接将自由空间传播的光束对准到微腔的方法几乎不能实现耦合。通常的做法是利用如图 2.4 所示的微腔外表面附近的倏逝场，通过耦合器件的倏逝场与微腔倏逝场的匹配，实现光源的耦合与回音壁模式的导出。已经广泛使用的耦合器件与方案如图 1.8 所示，包括棱镜耦合[55-57]、光纤头耦合[58, 59]、波导耦合[60-62]和光纤锥耦合[63, 64]。

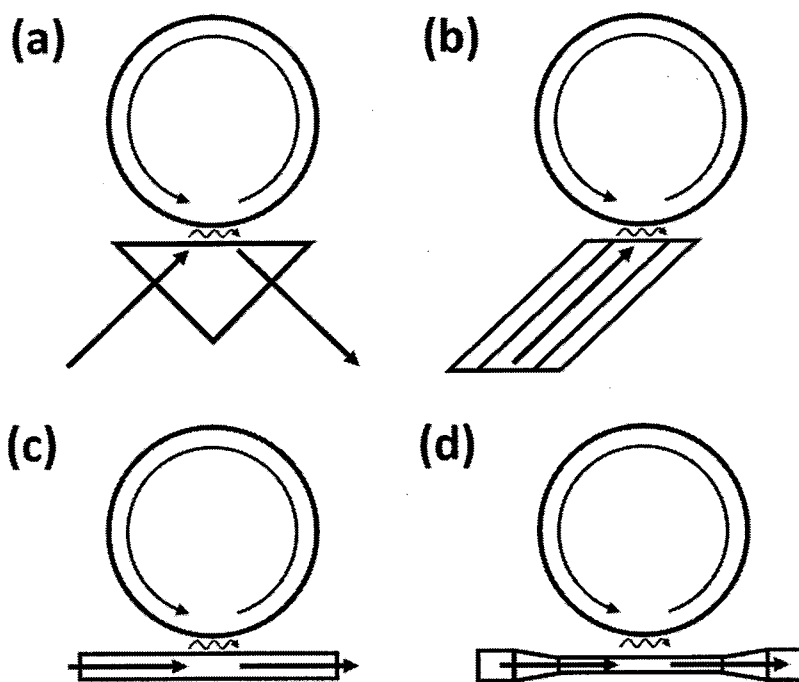


图 2.4 (a) 棱镜耦合 (b) 光纤头耦合 (c) 波导耦合 (d) 光纤锥耦合

Figure 2.4 Sphere coupled with (a) prism, (b) angle-polished fiber, (c) waveguide and (d) fiber taper.

棱镜耦合利用棱镜反射面的倏逝场激发微腔的回音壁模式，通过优化高斯光束的入射角和张角大小、反射面与微腔之间的距离等参数可以在二氧化硅微球腔中 80% 的耦合效率[57]，2007 年，Mohageg 等人在机械抛光制备的毫米级的铌酸锂椭圆微腔中实现的耦合效率为 97.3% 的回音壁模式激发[65]。通过优化铌酸锂微腔边缘的几何参数，铌酸锂微腔棱镜耦合方式的耦合效率可以超过 99%，达到临界耦合条件[66]，这种高效的耦合方案被广泛运用于晶体微腔的耦合与非线性实验中[67-70]。由于棱镜的尺寸比较大，这种耦合方案更适合机械抛光的晶体微腔和其他无基底材料的微腔，无法实现片上微腔的集成耦合。

1999 年，Vladimir 等人用倾斜抛光单模 SMF 光纤端口实现了耦合装置小型化的初步尝试[58]。由于光纤纤芯的几何尺寸 ($\sim 10 \mu\text{m}$) 与微腔倏逝波的覆盖区

域尺寸接近, 可以实现腔模与激发光源的高效耦合, 由于光纤本身的导波作用, 光纤头耦合方案不需要棱镜耦合中所需的聚焦光学元件, 信号的探测也可以通过增加光纤头, 还可以通过改变端面位置探测不同区域的微腔腔模。

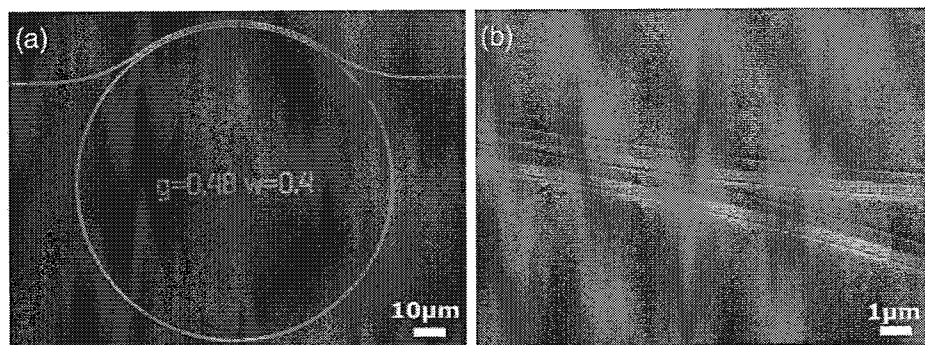


图 2.5 铌酸锂波导与铌酸锂微环腔的耦合[43]

Figure 2.5 Coupling of lithium niobate waveguide to lithium niobate microring cavity. [43]

如图 2.5 所示微腔与波导的直接耦合也是一种常用且非常有效的耦合方式。早期受限于工艺水平, 人们采用抛光光纤的方式, 将光纤的纤芯露出, 用裸露的纤芯靠近微腔, 从而激励微腔中的回音壁模式。随着半导体工艺的成熟发展, 由波导和微环腔组成的半导体光子学器件被广泛运用于光互联等领域中, 实现了单片基底上同步集成的模式耦合器件, 可用于滤波器、光开关、色散补偿器、调制器等多种集成光子学器件中[42-45]。近年来, 随着铌酸锂薄膜芯片 (Lithium niobate on insulator, LNOI) 技术的发展[46, 47], 出现了以非线性晶体铌酸锂为主体的集成波导与回音壁微腔器件[48-51]。

目前应用最广泛的耦合方法应该是锥形光纤耦合。这也是本文中第二章工作中所采用的耦合方案。使用氢氧焰加热剥去保护层的通信光纤 (SMF-28), 并且利用两个一维的数控位移台控制光纤的拉伸速度, 加热区域的光纤纤芯直径可以从 $125\ \mu\text{m}$ 拉伸到 $\sim 1\ \mu\text{m}$, 具体的工艺见本文第二章。由于光纤锥的几何形貌可以通过改变制备参数进行设计优化, 便于灵活控制光纤锥与微腔的耦合条件, 合适的拉锥参数下光纤锥的损耗可以做到非常小, 浙江大学的方伟等人已经成功制备了通过率大于 99% 的微纳光纤, 且拉光纤锥依然可以保持单模传输[52], 这项技术被广泛的应用于微纳传感、光机械力学、非线性光学等多个前沿领域[34, 53-56]。

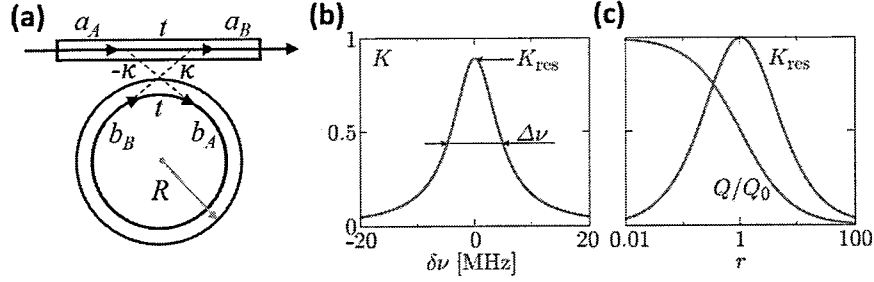


图 2.6 (a) 微腔的耦合模型 (b) 耦合效率与谐振频率失谐量的关系 (c) 耦合效率 K_{res} 、负载 Q 值与本征 Q 值的比值 Q/Q_0 与系数 r 的关系[72]

Figure 2.6 (a) Schematic of microresonator coupled with a waveguide. (b) Coupling efficiency K as a function of frequency detuning $\delta\nu$ for $\nu_0 = 3$ MHz and $r = 2$ with the maximum K_{res} at resonance and the linewidth $\Delta\nu$. (c) Coupling efficiency K_{res} and ratio Q/Q_0 between total and intrinsic quality factor as a function of r . [72]

我们以图 2.6 (a) 中的模型分析微腔与波导的耦合机制。耦合区域的耦合过程可以写成一个 2×2 的矩阵，矩阵元分别为透射率 t 和耦合系数 κ 表示，由能量守恒易知两个变量满足 $\kappa^2 + t^2 = 1$ ，如图 2.6 (a) 所示。有输入光场振幅和输出光场振幅可以写成

$$\begin{pmatrix} a_B \\ b_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t & \kappa \\ -\kappa & t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_A \\ b_B \end{pmatrix} \quad (1.28)$$

这里 $a_{A,B}$ 表示微腔外光场的归一化复振幅， $b_{A,B}$ 为微腔内归一化复振幅， κ 和 t 均为复数，包含了耦合区的相位跳变，根据能量守恒， $|a_B|^2 + |b_A|^2 = |a_A|^2 + |b_B|^2$ 。考虑光场沿微腔一周 $L = 2\pi R$ ，有部分光被材料吸收，吸收系数为 α ，相移为 $\delta\phi$ ，则有循环条件

$$b_B = e^{-\alpha L/2} e^{i\delta\phi} b_A \quad (1.29)$$

(1.29) 式的结果带入 (1.28) 式中，在存在谐振频率一个小量的失谐 $\delta\nu$ 时，耦合效率为

$$K \equiv 1 - \frac{|a_B|^2}{|a_A|^2} = \frac{4r}{4\left(\frac{\delta\nu}{\Delta\nu_0}\right)^2 + (1+r)^2} \quad (1.30)$$

式中， r 是耦合损耗与微腔内部损耗的比值，表达式为 $r = \kappa^2 / \alpha L$ ， $\delta\nu$ 为入射光场相对共振频率的失谐量，表达式为 $\delta\nu = \left(\frac{c_0}{2\pi L n}\right) \delta\phi$ 。 $\Delta\nu_0$ 为微腔的本征线宽，表达式为 $\Delta\nu_0 = \frac{c_0 \alpha}{2\pi n K(\delta\nu)}$ 。观察方程各式，可发现其方程满足洛伦兹线型，耦合效率的最大值发生在 $\delta\nu = 0$ 处，此时耦合效率的表达可以写为

$$K_{res} = \frac{4r}{(1+r)^2} \quad (1.31)$$

其半高线宽为 $\Delta\nu = \Delta\nu_0(1+r)$ ，如图 1.10 (b) 所示。由此也可以得出回音壁微腔的本征 Q 因子

$$Q \equiv \frac{\nu}{\Delta\nu} = \frac{Q_0}{(1+r)} \quad (1.32)$$

其中 Q_0 为微腔的本征品质因子， $Q_0 = \nu/\Delta\nu_0 = 2\pi\nu n/c_0\alpha$ ，即 (1.15) 式。图 2.6 (c) 为 K_{res} 与 Q/Q_0 与耦合比值 r 的关系曲线。

当 $r \ll 1$ 时，光场在微腔中传播一个周期的损耗远大于耦合引起的耗散，微腔的本征损耗为占主要作用，此时属于欠耦合状态(under coupling)，微腔实载 Q 值较高；

当 $r \gg 1$ 时，光场在微腔中传播一个周期的损耗远小于耦合引起的耗散，微腔的耦合损耗为主要部分，此时属于过耦合状态(over coupling)，微腔实载 Q 值较低；

当 $r = 1$ 时，此时微腔的耦合效率 K 最大为 1，光场在微腔中传播一个周期的损耗等于耦合引起的耗散，此时本征 Q 值恰好为负载 Q 值的两倍，微腔处于临界耦合状态(critical coupling)，共振频率处波导的输出端光功率为零，所有光场能量全部通过耦合进入了微腔。

由此可见，耦合系数 r 影响着微腔回音壁模式品质因子和可耦合进微腔的能量。

2.1.4 微腔制备技术的发展历程

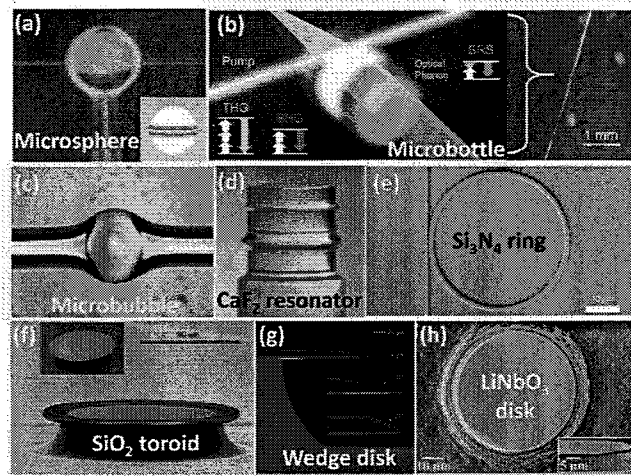


图 2.6 不同方式制备的回音壁模式微腔[86-90]

Figure 2.6 WGM microresonator fabricated by various methods. [86-90]

如图 2.6 所示，自上 1990 年代以来，片上微纳谐振腔的制备技术不断推陈出新，在各种介质材料中，如无定形的玻璃材料、聚合物、半导体、晶体等都出现了成功的微腔制备案例，微纳谐振腔结合这些材料特性展现出了惊人的应用潜力。同时微腔的形貌也日渐丰富。在玻璃材料中获得直径在微米尺度的固态回音壁微腔最简单经济的方法是通过加热光纤一端，将玻璃熔融软化，利用其表面张力形成规则光滑球面，冷却后固化为微球腔[91, 92]，如图 2.6 (a)。加热源的选择有很多包括氢氧焰等明火、高功率的 (CO_2) 激光器以及商业光纤熔接机的电弧放电装置等等[93]。实验上得到的微球腔的 Q 值最高可以在 1530 nm 波段达到 3×10^{12} [94]。此外，由于无定形材料的易掺杂特性，因此这类热回流微腔还可用于实现各种微激光器[86, 95]，为早期回音壁微腔的研究提供了优良平台。

基于类似的原理，随后又发展出了光纤上的瓶型微腔和利用毛细管制备的微泡腔[96-98]，如图 2.7 (b) (c) 腔模具有很好的机械调制性能，尤其是微泡腔由于具有中空结构，可以直接与液体环境交互，极薄的微腔壁有效地限制了微腔的模式体积，在高灵敏度传感、微流控、三阶非线性光频转换等领域具有很好的应用前景。例如复旦大学徐雷教授课题组在微泡腔中实现了低阈值的 Kerr 参量振荡，并利用两个耦合的微泡腔实现了自参考光流生物探测器，可探测溶液中的牛血清白蛋白浓度，探测精度达 1 pg/mL [99]，如图 2.7 (c) 所示。

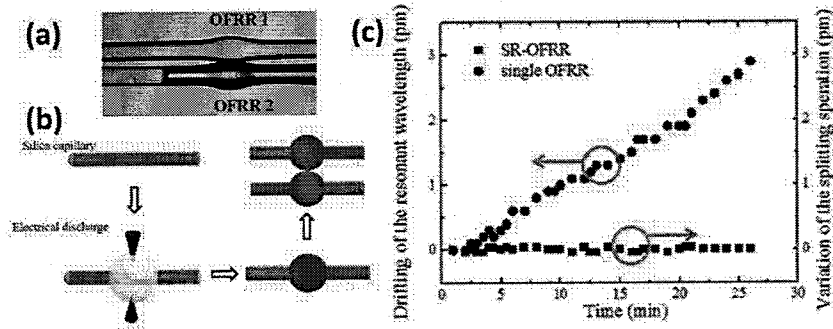


图 2.7 基于耦合微腔结构的自参考光流生物探测器 (a) 耦合微腔光学显微镜图, (b) 两个利用电弧加热方法吹制的微腔在赤道处耦合形成自参考光流生物探测器, (c) 耦合微腔与单个微腔探测热稳定性对比[96-99]

Figure 2.7 Self-referencing optofluidic ring resonator (SR-OFRF) sensor for highly sensitive biomolecular detection (a) picture of an SR-OFRF sensor (b) Schematic of an SR-OFRF biosensor fabricated by the fuse-and-blow technique, and the two OFRRs were placed in contact with each other at their equators. (c) Thermal stability test results of the SR-OFRF (black squares) and a single OFRR (blue circles). [96-99]

2003 年, Vahala 小组提出了一种基于传统半导体平面光刻工艺的二氧化硅微环芯腔制备技术[90], 如图 2.8 所示。在此技术的基础上, 发展出了微盘腔、楔形边缘微腔等多种形态的薄膜微腔[100-102]。尽管热回流微腔具有制备工艺简单、Q 值高等优势, 但还是面临着热回流过程的可控性较差, 材料的二阶非线性极化率缺失等不足, 同时很难进一步缩小模式体积。

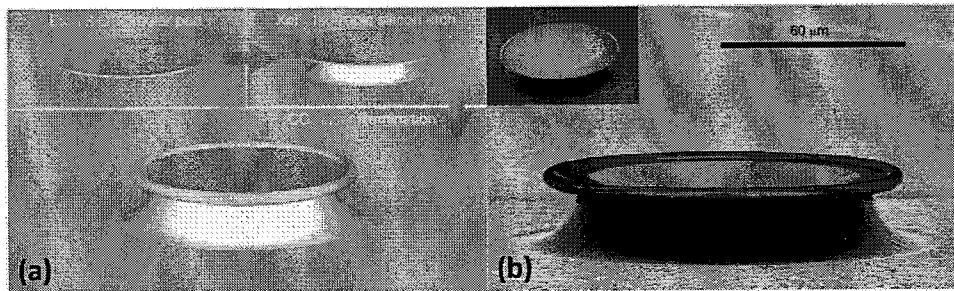


图 2.8 (a)光刻工艺制备二氧化硅微腔的步骤示意图, (b)环芯腔扫描电镜图 [100-102]

Figure 2.8 (a)Schematic fabrication of silica microtoroid resonator by lithography. (b) SEM image of the microtoroid. [100-102]

晶体微腔一般采用的是机械研磨体块材料的方式[103], 制备的晶体微腔为回转椭球体, 表面光滑度在纳米量级, 在 1550 nm 波段的 Q 值可以达到 3×10^{11} 量级, 大多数为氟化物晶体微腔以及铌酸锂微腔[67, 104-106], 也可用于无定形材料的微腔制备[107]。由于制备工艺的限制, 这种方式制备的晶体微腔尺寸一般在毫米量级, 同样有模式体积较大的困难。

最后还有一种比较特殊的微腔是运用平面光刻工艺制备的半导体波导环形

腔[108-110], 严格意义上, 并不是一种回音壁模式微腔。但是由于具有很高的集成性和机械稳定性, 可大规模生产, 因此在光通讯应用中也非常广泛。

以上介绍的微腔制备方案大多是根据材料本身特性提出的相应方案, 可以应用的材料范围十分有限。本文作者所在研究组在长期从事飞秒激光三维微纳结构加工的研究, 该技术利用飞秒激光在透明介质材料中的多光子吸收等机制, 可以对大多数透明材料的物理化学性质进行改写或直接实现高精度的烧蚀。2012年, 本课题组林锦添等人成功利用飞秒激光直写技术结合 CO_2 激光热回流技术在石英玻璃中实现了任意倾角和任意高度分布的环芯腔[111], 如图 2.9 所示。利用该方法制备的铌玻璃环芯腔可以在 1060 nm 波长附近实现 69 μW 的低阈值激励[112]。

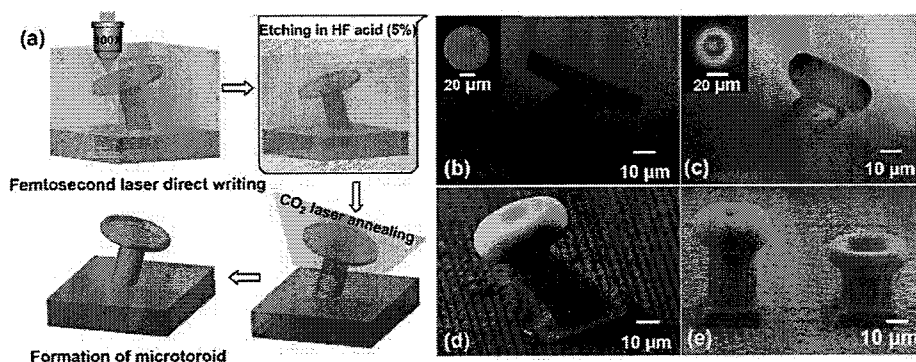


图 2.9 飞秒激光直写技术在石英玻璃中制备三维回音壁模式光学微腔

Figure 2.9 Three dimensional WGM microresonators fabricated in silica glass using femtosecond laser direct writing.

由于高温回流会破坏铌酸锂单晶的晶向, 所以在铌酸锂薄膜微腔的制备中不能使用回流技术提高微腔的表面光滑度, 本课题组引入了聚焦离子束 (Focused ion beam) 刻蚀技术, 实现了氟化钙体块材料中微米级微腔的制备, 并很快将飞秒激光直写结合聚焦离子束刻蚀技术运用到了铌酸锂薄膜微腔的制备上。由于商品化的铌酸锂薄膜上下本身具有亚纳米级的光滑度, 结合聚焦离子束研磨微腔侧壁, 可以进一步提高晶体微腔的表面光滑度, 获得高 Q 值的铌酸锂微腔。其制备过程如图 2.9 (a) 所示, 主要分为三步, (1) 水辅助的飞秒激光烧蚀, 形成裸露的 LN 薄膜- SiO_2 -LN 基底“三明治”结构微柱体; (2) 聚焦离子束研磨柱体侧面, 提高 LN 薄膜侧面光滑度; (3) 氢氟酸腐蚀部分 SiO_2 , 使薄膜外缘悬空, 剩余的 SiO_2 作为支柱撑起圆盘形的 LN 薄膜 (即 LN 微腔)。制备的 LN 微腔 Q

值在 1550 nm 波段可以达到 2.45×10^6 ，并分别在 X 切和 Z 切铌酸锂微腔中实现了倍频效应。2017 年，本课题组方致伟等人应用该技术在双层铌酸锂薄膜上实现了垂直耦合的铌酸锂双腔结构，可用于光机械等领域的研究[113]。本课题组的工作充分证明了该工艺结合了飞秒激光快速直写和聚焦离子束高精度研磨的优点，可快速制备出高品质铌酸锂微腔，成为制备晶体微腔的新途径。

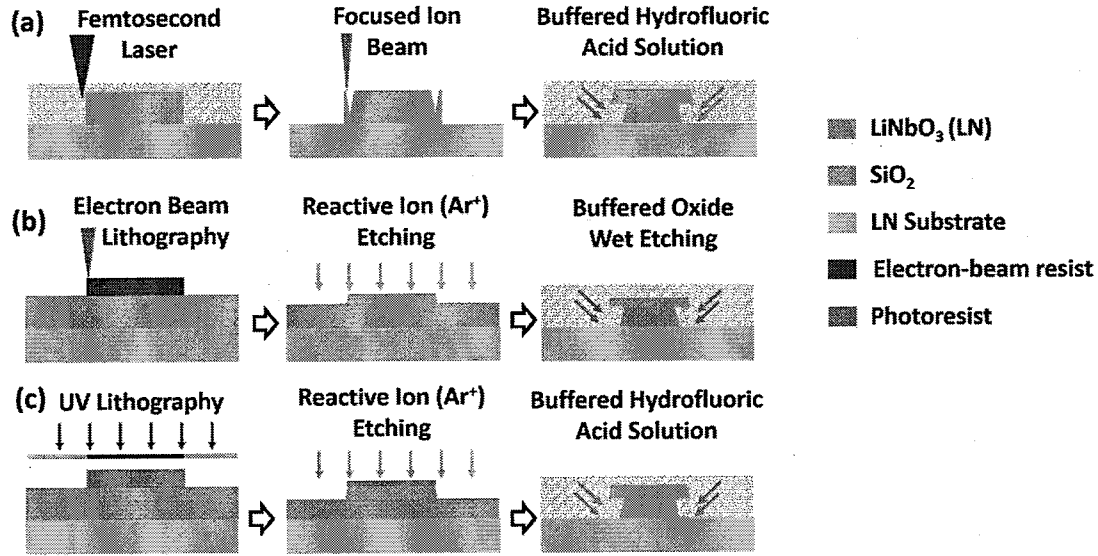


图 2.10 三种铌酸锂晶体薄膜微腔制备工艺[114-116]

Figure 2.10 Methods for fabrication of LN microdisk. [114-116]

该技术路线提出后已经被诸多同行借鉴。例如，美国哈佛大学 Lončar 教授研究组用电子束光刻和反应离子干法刻蚀，取代了飞秒激光烧蚀与聚焦离子束研磨抛光，也在铌酸锂薄膜上制备出了 Q 值达到 1.02×10^5 的铌酸锂微盘腔，具体工艺流程中如图 2.10 (b) 所示。并且，在该微腔内实现了倍频，观察到了透射谱线的热展宽效应。如图 1.15 (c)，2015 年我国南开大学薄方老师课题组进一步用紫外光刻替代电子束光刻，首次获得了品质因子超过 10^6 的片上铌酸锂微盘腔，称为当时的世界纪录，并进而实现了腔模电光调控。此外，铌酸锂微腔与波导耦合的相关研究也在积极开展当中。2017 年，本课题组利用飞秒激光直写结合聚焦离子束刻蚀技术实现了铌酸锂微盘腔与波导的同平面集成，Q 值可达 1.67×10^5 [62]。随后，哈佛大学 Lončar 课题组在铌酸锂薄膜上制备出直径 $160 \mu\text{m}$ 的微环与波导的耦合结构，并将 Q 值提升至 5×10^6 。

我组所提出的飞秒激光直写结合聚焦离子束刻蚀的片上铌酸锂微腔制备技术，创造当时片上铌酸锂微腔品质因子的世界记录。但是在后续的技术发展中有

两个主要的问题，一是受限于焦离子刻蚀引入的损耗，微腔品质因子很难进一步提高。二是聚焦离子刻蚀设备昂贵同时加工效率较低，很难适用于大规模高效率的光子芯片生产。所以急需一套在保证加工效率的同时，获得更高器件质量的设备制备方案。我们将在下一节重点介绍由我组首创的飞秒激光直写结合化学机械抛光的片上微盘谐振腔的制备方案。

2.2 超高品质因子铌酸锂微腔的制备

2.2.1 飞秒光刻系统

如图 2.1 所示，为一个典型的飞秒激光加工系统示意图，按激光光路行进方向，从飞秒激光源中出射的激光，经过一系列功率调节光学元件组合调节激光功率，通过电控光闸控制激光束通断，经分束镜分出一束激光，用于功率监测，剩余的一束激光经过物镜聚焦到加工平台上，平台上固定待加工样品，透射照明下的样品通过物镜成像到上方的 CCD 相机，实时监测加工过程，800 nm 高反的短通二向色镜可以将飞秒加工光与成像光分开。

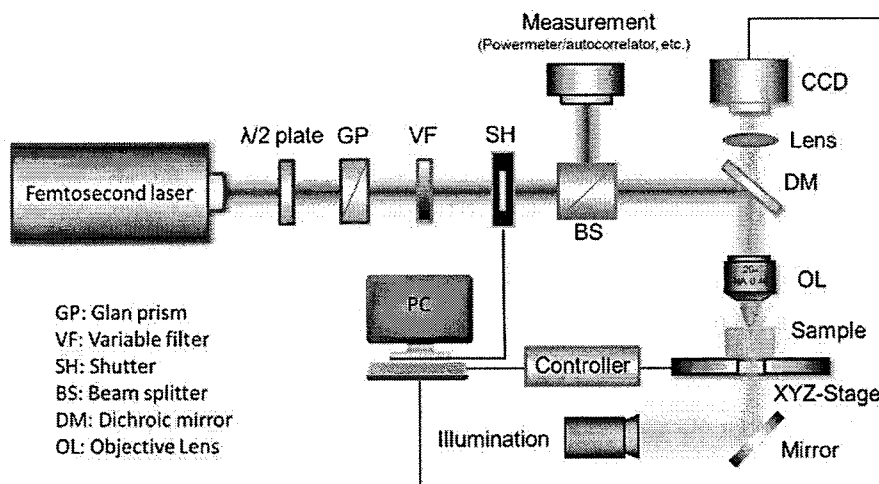


图 2.11 飞秒激光直写设备示意图

Figure 2.11 Schematic setup of a femtosecond laser micromachining system.

我们实验中所用的飞秒激光源为 LightConversion 公司的光纤飞秒激光系统，如图 2.2 (a) 该飞秒激光系统最终输出飞秒光中心波长为 1025nm，脉冲宽度设置为~270 fs，重复频率 500 kHz，平均功率最高可达 6 W。由于输出功率远远超过加工所需功率，输出激光先通过一个 1/2 波片与格兰棱镜组合，降低功率，再利用一个可调节中性密度衰减片实现激光功率的连续可调。

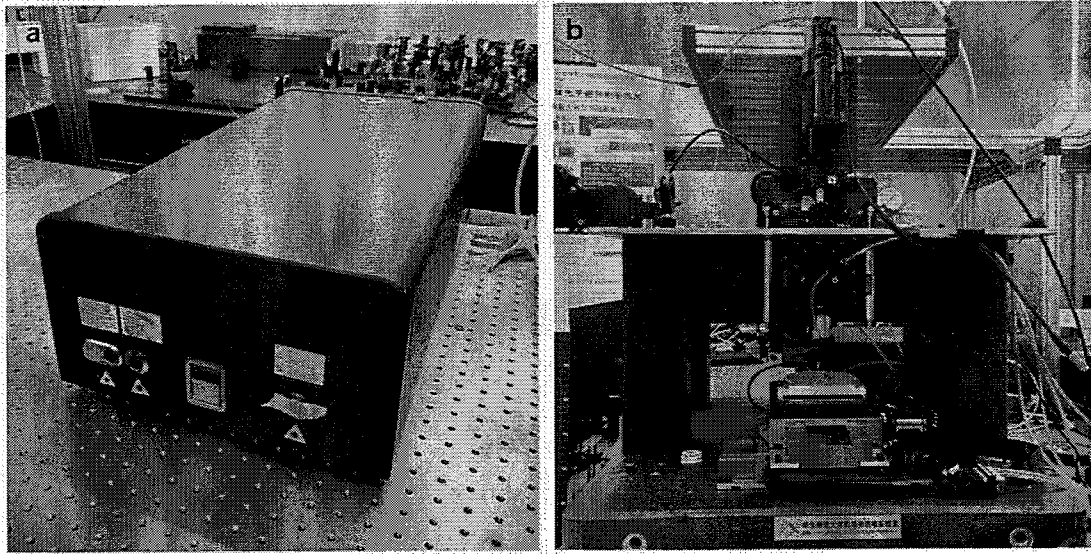


图 2.12 (a)飞秒激光器(b)三维微纳加工平台

Figure 2.12 (a) The femtosecond laser system (b) 3D micromachining stage.

如图 2.2 (b) 所示, 三维微纳加工平台由 CCD 相机、显微镜、一个 aerotech 公司生产的三维位移平台和各种不同参数物镜组成。其中物镜是系统中非常重要的光学元件, 直接关系到飞秒激光焦点大小与工作深度。值得注意的是我们在图 2.2 (b) 所示的聚焦物镜上固定了一个吹气喷嘴, 在加工过程中使用吹嘴带走加工产生的碎屑。由于飞秒激光的频谱较宽, 为了缩小聚焦是的球差和色差, 加工过程中一般都是商用的三丰公司生产的专用的加工物镜。物镜的取得的焦点的空间精度河大程度上取决于物镜的数值孔径 (NA), 在垂直于飞秒激光传输方向的平面上, 焦点的直径约为 $1.22\lambda/\text{NA}$, 与 NA 成反比。过高的 NA 使得物体需要里物镜很近, 限制了物镜的工作距离, 将影响到三维微纳加工的加工深度, 因此, 需要在制备精度与工作深度之间做平衡。在制备铌酸锂回音壁时, 我们飞秒激光直写过程中常用的物镜, 放大倍率为 100 $\times$ 、NA 为 0.8 的物镜可以提供直径为 $\sim 1\ \mu\text{m}$ 的焦点。通常而言, 对于工作在空气环境中的聚焦物镜, 起放大倍率与数值孔径以及工作距离高度相关, 放大倍率越高数值孔径越大对应的工作距离就越小。下面以三丰公司生产的长工作距离明场 NIR 物镜给出三组物镜的放大倍率与数值孔径以及工作距离的参数。5 倍放大倍率的物镜, 数值孔径为 0.14, 工作距离 37.5mm, 20 倍的物镜, 数值孔径为 0.4, 工作距离 20mm, 50 倍的物镜,

数值孔径为 0.65，工作距离 10mm。另一个决定加飞秒激光工精度的是固定样品三维位移平台，如图 2.2 (b) 中物镜下方是一个 aerotech 公司生产的气浮三维位移平台，位移的重复精度为 0.1 nm。

2.2.2 化学机械抛光系统

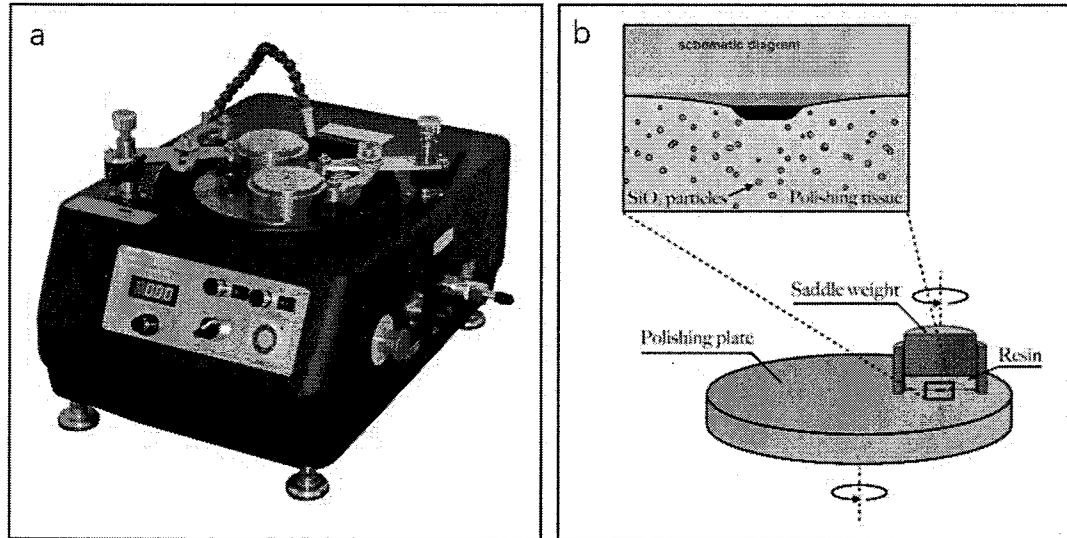


图 2.13 化学机械抛光设备(a) 化学机械抛机 (b) 化学机械抛光过程示意图

Figure 2.13 (a) Chemical mechanical polishing equipment (b) Diagram of chemical mechanical polishing process.

我们在制备超高品质因子的铌酸锂微腔中采用的化学机械抛光机是如图 2. (a) 所示的沈阳科晶公司的 NUIPOL802。NUIPOL802 的抛光台的直径为 200 mm，转速范围为 0 RPM 至 250 RPM。摆臂的摆动频率为 0.1Hz 至 0.01Hz 可调（也可设置为不摆动），最多可支持双工位抛光，受限于单个抛光模具的尺寸，NUIPOL802 抛光机的单个样品抛光的最大面积需小于 80 mm。

通常，化学机械抛光技术常被用来做晶圆表面平坦化处理，但是在我们的制备方案中，化学机械抛光被用来掩膜图案转移，即选择性的抛光未被掩膜保护的晶体薄膜层，这就对我们的抛光垫的选择提出了要求。为了尽可能提高铌酸锂薄膜层与掩膜层的去除速率比，我们需要用到涵养量足够大的抛光垫，我们尝试了市面上所有主流商用抛光垫，如聚氨酯类阻尼布类等，最终选定涵养量最高的金丝绒抛光垫，其表面绒毛长约 2 mm 且足够柔软。

在我们的制备方案中，抛光液选择的是 Buehler 公司的 0.06 微米系列的 MasterMet，该款抛光液主要成分是 1. 作为研磨颗粒的尺寸为 0.06 微米的二氧化

化硅小球。2. 提供弱碱性环境的次氯酸钠、柠檬酸等化学试剂。该款抛光液的pH值约为9.5。研磨颗粒尺寸为60纳米,可以使得抛光形成的器件表面足够光滑,但是也会带来抛光去除速率慢,磨料消耗大等缺点。抛光过程的示意图如图2.13(b)所示。

2.2.3 铌酸锂片上微盘谐振腔的制备流程

超高品质因子的铌酸锂片上微盘谐振腔的制备采用济南晶正电子科技有限公司生产的商用铌酸锂薄膜晶圆,该晶圆完全保持了铌酸锂体材料优秀的物理性质,如图2.14(a)所示,上层的Z切铌酸锂单晶薄膜厚度为800 nm,中层为约2 μm 厚的二氧化硅层,最下层为0.5 mm厚的铌酸锂晶片衬底,我们将晶圆切割成4 mm $\times$ 4 mm的大小以方便后续加工。

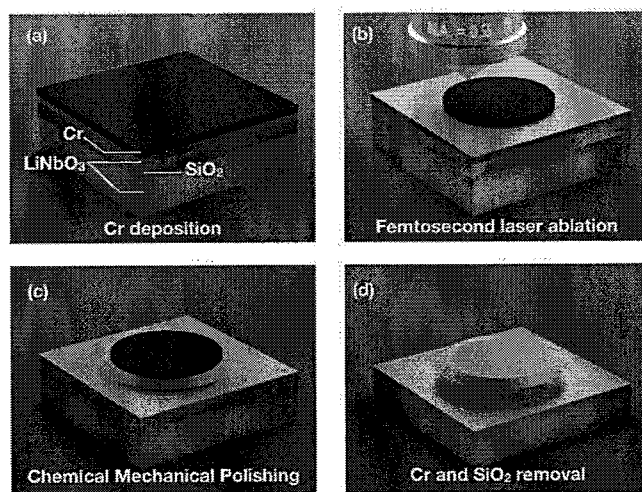


图 2.14 飞秒光刻结合化学机械抛光的制备制备铌酸锂微腔的工艺的流程

Figure 2.14 Illustration of fabrication flow.

如图2.14所示,铌酸锂微盘谐振腔的制备过程主要为以下四步:

1. 金属铬镀膜

在实验中我们采用高真空磁控溅射镀膜机 JCP500,将铌酸锂晶片样品固定在载具上,设定基底温度为100 $^{\circ}\text{C}$,溅射源功率设定为240W。在晶片样品上生长一层300 nm厚的金属铬。这里选择金属铬作为掩膜层主要有两个原因,一是金属铬的莫氏硬度高达8.5,密度达7.19 g/cm 3 ,如果在在化学机械抛光中使用较软的磨料如二氧化硅悬浊液,金属铬膜层可以支撑足够长的时间使得掩膜图案可以完整的转移到铌酸锂层上。二是金属铬可以牢固的键合在铌酸锂层上,不至于

在后续的加工抛光过程中脱落。

2. 飞秒激光直写

使用放大倍率 100 倍、数值孔径 0.8 的物镜将飞秒光聚焦，焦点直径 $\sim 0.8\ \mu\text{m}$ 。样品固定于浅口皿中，置于三维气浮微纳位移平台上，在物镜上固定好喷气的吹嘴，并打开空压机，这样可以通过吹起带走加工过程中产生的碎屑，防止碎屑堆积在飞秒光聚焦的位置，影响加工效果。调整固定样品的二轴俯仰台，使得样品相对于物镜被调平。打开光闸，设置飞秒激光系统最终输出飞秒光中心波长为 1025nm，脉冲宽度设置为 $\sim 270\ \text{fs}$ ，重复频率 200 kHz，出射功率为 1.2 W。使飞秒光聚焦于金属铬膜表面，调节中性密度衰减片，逐渐增大飞秒激光功率，直到功率恰好能破坏铌金属铬掩膜，又不足以破坏铌酸锂薄膜，此时的入瞳功率约为 0.5 mW。通过提前设计好的 G-code 命令，控制气浮三维位移台运动轨迹，画如图 2.6 所示同心圆，每画一个圆直径减少 $\Delta r = 0.8\ \mu\text{m}$ ，重复以上步骤，直到在样品表面留下一个直径 $\sim 90\ \mu\text{m}$ 的圆形金属铬膜。后用去离子水冲洗样品，晶片表面清洁无碎屑。

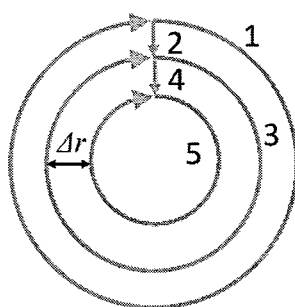


图 2.15 飞秒激光直写聚焦扫描轨迹

Figure 2.15 Scanning trajectory of the focused femtosecond laser.

3. 化学机械抛光

经过飞秒激光直写加工完的样品，会在铌酸锂薄膜表面形成圆形的金属铬掩膜。我需要利用化学机械抛光将铬掩膜转移到铌酸锂薄膜层上，具体操作如下：

1. 固定样品，我们选用可塑树脂，加入 90℃ 的热水使其软化为抛光模具的形状，后将样品固定在树脂上放入冰箱等待其降温硬化。
2. 化学机械抛光前期准备，将金丝绒抛光垫用蒸馏水清洗干净后用自带的背胶固定在抛光机 NUIPOL802 的抛光台上。打开加液器，让抛光液充分浸润抛光垫。这个步骤的目的是为了让抛光

加工过程中全程抛光环境相同。3. 样品抛光, 将用树脂固定好的样品放入抛光模具内, 加上 2 kg 的抛光压块, 提供大约 $0.4\text{N}/\text{cm}^2$ 的抛光压强, 摆臂固定不动, 抛光台转速设为 90 RPM。在抛光过程中未被铬掩膜保护的铌酸锂区域会被逐渐去除, 被铬掩膜保护的区域则会被留下, 以实现飞秒直接形成的铬掩膜图案向铌酸锂薄膜层的转移。在抛光过程中每间隔 1 分钟取下样品在显微镜下观察抛光进度, 直至金属铬掩膜的涂完完整均匀的转移到铌酸锂薄膜层上停止抛光。对于 800 纳米厚 Z 切的铌酸锂薄膜, 整个抛光过程大约时间大约为 12 分钟。

4. 湿法化学腐蚀

化学腐蚀一共分为两个步骤: 一, 铬膜的腐蚀, 在化学机械抛光中铬掩膜往往会有残余, 需要通过腐蚀去除, 在实验中我们选择 Alfa Aesar 公司的商用金属铬腐蚀液 Chromium etchant。将完成抛光的样品正面朝上完全浸没于铬腐蚀液中, 静置约 15 分钟后取出用, 蒸馏水冲洗后用氮气枪吹干。二, 二氧化硅层的腐蚀, 腐蚀完铬掩膜后将样品置于 IMPROVED 公司的商用氢氟酸缓冲液 (BUFFER HF) 中在 20°C 的室温环境下腐蚀 6 分钟 (若室温变化, 腐蚀时间会相应变化), 腐蚀完成微腔边缘会凌空。显微镜照片如图成如图 2.16 所示。



图 2.16 铌酸锂单盘微腔的显微镜照片

Figure 216 Micrograph of single disk microcavity of lithium niobate.

在微腔边缘可见清晰的干涉条纹, 以辅助证所制备微腔的的表面光滑度, 微腔中部的阴影区域为被腐蚀过形成的二氧化硅支柱。

2.3 超高品质因子铌酸锂微腔光学性能表征

为测量所制备微盘腔的回音壁模式分布即扫频透射谱与其品质因子, 采用如图 2.9 所示装置。使用 New Focus 公司的可调谐激光器 TLB 6712 作为激发光源, 激光线宽 10 MHz, 可调谐范围为 720nm 到 780 nm, 所用光功率为 0 dBm。扫频

激光经光纤偏振控制器调节偏振后入射到束腰直径 $\sim 1\ \mu\text{m}$ 的U型光纤锥中,调节其位置,使束腰位置靠近微盘腔,利用光纤锥的倏逝波激发回音壁模式,并将光谱信息耦合出来,导入扫频光谱仪中记录微腔的模式分布。微腔样品固定于三维压电纳米平台(Model MAX312D/M, Thorlabs Co.)上,通过调节微腔与光纤锥的相对位置,可以改变耦合条件,激发不同的回音壁模式。在样品的正上方与侧面均搭建了由物镜和电荷耦合(CCD)摄像机组成的光学显微系统,对微腔与光纤锥的耦合过程进行实时监控,并采用冷光源实现照明。

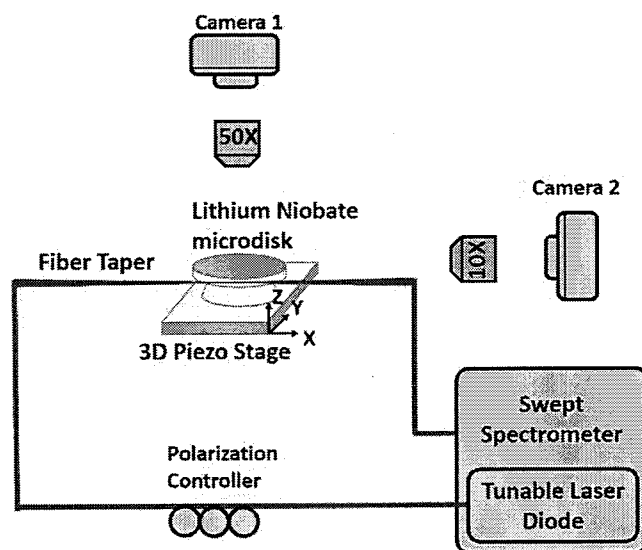


图 2.17 微腔透射谱的测试装置图

Figure 2.17 Experimental setup for characterization of the whispering gallery mode (WGM) distribution of the microresonator.

光纤锥的制备的主要装置的主要部分如图 2.10 所示,由两个线性电动平移台、800 nm 连续半导体激光器、氢气发生器与喷嘴、光功率计和电脑组成。两个电动平移台上的光纤固定卡口需仔细调节至共线,喷嘴位于正中间。将标准 SMF-28 光纤保护层剥去后,用酒精棉擦净,固定在电动平移台上。点燃氢气,控制出气比例(50%~55%),调节火焰大小,预热约三分钟后,控制位移台同时往反向运动,速度控制在 $\sim 80\ \mu\text{m}$,拉制光纤过程中,监测光纤透射率,经历如图 2.10(b)所示单模-多模振荡-单模过程,拉伸约 $\sim 2\ \text{cm}$ 后停止并关火。特别的,在光纤再次变为单模时如果继续拉,会出现如图所示的台阶效应,说明支持的单模界面进一步缩小,光纤变得更细。取下光纤,弯成U型,使光纤锥部分绷直固定在玻片上。固定在调整架上的光纤锥,如下图 2.10(c)箭头所示为光纤锥束腰部分。

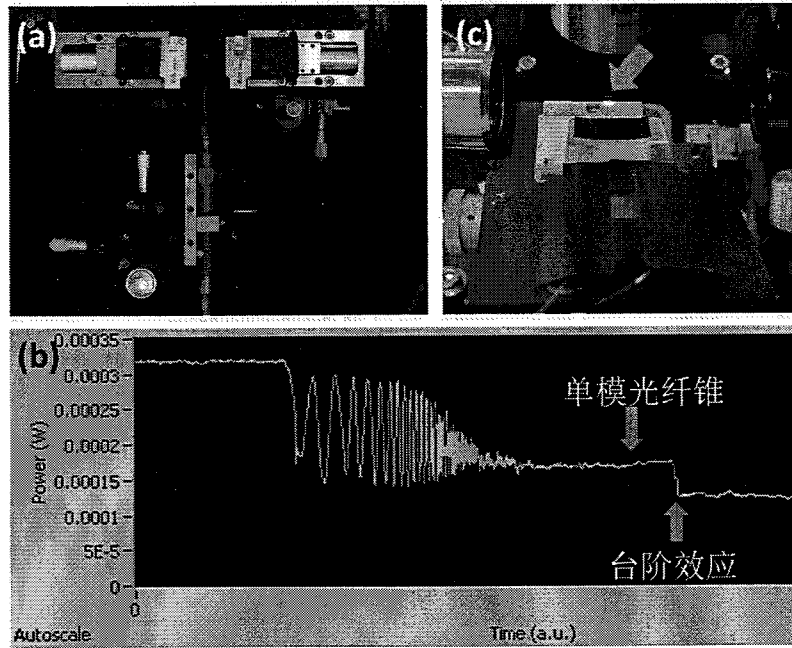


图 2.18 光纤锥的制备 (a) 热拉法制光纤锥的主要装置: 线性平移台与氢氧焰喷嘴 (b) 光纤透过率监测谱线 (c) 光纤锥与微腔样品耦合平台

Figure 2.10 Fabrication of optical fiber taper (a) Main setup for fabricating fiber taper by heat-pull method: Linear moving stage and oxyhydrogen flame nozzle (b) Transmission of the fiber during the pulling step (c) Stage for fiber taper coupling.

使用上述装置, 我们得所制备的铌酸锂微盘谐振腔的在可见光波段 (773 nm~775 nm) 附近的模式分布如图所示, 其自由光谱范围 (free spectral range FSR) 约为 0.45 nm, 图 (b) 中其洛伦兹拟合 (红色曲线) 揭示了在谐振波长 773.49 nm 附近的一个高 Q 模式的半高全宽为 0.053 pm, 品质因子附近高达 1.46×10^7 。

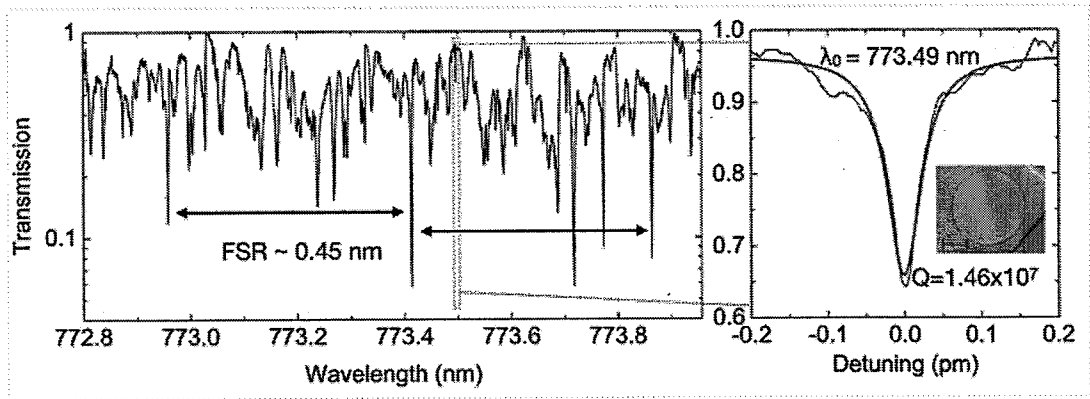


图 2.19 铌酸锂微盘谐振腔的投射谱与品质因子

Figure. 2.19 (a) Transmission spectrum and (b) Q factor

为了更清晰的表征所制备的微腔, 我们拍摄了微腔的扫描电子显微镜照片。其俯视图如图 (a) (b) 所示, 在 7000 倍的放大倍率下微腔表面依然很光滑, 侧

视图如图 (c) 所示, 可见其边缘的楔角为 9.5° , 小楔角的优势在于可以进一步减小模场与器件边缘的接触, 从而减少可能存在的散射损耗提升品质因子。值得注意的是, 其他制备工艺, 如反应离子刻蚀, 受限于刻蚀的轰击方向, 是无法实现如此小的边缘楔角的。

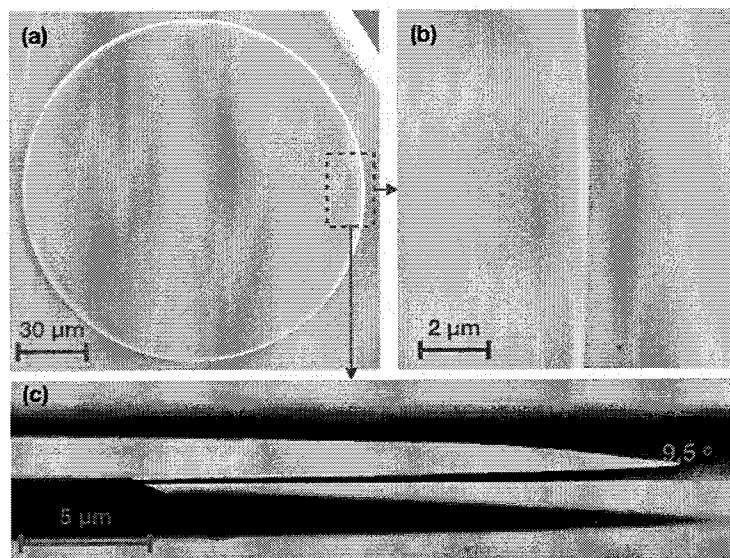


图 2.20 铌酸锂微盘谐振腔的扫描电镜照片 (a) 制备铌酸锂微盘谐振腔的俯视图 SEM 图像。 (b) (a) 中红色框所示区域的高放大倍率的 SEM 图像。 (c) 制备铌酸锂微盘谐振腔的侧视图 SEM 图像

Figure 2.20 Scanning electron microscope image of lithium niobate microdisk resonator (a) Top view SEM image of a fabricated LN MDR. (b) Close up view SEM image of the area indicated by the red box in (a). (c) Side view SEM image of the fabricated LN MDR.

除了透射谱与电镜图外, 我们还利用如图 4.5 的装置测试了该微盘腔的非线性光学特征。我们使用 New Focus 公司的窄带可调谐连续激光器 TLB6728 作为泵浦源, 其线宽 10 Mhz, 出射激光的波长调谐范围为 1510 nm 至 1620 nm, 该可调谐的激光功率经一台铟镓共掺光纤放大器 (工作范围 1530 nm-1570 nm) 放大后, 接入 U 型光纤锥, 该光纤锥是由一根 SMF-28 的光纤通过氢氧焰热拉法拉制而成, 光纤锥束腰直径为 700 nm, 通过三维位移平台靠近微盘并与微盘上表面边缘贴合。而光纤锥的另一个作用是将倍频光信号从微盘腔中耦合出来, 通过微调安装样品的三维纳米平移台, 改变光纤锥与微盘腔的耦合位置, 可以选择性的激发特定的模式分布。

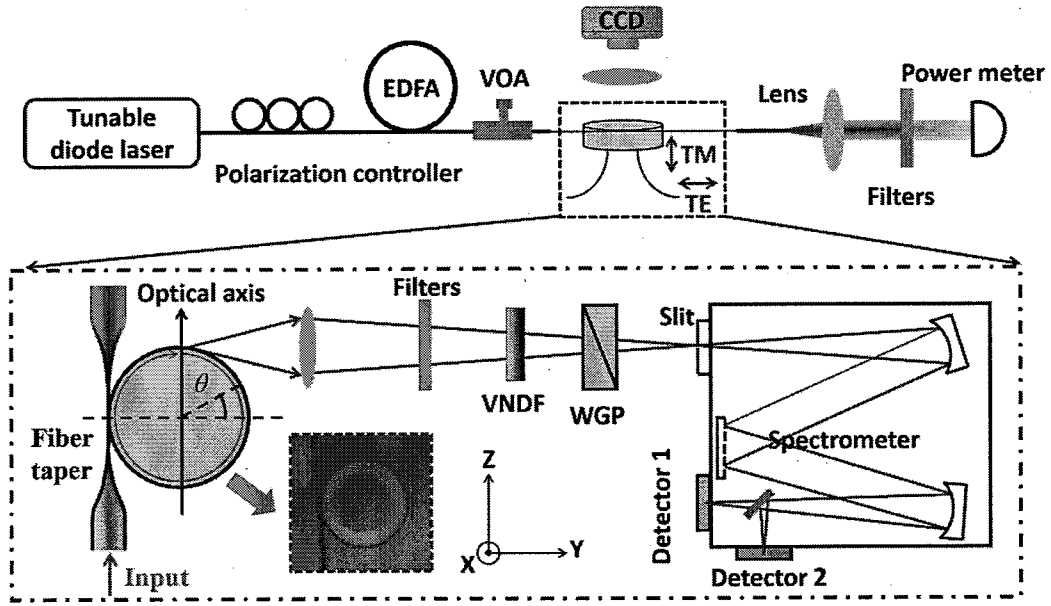


图 2.21 探测微谐振腔中非线性光学过程的实验装置

Figure 2.21 Experimental setup of nonlinear optical processes in the microresonator.

我们通过调节铟镱共掺光纤放大器后的三桨光纤偏振控制器控制泵浦光偏振，激发微盘中的 TM 模。从微腔中耦合出的信号从光纤锥输出端出射，经过一个数值孔径为 0.25 的物镜准直后，通过一个二向色镜分束，将泵浦光与倍频光信号分离，分别由两个光探测器探测。此外，我们用一个放大倍率为 10×、数值孔径为 0.25 的物镜，从微腔的侧面边缘收集散射光，入射到光栅光谱仪 (Shamrock SR-303i-B Andor Technology Ltd.) 的狭缝中心并成像。在光栅光谱仪狭缝前放置一个已经定标的 Glan-Taylor 偏振镜，用于检验基频光与倍频光的偏振。光栅光谱仪所用探测器根据入射光波段不同需要切换。当探测散射光中的基频光时，使用的是一台 InGaAs 探测器 (iDus InGaAs DU490A-1.7, 1100-1700 nm)；探测 770 nm 附近的二次谐波信号中，使用的是一台 CCD 阵列探测器 (Newton DU920, 200-1100 nm) 其中使用了两块短通滤波器 (FESH1000, Thorlabs, Inc.) 来阻挡泵浦激光信号。

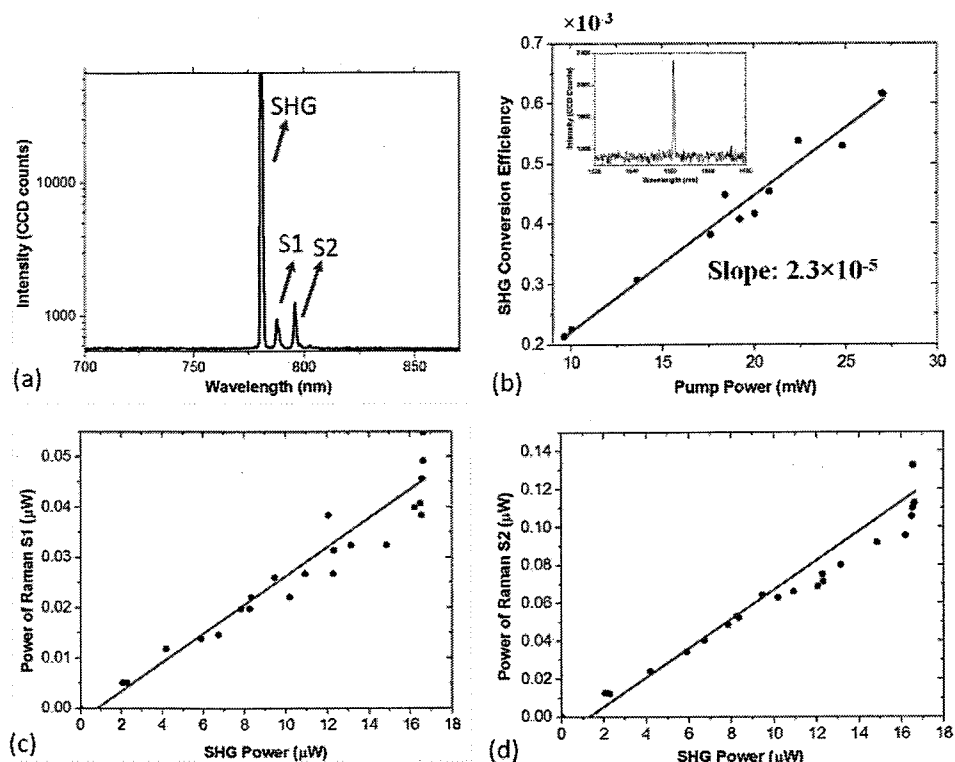


图 2.22 微腔的倍频与拉曼信号 (a) 波长为 775nm 附近的光谱, (b) 倍频转换效率与泵浦功率的关系 (c) 拉曼峰 S1 功率与倍频光功率的关系 (d) 拉曼峰 S1 功率与倍频光功率的关系

Figure 2.22 (a) Spectrum around wavelength of 775 nm (b) SHG conversion efficiency as a function of pump power (c) Power of Raman S1 as a function of SHG power and (d) Power of Raman S2 as a function of SHG Power.

在实验中, 当泵浦激光波长为 1561.22nm, 泵浦激光功率为 27 mW 时, 观察到二次谐波(SHG)和二次谐波信号的拉曼散射等级联非线性光学过程, 如图 4(a)所示。在 780.86nm 波长下, 检测 TE 模式方向上的 SHG 信号。参与拉曼散射的振动模式为 152 cm^{-1} 、 239 cm^{-1} , 从图 4(a)中 SHG 谱附近的拉曼峰 S1、S2 可以看出。二次谐波的信号的转换效率与泵浦功率的关系如图 4(b)所示。可得二次谐波的转换的归一化转换效率可以确定为 $2.3 \times 10^{-5}/\text{mW}$ 。这个结果远低于之前在品质因子为 10^5 的 X 切割铌酸锂微盘谐振腔中得到的结果[156]。可能的原因如下,

1. Z 切铌酸锂微盘有相位匹配难度高于 X 切的铌酸锂微盘腔, 只因 X 切的微盘腔中可以实现环形相位匹配, 而对于 Z 切的铌酸锂微盘腔 TM 与 TE 模式的有效折射率在微盘腔的各个位置变化很小, 故相位匹配更难。
2. 对于我们所制备的超高品质因子的铌酸锂微腔, 其谐振模式的线宽更窄, 故实现倍频波长同时谐振的几率更低难度更高。
3. 使用化学机械抛光所制备的铌酸锂微盘谐振腔的边缘几何构型为楔形, 这意味着不同频率的谐振波长在空间上的模式体积重合变小, 这

也会导致倍频效率变低。

此外,拉曼信号(即 S1 和 S2)的功率与 SHG 功率的关系分别绘制在图 4(c)和 (d)中。结果表明,产生拉曼峰 S1 和 S2 的阈泵浦功率分别为 $0.85 \mu\text{W}$ 和 $1.33 \mu\text{W}$ 。在二次谐波信号的阈值泵浦功率之上, S1 和 S2 处的拉曼信号的功率随泵浦功率线性增加。由图 4(c)、(d)拟合直线的斜率可知,转换效率最高可达 0.28%、0.22%,转化率远高于二次谐波信号的转换效率。这是符合我们的预期,原因如下。首先,拉曼过程不需要相位匹配,而相位匹配是回音壁微腔中实现非线性过程实现高转换效率的难点之一。第二,两个拉曼峰 S1 和 S2 的波长都接近二次谐波波长,表明 SHG 泵浦波和两种拉曼信号波的模式可以实现足够的空间重叠,而这利于实现高转换效率。

值得注意的是,由于我们在开始利用飞秒激光直写结合化学机械抛光制备铌酸锂微腔的时候,实验室中并没有 1550 波段的可调谐激光器。所以很遗憾没有表征铌酸锂微盘谐振腔的在 1550 波段的透射谱和品质因子。在下一节中我们将介绍,在后续的实验当中,我们优化了抛光工艺,并且完成了对铌酸锂微盘腔在 1550 波段的光学特性的表征。

2.4 边缘楔角可调的铌酸锂微盘腔

在前两节中,我们介绍了飞秒激光直写结合化学机械抛光制备铌酸锂微腔和其在可见光波段的光学特性表征。在实验中,我们注意到两个现象,1.实验中所使用的抛光液中二氧化硅的悬浊颗粒的粒径和抛光形成的铌酸锂微盘谐振腔表面的光滑度高度相关;2.随着抛光时间的增加铌酸锂微盘的边缘楔角区域会逐渐收窄。这启发了我们:1. 如果使用更细密的抛光颗粒有可能可以得到品质因子更高的铌酸锂微盘谐振腔;2. 提升所镀铬掩膜的致密度以提升铬掩膜在化学机械抛光中可承受的时间就可能实现对铌酸锂微盘谐振腔的边缘楔角的控制。于是我们开展了如下实验:

我们将 2.2 节中所介绍的铌酸锂微盘谐振腔的制备方案进行了如下改良:1. 将所使用的抛光液更换为了 Buehler 公司的 0.02 微米系列的 MasterMet;2. 更换了更加柔软绒毛长度更长的金丝绒抛光垫;3. 调整了固定样品的方式,由树脂固定更换为了石蜡固定。这三步改良的目的分别是:1. 获得更加光滑的铌酸锂微盘谐振腔的表面以进一步提升品质因子;2. 进一步增加抛光垫的涵养量,以提升在

抛光过程中的铌酸锂薄膜与铬掩膜的去除比。3. 由石蜡固定的样品会突出固定模具表面，以增加与抛光垫的接触面积。

使用改良后的抛光工艺制备出的铌酸锂微盘谐振腔如图 2.23 所示。在 2.23 (b) 中可见，即使在电子扫描显微镜放大 15000 倍的情况下，微盘腔的表面仍然非常光滑。为了得到微盘腔表面的光滑度，我使用原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) 测得了微盘腔表面的粗糙度，粗糙度的均方根 (Rq) 为 0.115 nm，达到了铌酸锂晶胞级别的粗糙度。值得注意的是，济南晶正公司提供的铌酸锂晶圆出厂时的表面粗糙度 Ra 为 0.5 nm，一般而言 Rq 大于 Ra。所以其他制备工艺如反应离子刻蚀等在不会提升原有铌酸锂薄膜光滑度的同时还会引入新的损耗，所以我们有理由相信我们所提出的通过化学机械抛光得到的铌酸锂微片上光子器件的表面光滑度应该是目前所有制备工艺中最高的。

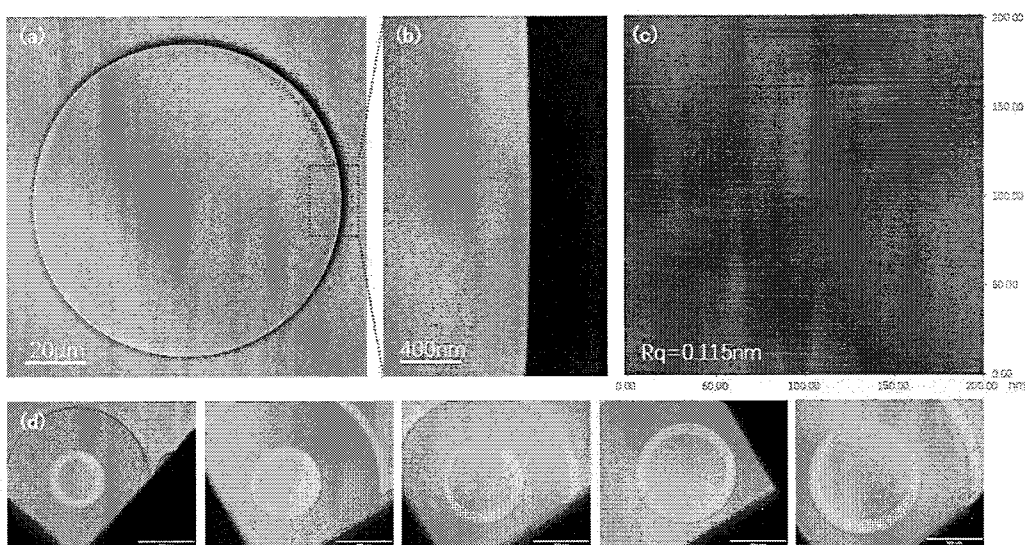


图 2.23 (a)制作的 LN 微盘谐振器的俯视图扫描电子显微镜(SEM)图像。(b)近距离观察(a)中红色框所示区域的 SEM 图像。(c) 铌酸锂微盘腔边缘的原子力显微镜(AFM)图像。(d)不同直径(55 μm 、85 μm 、105 μm 、135 μm 、155 μm 、185 μm 、205 μm)微盘谐振器的光学显微镜图像

Figure 2.23 (a) Top view scanning electron microscope(SEM) image of a fabricated LN microdisk resonator. (b) Close up view SEM image of the area indicated by the red box in (a). (c) atomic force microscope(AFM) image of microdisk wedge. (d) optical microscope image of microdisk resonator with different diameters (55 μm , 85 μm , 105 μm , 135 μm , 155 μm , 185 μm , 205 μm).

我们分别制备了直径为 55 μm 、85 μm 、105 μm 、130 μm 、155 μm 、180 μm 、205 μm 尺寸的铌酸锂微盘腔每个尺寸的样品各三个，并且测得了这些样品在 1550 波段的最高品质因子，并将其品质因子随微腔尺寸变化的关系绘制为散点图 2.24 (a)。图 2.24 (b) 是对样品中直径为 105 微米微盘腔中谐振波长为 1542.34

nm 附近的劈裂模式的洛伦兹拟合，其中红色曲线所拟合的谐振模式品质因子高达 4.7×10^7 ，此为目前位置铌酸锂片上微腔的品质因子的世界记录。同时，所制备的一共 21 个微腔的最高品质因子均超过了一千万，这证明我们所提出的飞秒激光结合化学机械抛光的制备方案用于制备高质量铌酸锂片上微腔是稳定的可重复的。

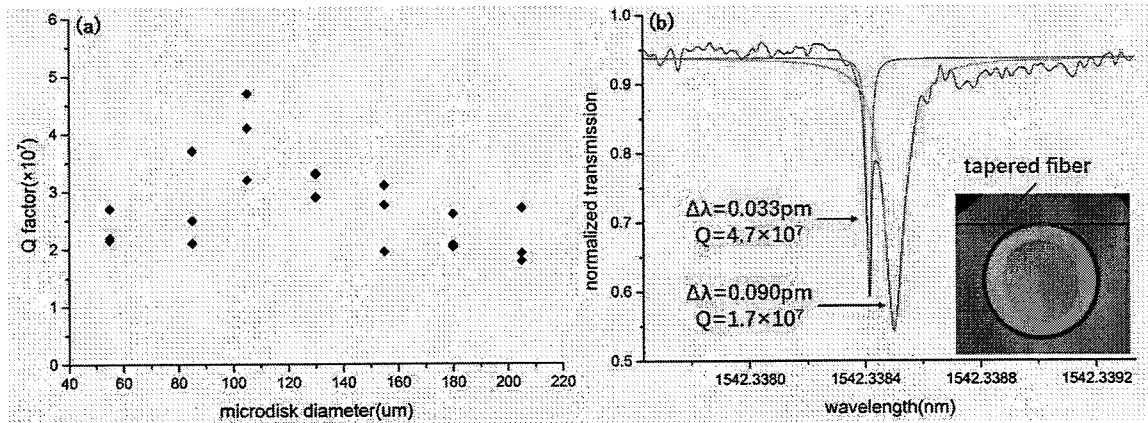


图 2.24 (a)不同直径的铌酸锂微盘腔的品质因子(b)在直径为 105 μm 的微盘腔中对劈裂模式的洛伦兹拟合

Figure 2.24 (a) Measured Q factors of the microdisks of different diameters. (b) The Lorentz fitting (red curve) of a splitting mode in the microdisk of a diameter of 105 μm .

表 2.1.不同尺寸的铌酸锂微盘腔的品质因子

Table 2.1 Q factors of microdisks of different diameters.

Diameter	Q-factors(sample i)	Q-factors(sample ii)	Q-factors(sample iii)
55 μm	2.15×10^7	2.26×10^7	2.74×10^7
85 μm	2.17×10^7	2.51×10^7	3.73×10^7
105 μm	3.22×10^7	4.16×10^7	4.70×10^7
130 μm	2.94×10^7	3.32×10^7	3.30×10^7
155 μm	1.95×10^7	2.76×10^7	3.16×10^7
180 μm	2.03×10^7	2.07×10^7	3.12×10^7
205 μm	1.78×10^7	1.92×10^7	2.67×10^7

此外从图 2.24 (a) 中，我们还可以发现最高品质因子的微腔出现在直径为 105 微米的微腔中，并且在微腔直径超过 100 微米之后，品质因子出现了较为明显的衰减趋势。在本章第一节的分析中关于微腔品质因子的影响因素的分析中，有提到辐射损耗为影响微腔品质因子的要素之一。通常，微腔尺寸越大，辐射损耗越小，相对应的微腔的品质因子也就越高。但是这与我们在实验中观测到的现象不同。接下来我们尝试给这个现象一个合理的猜想。

首先需要明确实验中一个细节，即制备铌酸锂微腔的过程中，湿法腐蚀二氧化硅如果深度很深，铌酸锂微盘腔可能会由于自身的材料强度不足以支撑其重量而出现翘边的问题。一旦翘边微腔变形就无法继续使用了。实验经验是对于 700 纳米后的铌酸锂微盘腔腐蚀深度超过 30 微米，微盘就有翘边的风险，所以在我们的制备方案中，二氧化硅腐蚀深度统一设置为 25 微米。

其次，在我们实验测得的铌酸锂微盘腔的高品质因子腔模有可能会高阶模式，而高阶模式的模场拖尾如果在微盘径向上超过 25 微米就可能会和二氧化硅支柱重合，造成额外的散射损耗，从而降低品质因子。

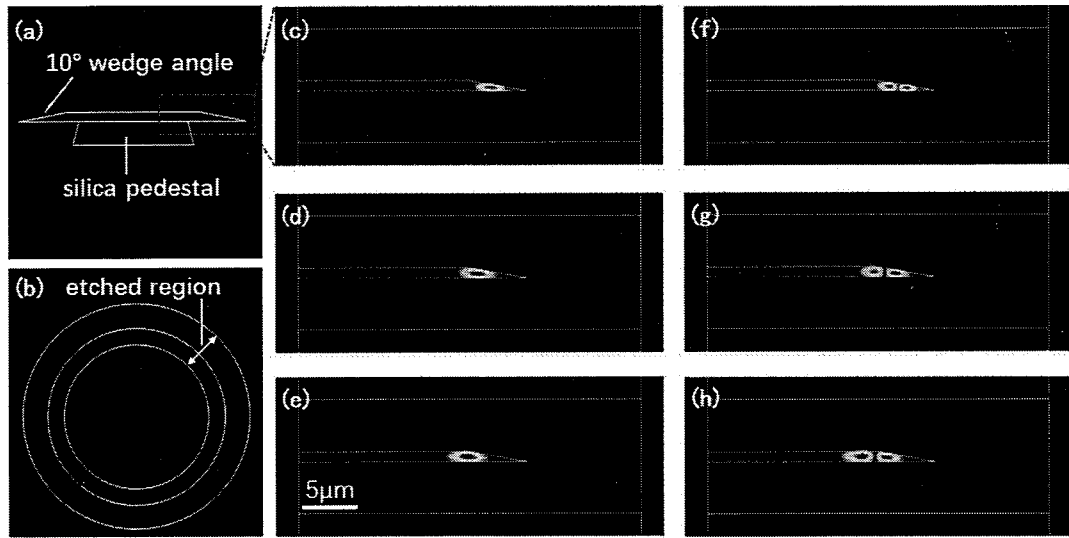


图 2.25 铌酸锂微盘谐振腔的模场分布模拟。微盘结构的侧视图(a)和俯视图(b)。直径为(c) 50 μm , (d) 100 μm , (e) 200 μm 的微盘谐振器的基模。直径为(f) 50 μm , (g) 100 μm , (h) 200 μm 的微盘谐振器的二阶模

Figure 2.25 Side view (a) and top view (b) of structure of simulated microdisk resonator. Fundamental modes in microdisk resonator of a diameter of (c) 50 μm , (d) 100 μm , (e) 200 μm . Second-order modes in microdisk resonator of a diameter of (f) 50 μm , (g) 100 μm , (h) 200 μm .

基于此我们使用 Comsol 公司的 COMSOL Multiphysics 对不同尺寸铌酸锂微腔的模场基于有限时域差分算法进行模拟。结果如图 2.25 所示。其中图 2.25 (a) (b) 是所模拟微腔的几何构型；(c) (d) (e) 分别是 50 μm 、100 μm 、200 μm 的基模电场；(f) (g) (h) 分别是 50 μm 、100 μm 、200 μm 的二阶模式电场。可见随着微腔尺寸的增大，无论是基模还是高阶模式的模场体积都会增大，模场分布都会更倾向于靠近微腔中心。这就意味着有可能在我们所制备的铌酸锂微盘腔尺寸超过 105 μm 后，所测得的高品质因子模式的模场拖尾可能会碰到只有 25 μm 深的二氧化硅支柱，从而导致品质因子降低。当然，在这里我们只是进行了

定性的分析, 更严谨的解释与分析可能是我们下一步的工作。

在实验中, 除了上述微盘腔与微盘尺寸关系了研究, 我们还实现了对于微盘边缘楔角的控制。如图 2.26 (a) 的铌酸锂微盘腔的扫描电子显微镜的侧视图所示, 我们在厚度为 800 nm 的铌酸锂薄膜式中实现了直径为 125 微米的微盘腔的边缘楔角 9° 至 51° 连续可调。

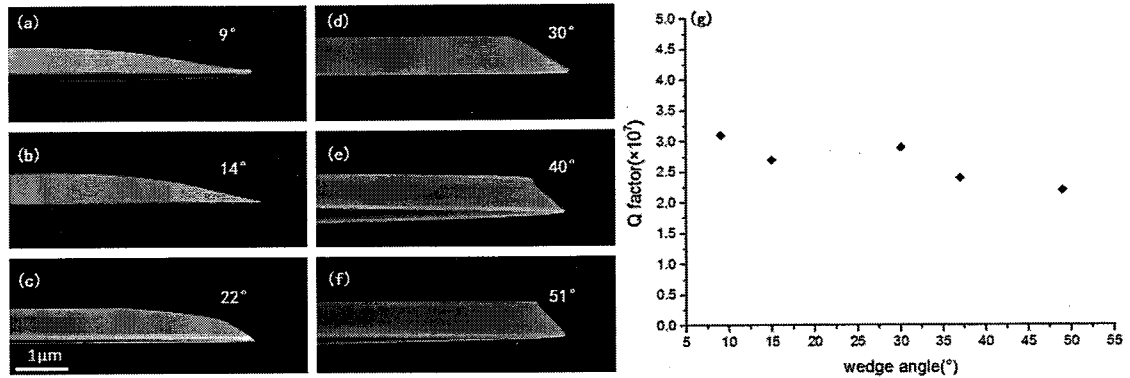


图 2.26 (a)-(f) 9° , 14° , 22° , 30° , 40° 以及 51° 边缘楔角的铌酸锂微盘腔的扫描电镜侧视图 (g) 不同边缘楔角的微盘腔的品质因子

Figure 2.26 (a)-(f) Side view scanning electron microscope (SEM) image of fabricated LN microdisks with different wedge angles of 9° , 14° , 22° , 30° , 40° and 51° , respectively.

(g) Q factors of microdisks of the different wedge angles.

可见在我们的制备方案中可以灵活控制所制备的铌酸锂微盘腔的边缘楔角, 在后续的实验中, 通过进一步优化抛光工艺, 可以将边缘楔角调控范围扩展到 9° 至 85° 。这个角度控制范围收到如下因素限制: 1. 微盘边缘楔角很难比 9° 更小, 并不是因为抛光工艺无法实现, 而是因为边缘楔角小于 9° 的情况下, 微盘腔边缘的铌酸锂薄膜有很大区域较薄, 这会导致腐蚀去除二氧化硅后, 微盘腔边缘的材料强度无法支撑自身的重量, 从而导致边缘崩坏。2. 微盘边缘楔角在 70° 以上时, 其制备难度会很大, 原因如下。随着化学机械抛光时间增长, 未被铬掩膜保护的铌酸锂薄膜去除量就会变大, 从而导致微盘腔边缘楔角逐渐变大。但在实验中我们发现, 铬掩膜图案完成基本的转移后, 即微盘腔腔的边缘楔角大于 30° 后, 楔角变大的速度就会放慢, 这导致抛光制备边缘楔角较大的微腔就需要更多时间 (微盘边缘楔角 51° 时所需要的化学机械抛光时间 ~ 26 min 是 9° 时 ~ 10 min 的 2.6 倍)。所以很多情况下, 在微腔未被抛光至所需要的角度时, 由于抛光时间过长, 铬掩膜就已经被抛光去除干净, 无法继续完成抛光过程。

在楔角改变的同时, 我使用如图 2.9 的铌酸锂微盘腔的品质因子的测试装置

测得了不同边缘楔角微盘腔在 1550 波段的品质因子，并将品质因子随微盘腔的边缘楔角的变化关系绘制成散点图如图 2.26 (b) 所示。可见，使用飞秒激光直写结合化学机械抛光工艺所制备的不同边缘楔角的铌酸锂微盘的实载品质因子均超过了 2.0×10^7 ，说明在通过抛光工艺控制微盘边缘楔角的同时并没有牺牲微盘腔的表面光滑度。同时不同边缘楔角对微腔品质因子的影响并未见明显趋势。按照实验前的猜想，我们认为小角度的边缘楔角的微盘腔的 Q 值可能会更高，因为其模场被压缩，与微腔表面接触更少，从而散射损耗更小。但这并未从实验结果中体现出来，我们猜测可能原因是：1. 不同边缘楔角的微盘表面都足够光滑，从而导致散射损耗在我们所制备的微盘腔中并不占主导。2. 所测得的微盘腔的品质因子大都出自其高阶模式，高阶模式的模场与微盘腔表面接触相对于低阶模式更少，所以其散射损耗所贡献的光场损耗占比更小。

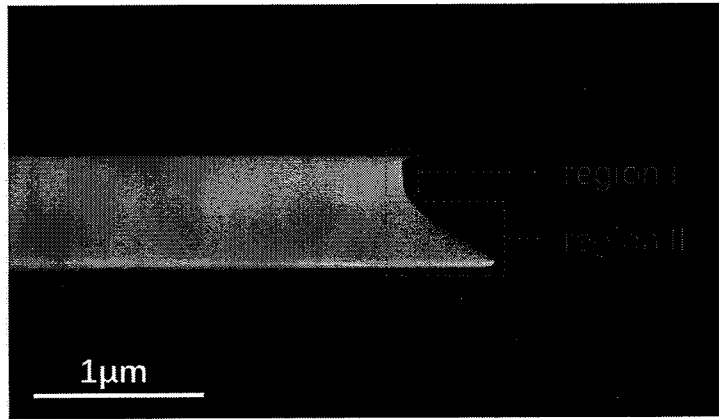


图 2.27 抛光时间超过 90 分钟的铌酸锂微盘谐振腔的扫描电子显微镜的侧视图

Figure 2.27 Side view scanning electron microscope (SEM) image of a fabricated LN microdisk resonator with a long polish duration of 90 mins.

最后，我们在实验中注意到，在某些样品中，我极大增加其抛光时间会得到如图 2.27 中所示的侧面构型。其大体可以看作两部分组织，一是图 2.27 中所示的 region I 所示的垂直侧壁部分；二是图 2.27 中所示的 region II 所示的延申出来的楔角部分。测得区域 I 和区域 II 的厚度分别为 280 nm 和 420 nm。形成如此构型的动力学过程需要以系统的方式在之后进行进一步的研究。值得注意的是在本文第三章制备铌酸锂单模波导的工作中，我们会用到这个结果。

综上本节的工作表明，在不破坏微盘腔品质因子的情况下，铌酸锂微盘腔的楔角可以从 9° 到 51° 连续可调，这对其在非线性光学领域应用至关重要，因为微盘中的模式色散曲线是其边缘楔角的函数。因此，我们的楔角连续可调的研究

结果对于与非经典光源的产生、光梳产生以及光力学的应用都具有重要意义。

2.5 本章小结

在本章我们主要介绍了我组首创的飞秒激光直写辅助的化学机械抛光的制备技术在制备铌酸锂微盘谐振腔上的应用。我的主要工作如下：

1. 创新性将化学机械抛光引入铌酸锂片上光子器件的制备工艺中，并且发展出了一套完整高效的制备方案。
2. 成功制备了超高品质因子的铌酸锂微盘谐振腔，测得其品质因子高达 1.47×10^7 ，创下了当时的铌酸锂片上微腔的品质因子的世界记录。
3. 进一步优化了抛光工艺，将铌酸锂微盘谐振腔的品质因子提升至 4.70×10^7 ，并用 AFM 测量其表面粗糙度 R_q 为 0.115 nm。
4. 研究了在此套制备方案下铌酸锂的微盘谐振腔的品质因子随微盘腔的尺寸变化的规律，给出了猜想，并进行了数值计算验证。
5. 利用化学机械抛光技术的优势，实现了铌酸锂微盘谐振腔的边缘楔角 9° 至 51° 的连续可调，为铌酸锂微腔中的光场模式调控特别是模式色散的控制提供了一个额外的自由度。

本章的工作为大规模高效率生产超高品质因子的铌酸锂片上谐振微腔铺平了道路，为铌酸锂片上光子器件的应用提供了更多可能。

第3章 高折射率对比度的铌酸锂单模波导的制备

光波导是光子集成器件的重要组成部分。对于光波导而言重要是，波导应具有较强的光场束缚能力以至于光波导可以实现较小的小弯曲半径，从而提升光子芯片的集成度。波导束缚光的能力可用折射率对比度 $k = \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}$ 来描述，其中 n_1 为波导层折射率。同时，波导还应具有低传播损耗和优良的电光调谐性能，以便于高效准确的信号传输、调制以及重构的光信号。为此，片上铌酸锂单晶薄膜(LNOI)是一种极佳的备选材料。在本章的工作中，我们完成了在铌酸锂单晶薄膜上制备低损耗的红外单模波导(1550nm)。所使用的技术被称为光刻术辅助化学机械刻蚀(photolithography assisted chemo-mechanical etching, PLACE)，它依靠飞秒激光微加将刻蚀金属铬刻蚀为掩模形状，后利用化学机械抛光将铬掩膜图案转移到铌酸锂薄膜上。所制备的高折射率对比度单模波导的传输损耗为 0.130 ± 0.008 dB/cm。

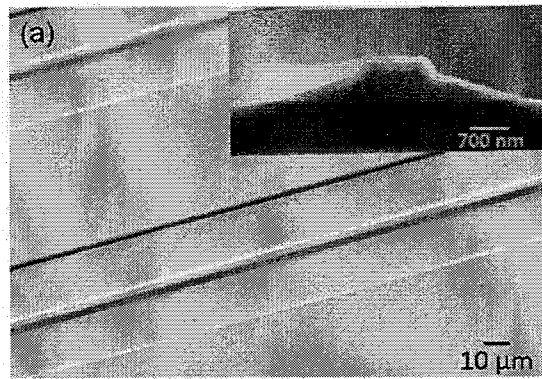


图 3.1 基于 PLACE 技术制备的五氧化二钽覆盖下的铌酸锂单模波导

Figure 3.1 Lithium niobate single mode waveguide covered by tantalum pentoxide based on PLACE technique.

在此前的工作中，我组已经通过光刻辅助化学机械蚀刻制备出了超低损耗铌酸锂单模波导[154]，如图 3.1 所示，所制备脊型波导的截面为梯形的，上沿宽度为 1 微米、下沿宽度为 4.2 微米，波导损耗低至 0.042 ± 0.02 dB/cm，这是目前已经被报道的铌酸锂片上波导的工作中，传输损耗最低的。但是不可忽视的是在这种制备方案中，所选用的覆盖层材料为五氧化二钽，与铌酸锂波导层的折射率差值不足 0.3，折射率对比度仅为 0.13，这导致波导中的的铌酸锂 TE 模式模场大小约为 2.5 微米，对于光场的束缚较弱，转弯半径大于 300 微米，不利于片上

光子器件的高集成度应用。

所以我们需要发展一套高折射率对比度的铌酸锂单模波导的制备方案，即二氧化硅覆盖下的铌酸锂单模波导制备方案，当覆盖层材料为二氧化硅时，波导的折射率对比度到达了 0.53，此时波导转弯半径通常小于 100 微米。但是这对加工工艺提出了新的挑战，其中最主要的也是最难克服的是高折射率波导的需要较小横截面尺寸。假定包层材料为二氧化硅，下面我们通过数值计算，确定所需要的高折射率对比度的铌酸锂单模波导的几何尺寸条件。

3.1 高折射率对比度铌酸锂波导的临界单模模拟

实验中，关于铌酸锂单模波导的临界条件模拟，采用的是由加拿大 Lumerical Solutions 公司出品的 MODE Solution 软件，基于有限时域差分算法完成的，设置好包层（覆盖层与衬底层均设置为二氧化硅）与波导层（铌酸锂）的折射率参数，构建好波导几何构形，在固定厚度下通过逐渐变化波导尺寸（上下沿宽度）以得到在固定厚度固定几何构形下的铌酸锂单模条件。首先我们考察标准梯形脊状波导，梯形腰与下沿的夹角设置为 45° ，分别得到了铌酸锂波导厚度在 300 纳米、250 纳米、200 纳米时在二氧化硅覆盖层下 1550 纳米波段的单模临界条件如图 3.2 所示（尺寸比临界条件大即会出现高损耗的二阶模式）。

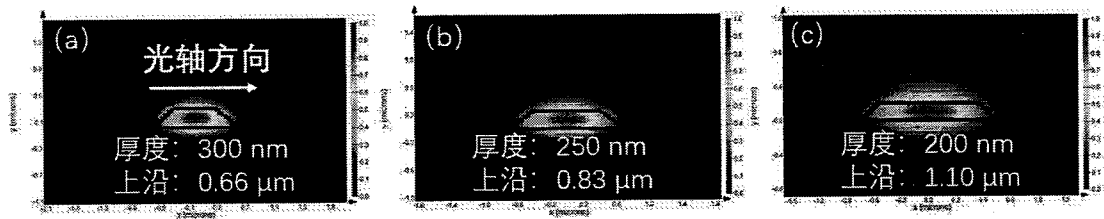


图 3.2 截面为梯形的铌酸锂单模波导的临界条件模拟

Figure 3.2 Critical condition simulation of a single mode lithium niobate waveguide with trapezoidal cross section.

接着我们考察矩形脊状波导的情况，同样得到了铌酸锂波导厚度在 300 纳米、250 纳米、200 纳米时在二氧化硅覆盖层下 1550 纳米波段的单模临界条件如图 3.3 所示。

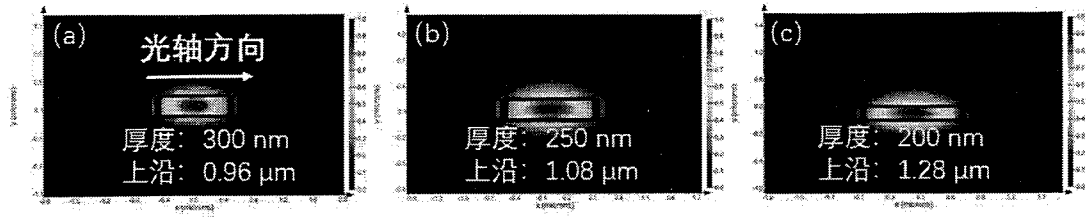


图 3.3 截面为矩形的铌酸锂单模波导的临界条件模拟

Figure 3.3 Critical condition simulation of a rectangular lithium niobate single mode waveguide.

对比矩形波导与梯形波导,我们发现当波导侧壁与波导下沿的夹角由 45° 变为 90° 时,波导在 1550 波段的单模条件在 300 纳米、250 纳米、200 纳米的波导的厚度时,分别有 45%、31%、16% 的尺寸条件放宽。但是对于加工飞秒激光结合化学机械抛光制备铌酸锂波导的工艺而言,无论是小尺寸的波导宽度还是垂直度较高的波导侧壁都是极具挑战性的。

考虑到第二章中如图 2.27 中所得到的铌酸锂微盘谐振腔的抛光结果,我们猜想对于波导结构在长时间的抛光下侧壁应该会出现相似的构型,这意味着无论是上述所提到的梯形还是矩形的波导截面构型,可能都不是我们最终通过 PLACE 技术所制备出的铌酸锂波导构型。所以我们接着对如图 2.27 中这种复合构型进行的单模条件模拟。将几何条件设置为薄膜厚度顶部的 50% 为侧壁垂直的矩形,厚度底部的 50% 为等腰梯形(梯形腰与下沿的夹角设置为 45°),分别得到了如图 3.3 所示的 1550 纳米波段下铌酸锂波导厚度在 300 纳米、250 纳米、200 纳米时的临界单模条件。

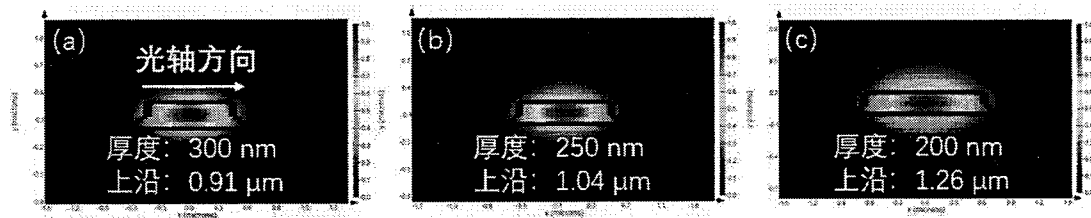


图 3.4 截面为复合构型的铌酸锂单模波导的临界条件模拟

Figure 3.4 Critical condition simulation of a lithium niobate single mode waveguide with a composite configuration.

基于进行此实验时的飞秒激光加工条件,我们选择如图 3.4 (b) 中的几何参数作为我们加工的目标参数。主要原因如下: 1. 当时飞秒激光加工的铬掩膜宽度如果小于 0.8 微米,则在接下来的化学机械抛光中铬掩膜由于其宽度过窄,侧面收到抛光刻蚀将占主导,导致无法顺利将铬掩膜图案转移到铌酸锂薄膜层上。而

且掩膜越窄，掩膜转移难度越大。2. 基于当时抛光工艺技术，我们无法在保证成品率的情况下的将波导侧壁抛光至完全垂直，故无法使用如图 3.3 中的矩形构型。考虑到数值模拟结果复合构型对于波导上沿宽度的要求相对于矩形构型没有严格太多（200 纳米、250 纳米、300 纳米的情况下，波导上沿的临界宽度分别减小 50 纳米、40 纳米、20 纳米）。

3.2 高折射率对比度铌酸锂波导的制备

在我们的实验中，制备铌酸锂波导的材料是在济南正电子有限公司生产的 300 nmX 切的铌酸锂薄膜晶圆，其晶圆的多层结构如图 3.5(a)所示，300 nm 铌酸锂薄膜下是 4 μm 厚的 SiO_2 层结合， SiO_2 层下是 500 μm 厚的 Si 衬底层。

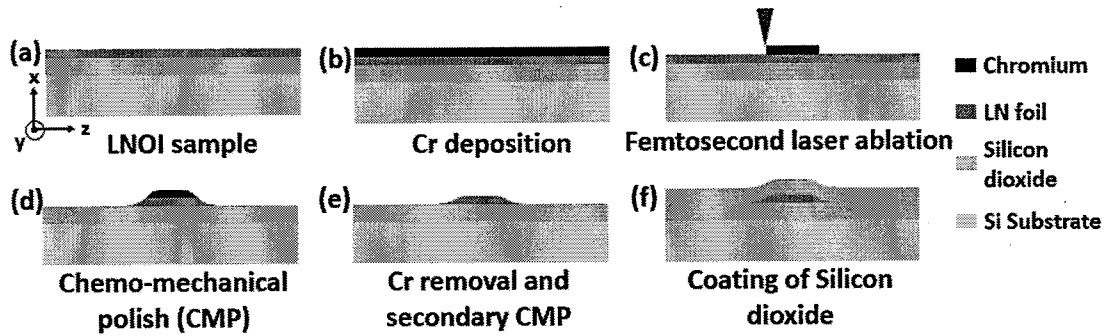


图 3.5 高折射率铌酸锂单模波导的制备流程图 (a) 铌酸锂薄膜的构型 (b) 金属铬膜的生长 (c) 飞秒直写形成铬掩膜图案 (d) 化学机械抛光将铬掩膜图案转移到铌酸锂薄膜层上 (e) 化学腐蚀去除铬同时进行二次抛光 (f) 二氧化硅层的沉积

Figure 3.5 Process flow of fabricating high-index-contrast single mode lithium niobate waveguides. (a) Configuration of LNOI wafer. (b) Deposition of Cr layer on top of the LN thin film. (c) Femtosecond laser micromachining of Cr film to form the stripe pattern. (d) Transferring the mask pattern from the Cr to LN by chemo-mechanical etching. (e) Removal of Cr followed by a secondary CMP. (f) Coating the LN waveguides with the SiO_2 cladding layer.

工艺流程如图 3.5(b)-(f)所示，包括(1)磁控溅射在 LNOI 表面沉积厚度为 400 nm 的薄层铬(Cr)(图 3.5(b));(2)利用飞秒激光烧蚀法制备金属铬掩膜形成宽度约 1.25 微米的波导掩膜(图 3.5 (c))，此步骤中采用中心波长为 1025 nm、脉冲宽度为 170 fs、全宽度为 13.8nm 的光纤飞秒激光器(PHAROS, LIGHT CONVERSION)，平均功率入瞳为 0.1 mW。同时利用 100x 物镜(M Plan Apo NIR, Mitutoyo Corporation, NA0.7)产生一个紧聚焦的光斑其直径约为 0.8 μm ，值得注意的是在这里飞秒激光刻蚀铬掩膜的步骤可以使用其他光刻技术代替，如紫外光刻。(3)通过化学机械抛光蚀刻 LNOI 层，将 Cr 掩膜的图案转移到 LN 膜(CMP)上(图 3.5(d))。

(4)化学湿法蚀刻去除 LNOI 表面残留的 Cr 掩膜(图 3.5(e))。(5)利用等离子体增强的化学气相沉积(PECVD)技术在铌酸锂波导上沉积一层 2 微米厚二氧化硅,形成包层。

在本节后续提到了工作中还包括图 3.5 中未提及的波导两侧的调制电极的制备,其过程很简单主要包括两部,1. 利用磁控溅射在样品表面镀上一层 10 纳米的铬,后在金属铬上镀上一层 150 纳米后的金。2. 利用飞秒激光直写,将电极加工至所设计的图样。这里镀铬金电极的目的是利用金良好的导电性和化学稳定性充当电极的主体,同时利用铬作为键合层增加电极与样品键合的牢固程度。

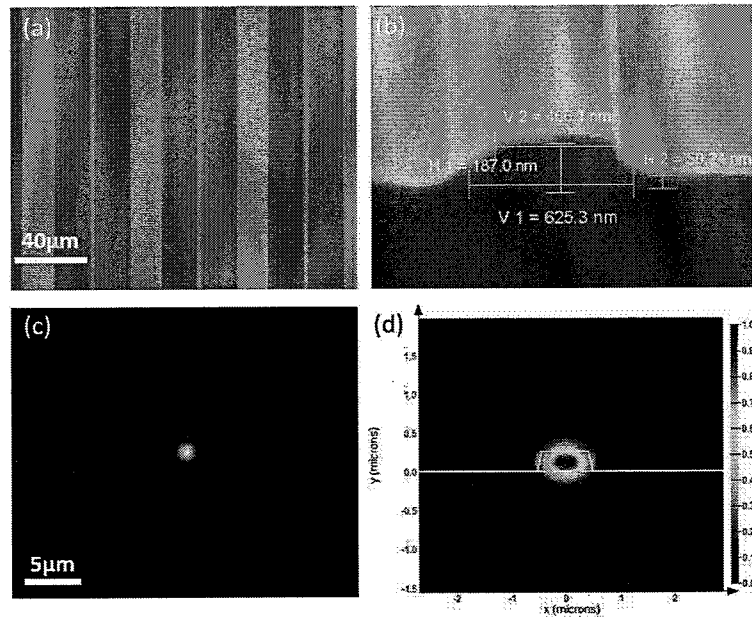


图 3.6 (a) 制备的 LN 波导的俯视图扫描电镜(SEM)图像(b) LN 波导的横截面扫描电镜图像 (c) LN 波导中 1550 nm 处的红外光模场 (d) LN 波导中 TE 模式的模拟电场

Figure 3.6 (a)Top view scanning electron microscope (SEM) image of a fabricated LN waveguide (b) cross-sectional view SEM image of LN waveguide. (c) Infrared light mode field at 1550 nm in the LN waveguide. (d) Simulated TE electric field in the LN waveguide.

然而,金属铬与铌酸锂的抛光去除速率的限制,以前我组报道的用 PLACE 制备的铌酸锂波导厚度与宽度的比值大于 1.5、侧壁倾角小于 30° 。在这里,我们对 CMP 过程进行了更严格的控制,以产生几乎垂直的高折射率对比度 LN 波导侧壁。最后,在总化学机械抛光时间为 18 分钟的情况下,得到了波导的顶部和底部宽度分别为~466 nm 和~625 nm 的构型,如图 3.6 (a)和(b)的俯视图和横断面 SEM 图像所示。结果表明,PLACE 制备技术能够制备出与离子干刻蚀制备的波导具有相同几何尺寸的波导,同时,SEM 图像显示出超高的表面光滑度,这是利用 CMP 技术的特征。。需要注意的是,图 3.6(b)展示的是我们利用当前 PLACE

技术可制备的最小线宽的铌酸锂波导, 在后面的实际实验中, 为了保证铌酸锂波导在可靠性和可重复性, 所使用波导方面比图 3.6 (b) 中所示的波导的顶部宽度略宽, 顶宽约为 1.05 微米。图 2 (c) 通过浜松公司生产的红外电荷耦合器件 (CCD) 捕获的单模波导的光场模式分布照片, 确定了改波导在 1550nm 波长处的单模特性。同时测量出了其 TE 模式的半最大全宽度 (FWHM) 为 $\sim 0.9 \mu\text{m}$ 。图 3.6 (d) 模拟了这个尺寸下的铌酸锂波导光场, 在仿真计算中采用 Lumerical 的 MODE SOLUTION 进行。波导配置设置为相同的几何形状, 作为 sem 的结果。在 1550 nm 波长下的折射率为 2.14 (ne)。覆盖材料和衬底材料为二氧化硅。计算网格精度为 150nm, 即波长的十分之一, 可见得到的模场分布与实验所得结果吻合的很好。

应该注意的是, 回顾铌酸锂的制备工艺, 其和互补金属氧化物半导体 (COMS) 工艺是不兼容的。此前, 铌酸锂脊型波导的制备方案采用电子束光刻 (EBL) 和电感耦合等离子体反应离子刻蚀 (ICP RIE) [120, 123, 124]。与我们的飞秒激光烧蚀技术相比, EBL 在加工精度方面确实有优势, 但它只能在真空环境下操作, 而且聚焦范围很小。飞秒激光烧蚀可以应用于大气环境, 且聚焦范围大, 处理效率高。与我们的 CMP 技术相比, 采用 ICP RIE 处理的铌酸锂波导表面光洁度差, 波导损耗大。此外, ICP RIE 设备也要贵得多。基于这些考虑, 我们提出的制造方案在成本和加工效率方面具有很大的优势。

3.3 铌酸锂多模干涉耦合器与锥形波导

多模干涉耦合器 (multi-mode interference coupler, MMI) 是片上光子器件的重要元件之一, 可应用与功分器 (Power splitter)、马赫曾德干涉仪 (Mach Zehnder interferometer, MZI) 等。其原理是基于多模干涉, 在特定位置处形成自成像, 周期性地复现输入光场。典型的 MMI 由三部分组成, 即输入波导, 多模波导区域和输出波导。多模波导区域的宽度较宽, 可支持多个高阶波导模式, 光场在多模波导区域不同阶数模式的相位累计不同, 当多模波导区域的长度满足一定条件是, 各个模式形成增强干涉, 光场得以复现, 即自成像效应 (Self-imaging effect)。根据不同的入射条件, 多模干涉可分为 1) general interference, 2) paired interference, 3) symmetric interference [155]。在本章的工作中, 我们考虑到, 相较定向耦合器 (directional coupler DC), 多模干涉耦合器具有更强的鲁棒性, 加工容差更大, 且更容易实现多口输出多口输出的功能, 在复杂的光子芯片上应用前景更大, 故

我们选择制备 MMI 而非 DC。

相较于第二章所加工微盘结构，本章需要加工的多模干涉耦合器、环形延时线等结构更复杂加工时间更长，直接用 G-code 语言编写加工程序工作量太大且不易调整修改，故我们使用 python 作为工具编写代码生成响应的 G-code 代码，本章作用到的多模干涉耦合器和环形延时线结构的 python 代码附在本章的最后。采用相同 PLACE 工艺制作的基于多模干涉(MMI)的 2×2 的分束器的 SEM 图像如图 3.7 (a) 所示。其多模干涉区域的几何尺寸为，厚度 280 纳米、长 252 微米、宽 18 微米，四个端口镜面旋转对称，同侧量端口距离 6 微米。输出输出波导尺寸为厚度 250 nm，上沿宽度 1.05 微米。如图 3.7 (a) 中右上角插图所示，在单口光输入的情况下，输出的光场强度比值即分光比为 48.4%:51.6%，接近五五分光，同时，基于 Comsol 公司的 COMSOL Multiphysics 的模拟结果与实验结果一致如图 3.7 (b) 所示。

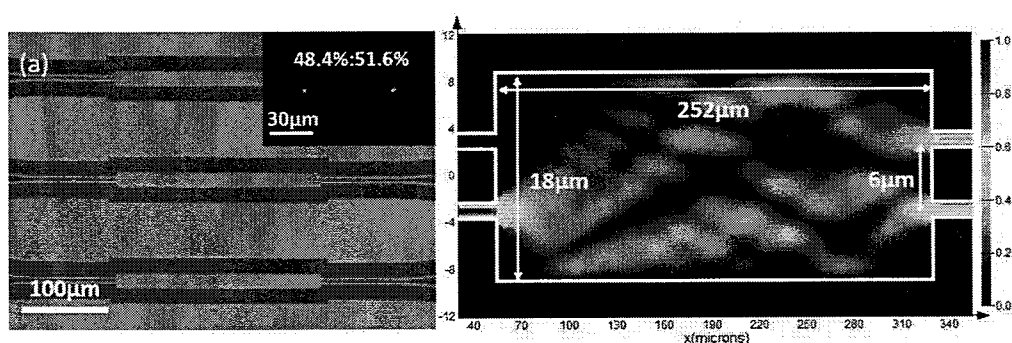


图 3.7(a)多模干涉(MMI)耦合器的俯视图扫描电子显微镜(SEM)图像(b)模拟 MMI 耦合器中的 TE 电场

Figure 3.7(a) Top view scanning electron microscope (SEM) image of a multi-mode interference (MMI) coupler. (b) Simulated TE electric field in the MMI coupler.

另一个近年来备受关注的光子集成电路(PIC)技术问题是光纤到片上波导的耦合。虽然我组在此前的工作是，实现了在锥形光纤和覆盖 Ta_2O_5 包层的铌酸锂波导之间的高效耦合，耦合效率高达~1.3 dB[125]，但由于高折射率比波导的模场尺寸要小得多。对于 1550 纳米波段的临界脊型铌酸锂单模波导而言，二氧化硅覆盖下的模场半高全宽约为五氧化二钽覆盖下的模场的半高全宽的 30%。因此锥形光纤和覆盖 Ta_2O_5 包层的铌酸锂波导之间的耦合技术不能直接应用于高折射率比波导。因此，在光纤侧，我们使用了光纤透镜（透镜锥角约为 90° ），在铌酸锂波导侧，同时制作了如图 4(a)所示的波导锥来放大模场，从光纤和铌酸锂片上两方面去实现模场匹配，从而提升耦合效率。片上铌酸锂的波导椎这可以简单

地通过在 CMP 蚀刻过程之前选择性地去除锥度区域中的 Cr 掩膜来实现。图 4(a) 上排图片从左到右分别为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 、 $70\text{ }\mu\text{m}$ 、 $90\text{ }\mu\text{m}$ 和 $110\text{ }\mu\text{m}$ 不同锥度长度锥形铌酸锂波导。图 4(a) 下排为对应的不同锥度长度锥形铌酸锂波导出射光场分布的红外 CCD 照片。可以观察到光斑由直径为 $\sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 的圆形光斑演变为横向直径为 $\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 的高椭圆光斑。当锥形波导长度为 $110\text{ }\mu\text{m}$ 时, 光斑横向尺寸的扩展使波导的耦合效率从 1% 提高到 15%。我们相信通过对波导锥度和透镜光纤的优化, 可以获得更高的耦合效率, 这将是下一步的工作内容。

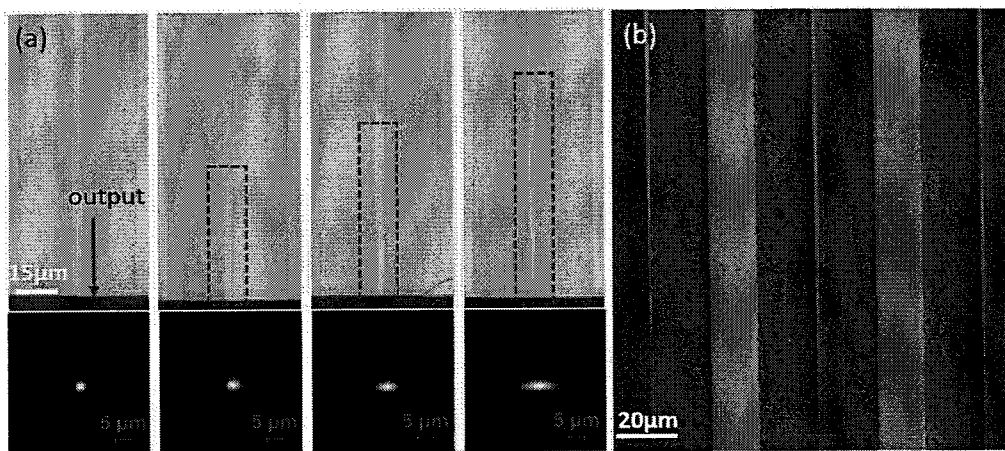


图 3.8 (a) 所制备的波导锥度(红虚线框)和其模场分布的红外 CCD 照片(下行) (b) 波导锥度俯视图 SEM 图像

Figure 3.8 (a) Micrographs (upper row) of the fabricated waveguide taper (red dashed box) and mode profiles (lower row) at the different positions indicated by the r. (b) Top view SEM image of waveguide tapers.

3.4 基于完美分光的马赫曾德干涉仪和环形延时线的波导损耗测量

在实验中, 我们考虑如何表征波导损耗时, 有如下两个备选方案 1. 通过测量使用同样工艺制备的具有同样截面构型的铌酸锂单模微环谐振腔的品质因子去推到其对应的波导损耗, 这种方法我组在第一次利用 PLACE 技术制备铌酸锂波导时使用过, 如图 3.9 所示。2. 使用五五分光的分束器, 将光 1: 1 分到不同长度的波导中, 通过对比其出射功率, 推算出波导损耗。第一种方法这种方法的优势在于灵活快捷且工艺难度小。但是这属于间接测量, 并不能直接说明所使用的制备工艺在大尺寸的波导制备中依然可以保证较高波导品质。第二种方法, 优势在于其属于直接测量波导损耗, 对于证明该工艺制备的波导的应用潜力更具说服力, 难点在于 PLACE 技术所制备的铌酸锂波导损耗低, 这就需要制备出很长的铌酸锂波导才能在输出端口的检测到足够大的功率差, 从而获得可靠的损耗数

据，这导致加工晶片尺寸大、加工难度大。

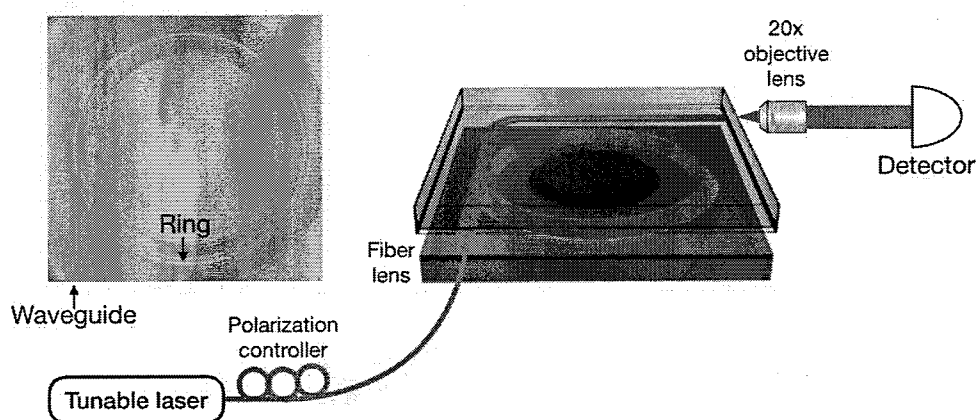


图 3.9 通过测量微环品质因子的方法表征对应构型的波导损耗

Figure 3.9 The waveguide loss was characterized by measuring the microring quality factor.

综合考量上述两种方法，我们还是选择了难度更大的第二种，直接测量波导损耗，目的时为了验证 PLACE 技术在制备尺寸较大的波导较长的铌酸锂片上光子器件时的可靠性。

确定了损耗测量的方案，接下来要解决的是如何实现完美的五五分光。首先使用单个多模干涉耦合器是行不通的，原因在于，单个多模干涉耦合器的分光比在实验中只能做到接近 50%: 50%，在第二节提到我们测得分光比为 48.4%: 51.6%，考虑到加工误差，我们很难在工艺中保证这个分光比精确且稳定。其引入的百分之三左右的功率输入误差对于测定导的损耗是不可以接受的。

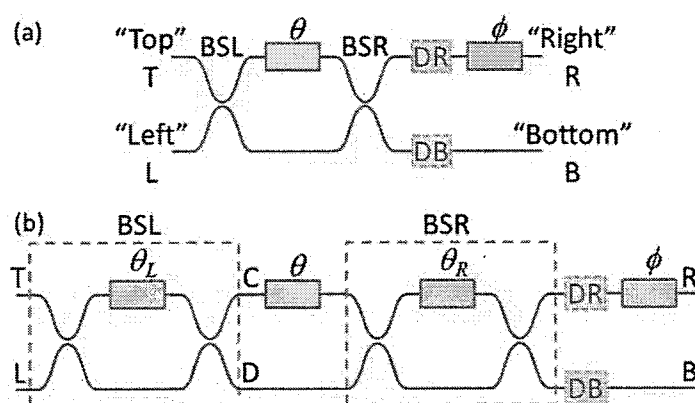


图 3.10 产理想五五分光的级联马赫曾德干涉仪示意图

Figure 3.10 MZI block configurations with the ideal 50 : 50 split.

2015 年斯坦福大学的 Miller 等人从理论上提出了一种基于马赫曾德干涉仪

级联的完美五五分光方案[132]，具体实现完美分光的方法将在后续实验过程中讨论。

基于理想分光的级联马赫曾德干涉仪设计和上一节中所提到的波导、多模干涉耦合器以及锥形波导等器件，我们设计并制备了了如图 3.11 (a) 所示的基于完美分光的 MZI 级联环形波导的光子芯片，用于测量波导损耗，芯片尺寸为 $11\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。采用的样品规格为 300 nm X 切铌酸锂薄膜，下是 $4\text{ }\mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 层结合， SiO_2 层下是 $500\text{ }\mu\text{m}$ 厚的 Si 衬底层。芯片结构如图可见，为两个级联的 MZI，第一个称之为 BSL，第二个称之为 BSR，两个 MZI 和将其相连的直臂部分都在其波导两侧加工上铬金电极，故直臂部分可以构成一个相移器。其两个出射端口分别为 Port U 和 Port G。其中 U 口连接环形延时线 A，G 口连接环形延时线 B，延时线 A 与 B 有着完全相同的弯曲部分，这可以保证光场在经过延时线 A 和 B 时的弯曲损耗时相同的，其出射功率差值只来自于直波导部分。环形延时线 A 的直波导部分的长度比 B 长 40 mm 。

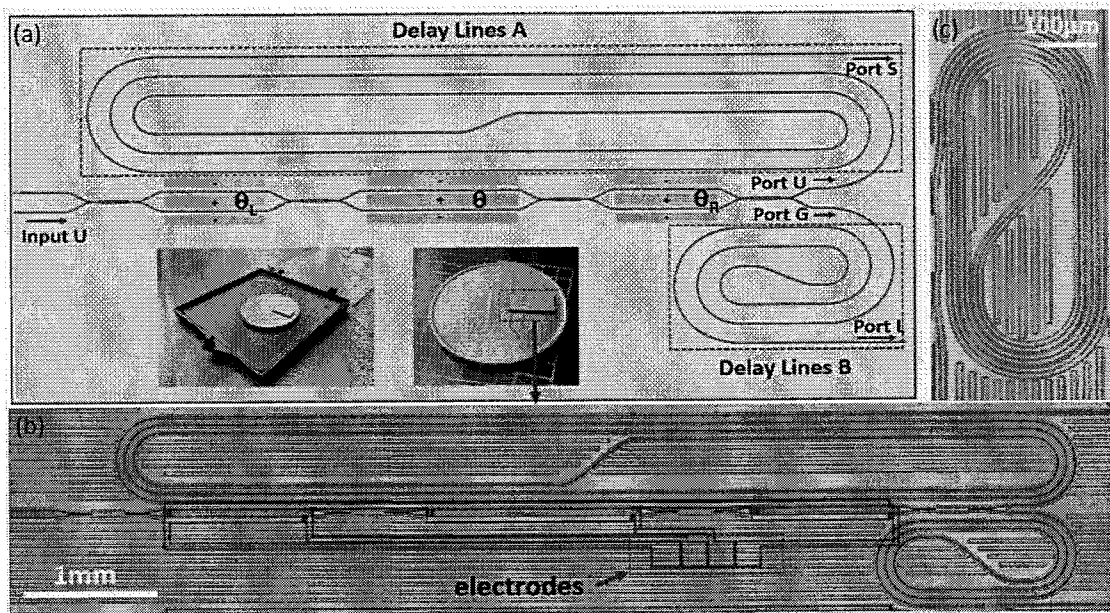


图 3.11 (a)测量波导传播损耗的器件原理图（插图为器件相对于一元硬币的照片）

(b)测量损耗器件的的显微镜照片 (c)线圈形延迟线 B 的显微镜照片

Figure 3.11 (a) Schematic diagram of the device for measuring the waveguide propagation loss. (b) Micrograph of the device. (c) Micrograph of the coil-shaped delay lines B.

为了表征完美分光的 MZI 的电光响应特征，完美使用 New Focus 公司生产的 1550 nm 波段的可调谐红外激光器激光器(tlb6728 型)，将 1550 nm 的 TE 模式激光透过光纤透镜耦合到分光器的输入端口 Input U。在输出端口 Port L 处用

Mitutoyo Corporation 公司的 50x 物镜准直镜头(型号:M Plan Apo NIR, 0.42NA)收集出射光, 然后出射光送入 YOKOGAWA 光公司生产的学频谱分析仪(型号 AQ6370D)进行分许, 在相移器上施加平行于铌酸锂波导的光轴方向的电场, 调谐所加电场大小可以得到结果如图 3.12 (a) 所示的 L 口出射功率随施加电压的关系, 可以得到理想分光的 MZI 的半波电压为 19.92 V, 测量消光比为 29 dB。

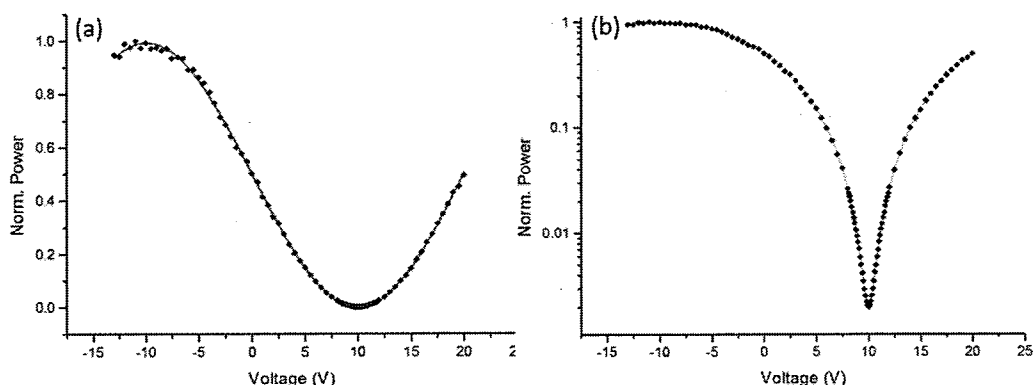


图 3.12 (a)归一化下 L 口出射功率随施加电压的关系 (b)对数坐标下的消光比

Figure 3.12(a) Normalized transmission spectra of output Ports L as a function of applied voltage V, featuring sinusoidal-like curve. (b) Extinction ratio in logarithmic terms.

接着为了在 U 口和 G 口得到精准的 50: 50 的分光, 需要执行以下步骤:

1. 调节移相器上的电压, 即调整 θ , 使输出 L 端口的输出功率最小。
2. 扫描加在 BSL 和 BSR 的电压, 即调 θ_L 与 θ_R 节使 L 端口输出功率最小化。
3. 重复步骤 1 和步骤 2, 直到获得端口 L 的最小输出功率。记录下此时在 MZI 上所施加的电压。

至此, 我们就可以测得波导损耗, 具体方法如下将 1550 通信波段的激光通过光纤透镜打入输入端口 U。此时电光调制器的电压按照上述方法调节稳定, 即分束器输出端口 U 和 G 为五五分光的的状态。调节相移器上的电压使得端口 S 的输出功率为最大值的一半, 即两条波导臂上产生了一个 $\frac{\pi}{2}$ 相位差。通过对比此时 S 口和 L 口的输出的光功率差值, 计算即可得到波导损耗。多次测量的取平均的结果为 0.130 ± 0.008 dB/cm。

3.5 本章小结

在本章我们主要介绍了我组首创的飞秒激光直写辅助的化学机械抛光的制备技术在制备铌酸锂微盘单模波导、多模干涉耦合器、铌酸锂片上的锥形波导等结构。我的主要工作如下：

1. 针对铌酸锂单模波导的制备，优化了化学机械抛光的工艺，克服了小线宽铬掩膜在抛光过程中易划断的问题、并且极大提升了抛光过程中铌酸锂和铬掩膜的去速速率比。
2. 成功制备了覆盖层为二氧化硅的高折射率对比度的铌酸锂单模波导，其模场大小为 0.9 微米。
3. 成功制备了分光比为 48: 52 的铌酸锂多模干涉耦合器。
4. 成功制备了铌酸锂锥形波导，将光纤到铌酸锂片上波导的耦合效率从 1% 提升至 15%。
5. 基于上述器件设计并制备了完美分光的马赫曾德干涉仪，并用其连接不同长度了铌酸锂单模环形延时线，测得了所制备的单模波导的损耗为 0.13dB/cm。

附录

1. 生成多模干涉耦合器加工程序的 python 代码

```
from Motion_Modules.Basic.Basic_Motion import *
from Motion_Modules.Basic.Code_Visualization import *
from Motion_Modules.Motion_Modules import *
from math import *

class Template(Motion_Modules):
    width_Cr = 0.0012
    width_LN = 0.003
    number_of_MMIs = 11
    d_MMI_L = 0.002
    nn = int(number_of_MMIs/2)
    MMI_LO = 0.257
    MMI_dL = [-d_MMI_L * nn] * number_of_MMIs
    for i in range(0, number_of_MMIs - 1):
        MMI_dL[i + 1] = MMI_dL[i] + d_MMI_L
    print(MMI_dL)
    MMI_N = 2
    MMI_p = 0.006
    MMI_straight_waveguide_length = 0.1
    sb_length = 0.25
    sb_height = 0.03
    layer_Cr = 1
    layer_LN = 25
    step = 0.0008

    L_sum = 2.5

    def __init__(self, directory):
```

```

self.file_create(directory, 'Cr')
self.loop_head(1)
self.BS(0)
self.loop_end()
self.FILE.close()

self.file_create(directory, 'Arms_Cr')
self.Arms(0)
self.FILE.close()

layer_LN_reg = self.layer_LN
self.layer_LN = 3

self.file_create(directory, 'LN_1')
self.BS(1)
self.FILE.close()

self.file_create(directory, 'Arms_LN_1')
self.Arms(1)
self.FILE.close()

self.width_LN += self.step * self.layer_LN * 2.0 - 0.0001
self.layer_LN = layer_LN_reg - self.layer_LN

self.file_create(directory, 'LN_2')
self.BS(1)
self.FILE.close()

self.file_create(directory, 'Arms_LN_2')
self.Arms(1)
self.FILE.close()

self.file_create(directory, 'test')
self.BS(0)
self.BS(1)
self.Arms(0)
self.Arms(1)
self.FILE.close()

def BS(self, Cr_or_LN):
    end_point = Point(0.0, 0.0)
    H_BS = 2.0*self.sb_height + self.MMI_p

    for i in range(len(self.MMI_dL)):
        self.MMI_L = self.MMI_LO + self.MMI_dL[i]
        self.L_side = (self.L_sum - (2.0*self.sb_length + self.MMI_L +
2.0*self.MMI_straight_waveguide_length))/2.0
        end_point.change(self.L_side, 2.0*H_BS*i)
        self.g_spot(end_point)
        self.shutter(0)
        self.Beam_Splitter_MMI(Cr_or_LN, flag=1)
        self.Beam_Splitter_MMI(Cr_or_LN)

    end_point.change(0.1, -0.1)
    self.g_spot(end_point)

def Arms(self, Cr_or_LN):
    end_point = Point(0.0, 0.0)
    H_BS = 2.0*self.sb_height + self.MMI_p

```

```

for i in range(len(self.MMI_dL)):
    if i%3 == 0:
        self.arms_move_2x2MMI_right = 0.000
    elif i%3 == 1:
        self.arms_move_2x2MMI_right = -0.001
    elif i%3 == 2:
        self.arms_move_2x2MMI_right = 0.001
    self.MMI_L = self.MMI_LO + self.MMI_dL[i]
    self.L_side = (self.L_sum - (2.0*self.sb_length + self.MMI_L +
2.0*self.MMI_straight_waveguide_length))/2.0

    L_BS = 2.0*self.sb_length + self.MMI_L + 2.0*self.MMI_straight_waveguide_length

    L_left_side = 0.0
    L_right_side = self.L_side + L_BS + self.extension*0.5

    arms_length = self.L_side - 0.5*self.extension + self.arms_move_2x2MMI_right +
self.arms_move_2x2MMI_left
    L_left_side -= self.arms_move_2x2MMI_right
    L_right_side -= self.arms_move_2x2MMI_right

    end_point.change(L_left_side, 2.0*H_BS*i + 0.5*H_BS)
    self.g_spot(end_point)
    self.shutter(1)
    self.Waveguide_x(Cr_or_LN, self.L_side - 0.5*self.extension +
self.arms_move_2x2MMI_right + self.arms_move_2x2MMI_left)

    end_point.change(L_left_side, 2.0*H_BS*i - 0.5*H_BS)
    self.g_spot(end_point)
    self.shutter(1)
    self.Waveguide_x(Cr_or_LN, self.L_side - 0.5*self.extension +
self.arms_move_2x2MMI_right + self.arms_move_2x2MMI_left)

    end_point.change(L_right_side, 2.0*H_BS*i + 0.5*H_BS)
    self.g_spot(end_point)
    self.shutter(1)
    self.Waveguide_x(Cr_or_LN, self.L_side - 0.5*self.extension +
self.arms_move_2x2MMI_right + self.arms_move_2x2MMI_left)

    end_point.change(L_right_side, 2.0*H_BS*i - 0.5*H_BS)
    self.g_spot(end_point)
    self.shutter(1)
    self.Waveguide_x(Cr_or_LN, self.L_side - 0.5*self.extension +
self.arms_move_2x2MMI_right + self.arms_move_2x2MMI_left)

    end_point.change(0.1, -0.1)
    self.g_spot(end_point)

directory = os.path.splitext(os.path.basename(__file__))[0]
print('Writing')
Template(directory)

(x_min, x_max) = (0, 20)
(y_min, y_max) = (-0.2, 0.2)
key = 0
Code_Visualization(directory, 'test', x_min, x_max, y_min, y_max, key)

```

2. 生成环形延时线加工程的 python 代码

```

from Motion_Modules.Basic.Basic_Motion import *
from Motion_Modules.Basic.Code_Visualization import *
from Motion_Modules.Basic.Z_match import *
from Motion_Modules.Basic.Code_Matrix_Visualization import *
from Motion_Modules.Motion_Modules import *
from Motion_Modules.Groove_Create import *
from math import *

class Loss_delay_line(Motion_Modules):
    width_Cr = 0.00135
    width_LN = 0.00295
    layer_Cr = 1
    layer_LN = 25
    step = 0.0008
    MMI_L = 0.252
    sb_length = 0.25
    MMI_p = 0.006
    sb_height = 0.025 - MMI_p/2.0
    MMI_straight_waveguide_length = 0.1
    L_BS = 2.0 * sb_length + 2.0 * MMI_straight_waveguide_length + MMI_L
    H_BS = 2.0 * sb_height + MMI_p
    L_sum = 8.7
    L_MZI_middle = 1.5
    L_MZI_side = 1.0
    L_left_side = 0.5
    R = 0.8
    L_BS_DL_link = 0.1
    Y_second = 0.85
    X_BS = [0.0]*4
    X_BS[0] = L_left_side
    X_BS[1] = X_BS[0] + L_BS + L_MZI_side
    X_BS[2] = X_BS[1] + L_BS + L_MZI_middle
    X_BS[3] = X_BS[2] + L_BS + L_MZI_side
    X_BS_second = [0.0]*4
    X_BS_second[0] = L_sum - L_left_side - L_BS
    X_BS_second[1] = X_BS_second[0] - L_BS - L_MZI_side
    X_BS_second[2] = X_BS_second[1] - L_BS - L_MZI_middle
    X_BS_second[3] = X_BS_second[2] - L_BS - L_MZI_side
    X_arms = [0.0]*5
    X_arms[0] = 0.0
    X_arms[1] = X_BS[0] + L_BS
    X_arms[2] = X_BS[1] + L_BS
    X_arms[3] = X_BS[2] + L_BS
    X_arms[4] = X_BS[3] + L_BS

    L_arms = [0.0]*6
    L_arms[0] = L_left_side
    L_arms[1] = L_MZI_side
    L_arms[2] = L_MZI_middle
    L_arms[3] = L_MZI_side
    L_arms[4] = L_BS_DL_link
    L_arms[5] = L_sum - X_arms[4] - L_arms[4]
    L_mzi_side_right = L_sum - X_arms[4]
    X_arms_second = [0.0]*5
    X_arms_second[0] = X_BS_second[3] - L_arms[4]
    X_arms_second[1] = X_BS_second[2] - L_arms[3]
    X_arms_second[2] = X_BS_second[1] - L_arms[2]

```

```

X_arms_second[3] = X_BS_second[0] - L_arms[1]
X_arms_second[4] = X_BS_second[0] + L_BS
Arms_extension_right = [0.003, 0.003, 0.003, 0.003, 0.0025]
Arms_extension_left = [0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0]
Arms_extension_right_second = [0.003, 0.003, 0.003, 0.003, 0.0015]
Arms_extension_left_second = [0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0]
Arm_second_up_right = 0.0045
Arm_second_down_right = 0.0045
Arm_first_up_left = 0.0055
Arm_first_down_left = 0.0045
Delta_L = 40
num_of_circles = 3
l = Delta_L/(num_of_circles*2.0 + 1.0)
min_radius = 0.2
gap = 0.05
DL_real_L = l + 0.2 + min_radius * 3.0
DL_real_L0 = 0.2 + min_radius * 3.0
DL_real_H = 2.0*min_radius + (2.0*num_of_circles - 1) * gap
dual_or_not = 1
# Z match
x_init = -1
x_end = 9
y_init = -2
y_end = 3
delta_x = 0.1
delta_y = 0.1
# Groove fix
groove_fix = 0.03
vertical_offset = -0.0002
def Groove_Prepare(self, directory):
    Groove_class = Groove_Create(directory)
    return (Groove_class.Groove, Groove_class.Groove_width)
#
def Groove_Write(self, Groove, Groove_width, fake_key=0):
    end_point = Point(0.0, 0.0)
    self.g_spot(end_point)
    num_of_layers = int(ceil(Groove_width/self.step))
    if fake_key == 1:
        num_of_layers = 1
        Groove_width = 0.0
    i = 0
    for groove in Groove:
        groove_fix = self.groove_fix if groove[2] > 0.2 else 0.0
        end_point.change(groove[0] + groove_fix, groove[1] - Groove_width/2.0)
        self.g_spot(end_point)
        self.x_rect_PSO(0, num_of_layers, groove[2] - 2.0 * groove_fix, self.step)
#
        if i%2 == 0:
#
            self.x_rect_PSO_type_I(1, num_of_layers, groove[2] - 2.0 * groove_fix,
self.step)
#
            else:
#
                self.x_rect_PSO_type_II(1, num_of_layers, groove[2] - 2.0 * groove_fix,
self.step)
#
                i += 1
    def __init__(self, directory):
        print('Track Creating.....')
        self.file_create(directory, 'BS')
        self.loop_head(1)
        self.BS(0)
        self.loop_end()

```

```

self.FILE.close()

tag_set = ['up', 'down']
for waveguide_tag in tag_set:
    for side_tag in tag_set:
        filename = 'One_' + waveguide_tag + '_' + side_tag
        self.file_create(directory, filename)
        self.One(waveguide_tag, side_tag)
        self.FILE.close()

        filename = 'One_second_' + waveguide_tag + '_' + side_tag
        self.file_create(directory, filename)
        self.One_second(waveguide_tag, side_tag)
        self.FILE.close()
self.file_create(directory, 'PSO_MMI')
self.loop_head(1)
self.MMI(0)
self.loop_end()
self.FILE.close()
# self.file_create(directory, 'PSO_DL')
# self.loop_head(1)
# self.DL_PSO(0)
# self.loop_end()
# self.FILE.close()

layer_LN_reg = self.layer_LN
self.layer_LN = 7
self.file_create(directory, 'PSO_MMI_LN_1')
self.loop_head(2)
self.MMI(1)
self.loop_end()
self.FILE.close()
self.file_create(directory, 'PSO_MZI_Arms_LN_1')
self.loop_head(2)
self.Arms_MZI(1)
self.loop_end()
self.FILE.close()
layer_LN_reg_MMI = self.layer_LN
self.layer_LN = 3
layer_LN_reg_else = self.layer_LN
self.file_create(directory, 'BS_LN_1')
self.loop_head(2)
self.BS(1)
self.loop_end()
self.FILE.close()
self.file_create(directory, 'DL_LN_1')
self.loop_head(2)
self.DL_IO(1)
self.loop_end()
self.FILE.close()
self.file_create(directory, 'PSO_DL_LN_1')
self.loop_head(2)
self.DL_PSO(1)
self.loop_end()
self.FILE.close()
width_Cr_reg = self.width_Cr
width_LN_reg = self.width_LN
self.width_LN = width_LN_reg + self.step * layer_LN_reg_MMI * 2.0 - 0.0001
self.layer_LN = layer_LN_reg - layer_LN_reg_MMI

```

```

self.file_create(directory, 'PSO_MMI_LN_2')
self.loop_head(1)
self.MMI(1)
self.loop_end()
self.FILE.close()
self.file_create(directory, 'PSO_MZI_Arms_LN_2')
self.loop_head(1)
self.Arms_MZI(1, LN_2_flag=1)
self.loop_end()
self.FILE.close()
self.width_LN = width_LN_reg + self.step * layer_LN_reg_else * 2.0 - 0.0001
self.layer_LN = layer_LN_reg - layer_LN_reg_else
self.file_create(directory, 'BS_LN_2')
self.loop_head(1)
self.BS(1)
self.loop_end()
self.FILE.close()
self.file_create(directory, 'DL_LN_2')
self.loop_head(1)
self.DL_IO(1)
self.loop_end()
self.FILE.close()
self.file_create(directory, 'PSO_DL_LN_2')
self.loop_head(1)
self.DL_PSO(1)
self.loop_end()
self.FILE.close()
self.width_Cr = width_Cr_reg
self.width_LN = width_LN_reg
print('Track Done')
print('Track Matching.....')
match_Z = Z_matrix(x_init=self.x_init, x_end=self.x_end, y_init=self.y_init,
y_end=self.y_end, delta_x=self.delta_x, delta_y=self.delta_y)
# match_Z.test_matrix_create(directory, 'test_Z')
match_Z.Z_matrix_read(directory, 'test_Z')
# match_Z.Z_matrix_visualization(directory)
match_Z.Z_match(directory, Groove_done=0)
print('Track Matching Done')

print('Groove Creating.....')
(Groove, Groove_width) = self.Groove_Prepare(directory)
self.file_create(directory, 'PSO_Groove')
self.Groove_Write(Groove, Groove_width)
self.FILE.close()
self.file_create(directory, 'PSO_Groove_fake')
self.Groove_Write(Groove, Groove_width, fake_key=1)
self.FILE.close()
print('Groove Done')
print('Groove Matching.....')
match_Z.Z_match(directory, Groove_done=1)
print('Groove Matching Done')
def One(self, waveguide_tag, side_tag):
    l = 0.0 if waveguide_tag == 'up' else self.l
    end_point = Point(0.0, 0.0)
    self.g_spot(end_point)
    H = self.sb_height + self.MMI_p/2.0
    d = self.width_Cr/2.0 + self.step/2.0
    if waveguide_tag == 'up':
        if side_tag == 'up':

```

```

        end_point.y += H + d
    elif side_tag == 'down':
        end_point.y += H - d
    if waveguide_tag == 'down':
        if side_tag == 'up':
            end_point.y += -H + d
        elif side_tag == 'down':
            end_point.y += -H - d
    self.g_spot(end_point)
    self.Waveguide_one(self.L_arms[0], head_or_tail='head')
    self.Four_s_bent_waveguide_one(waveguide_tag, side_tag)
    self.Waveguide_one(self.L_arms[1])
    self.Four_s_bent_waveguide_one(waveguide_tag, side_tag)
    self.Waveguide_one(self.L_arms[2])
    self.Four_s_bent_waveguide_one(waveguide_tag, side_tag)
    self.Waveguide_one(self.L_arms[3])
    self.Four_s_bent_waveguide_one(waveguide_tag, side_tag)
    self.Waveguide_one(self.L_arms[4])
    self.Delay_line_one(1, self.num_of_circles, self.min_radius, self.gap,
bent_dir=waveguide_tag, side_tag=side_tag)
    self.Waveguide_one(self.L_arms[5], head_or_tail='tail')
    end_point.change(0.0, -0.1)
    self.g_spot(end_point)
def One_second(self, waveguide_tag, side_tag):
    l = 0.0 if waveguide_tag == 'up' else self.l
    end_point = Point(0.0, self.Y_second)
    self.g_spot(end_point)
    H = self.sb_height + self.MMI_p/2.0
    d = self.width_Cr/2.0 + self.step/2.0
    if waveguide_tag == 'up':
        if side_tag == 'up':
            end_point.y += H + d
        elif side_tag == 'down':
            end_point.y += H - d
    if waveguide_tag == 'down':
        if side_tag == 'up':
            end_point.y += -H + d
        elif side_tag == 'down':
            end_point.y += -H - d
    self.g_spot(end_point)

    self.Waveguide_one(self.L_arms[0], head_or_tail='head')
    self.Four_s_bent_waveguide_one(waveguide_tag, side_tag)
    self.Waveguide_one(self.L_arms[1])
    self.Four_s_bent_waveguide_one(waveguide_tag, side_tag)
    self.Waveguide_one(self.L_arms[2])
    self.Four_s_bent_waveguide_one(waveguide_tag, side_tag)
    self.Waveguide_one(self.L_arms[3])
    self.Four_s_bent_waveguide_one(waveguide_tag, side_tag)
    self.Waveguide_one(self.L_arms[4])
    self.Waveguide_one(self.L_arms[5], head_or_tail='tail')

    end_point.change(0.0, -0.1)
    self.g_spot(end_point)

def BS(self, Cr_or_LN):
    end_point = Point(0.0, 0.0)
    self.g_spot(end_point)
    for i in range(4):

```

```

end_point.change(self.X_BS[i], 0.0)
self.g_spot(end_point)
self.shutter(0)
self.Four_s_bent_waveguide(Cr_or_LN, flag=1)
self.Four_s_bent_waveguide(Cr_or_LN, One_flag=1)

for i in range(4):
    end_point.change(self.X_BS[i], self.Y_second)
    self.g_spot(end_point)
    self.shutter(0)
    self.Four_s_bent_waveguide(Cr_or_LN, flag=1)
    self.Four_s_bent_waveguide(Cr_or_LN, One_flag=1)

end_point.change(0.0, -0.1)
self.g_spot(end_point)

def MMI(self, Cr_or_LN):
    end_point = Point(0.0, 0.0)
    self.g_spot(end_point)
    for i in range(4):
        end_point.change(self.X_BS[i] + self.sb_length, 0.0)
        self.g_spot(end_point)
        self.shutter(0)
        self.MMI_straight(Cr_or_LN)

    for i in range(4):
        end_point.change(self.X_BS[i] + self.sb_length, self.Y_second)
        self.g_spot(end_point)
        self.shutter(0)
        self.MMI_straight(Cr_or_LN)

    end_point.change(0.0, -0.1)
    self.g_spot(end_point)

def Arms_MZI(self, Cr_or_LN, LN_2_flag=0):
    end_point = Point(0.0, 0.0)
    self.g_spot(end_point)

    #first
    for i in range(5):
        end_point.change(self.X_arms[i], 0.0)
        self.g_spot(end_point)
        self.shutter(0)
        self.Waveguide_array(Cr_or_LN, self.L_arms[i], self.H_BS, \
            left_extension=self.Arms_extension_left[i],
right_extension=self.Arms_extension_right[i], LN_2_flag=LN_2_flag)

    X_first_up = self.X_arms[4] + self.L_arms[4] - self.DL_real_L0
    end_point.change(X_first_up, self.H_BS/2.0 + self.DL_real_H)
    self.g_spot(end_point)
    self.Waveguide_array(Cr_or_LN, self.L_sum - X_first_up, 0.1, num_of_waveguides=1, \
        left_extension=self.Arm_first_up_left)
    X_first_down = self.X_arms[4] + self.L_arms[4] - self.DL_real_L
    end_point.change(X_first_down, -self.H_BS/2.0 - self.DL_real_H)
    self.g_spot(end_point)
    self.Waveguide_array(Cr_or_LN, self.L_sum - X_first_down, 0.1, num_of_waveguides=1, \
        left_extension=self.Arm_first_up_left)

    # second
    for i in range(5):

```

```

end_point.change(self.X_arms[i], self.Y_second)
self.g_spot(end_point)
self.shutter(0)
if i != 4:
    self.Waveguide_array(Cr_or_LN, self.L_arms[i], self.H_BS, \
        left_extension=self.Arms_extension_left[i],
right_extension=self.Arms_extension_right[i], LN_2_flag=LN_2_flag)
else:
    self.Waveguide_array(Cr_or_LN, self.L_mzi_side_right, self.H_BS, \
        left_extension=self.Arms_extension_left[i],
right_extension=self.Arms_extension_right[i], LN_2_flag=LN_2_flag)
end_point.change(0, 0, -0.1)
self.g_spot(end_point)
def DL_IO(self, Cr_or_LN):
    end_point = Point(0, 0, 0.0)
    self.g_spot(end_point)
    # first
    # up
    end_point.change(self.X_arms[4] + self.L_arms[4], self.H_BS/2.0)
    self.g_spot(end_point)
    self.Delay_line_IO(Cr_or_LN, 0.0, self.num_of_circles, self.min_radius, self.gap, 0)
    # down
    end_point.change(self.X_arms[4] + self.L_arms[4], -self.H_BS/2.0)
    self.g_spot(end_point)
    self.Delay_line_IO(Cr_or_LN, self.l, self.num_of_circles, self.min_radius, self.gap,
1)
    # second
    # up
    if self.dual_or_not == 0:
        end_point.change(self.X_arms[0] + self.DL_real_L, self.Y_second + self.H_BS/2.0
+ self.DL_real_H)
        self.g_spot(end_point)
        self.Delay_line_IO(Cr_or_LN, self.l, self.num_of_circles, self.min_radius,
self.gap, 1)
    # down
    end_point.change(self.X_arms[0] + self.DL_real_L0, self.Y_second - self.H_BS/2.0
- self.DL_real_H)
    self.g_spot(end_point)
    self.Delay_line_IO(Cr_or_LN, 0, self.num_of_circles, self.min_radius, self.gap,
0)
    end_point.change(0, 0, -0.1)
    self.g_spot(end_point)
def DL_PSO(self, Cr_or_LN):
    end_point = Point(0, 0, 0.0)
    self.g_spot(end_point)
    # first
    # up
    end_point.change(self.X_arms[4] + self.L_arms[4], self.H_BS/2.0)
    self.g_spot(end_point)
    self.Delay_line_PSO(Cr_or_LN, 0.0, self.num_of_circles, self.min_radius, self.gap,
0)
    # down
    end_point.change(self.X_arms[4] + self.L_arms[4], -self.H_BS/2.0)
    self.g_spot(end_point)
    self.Delay_line_PSO(Cr_or_LN, self.l, self.num_of_circles, self.min_radius,
self.gap, 1)

```

```

        # second
        # up
        if self.dual_or_not == 0:
            end_point.change(self.X_arms[0] + self.DL_real_L, self.Y_second + self.H_BS/2.0
+ self.DL_real_H)
            self.g_spot(end_point)
            self.Delay_line_PSO(Cr_or_LN, self.l, self.num_of_circles, self.min_radius,
self.gap, 1)
            # down
            end_point.change(self.X_arms[0] + self.DL_real_L0, self.Y_second - self.H_BS/2.0
- self.DL_real_H)
            self.g_spot(end_point)
            self.Delay_line_PSO(Cr_or_LN, 0, self.num_of_circles, self.min_radius, self.gap,
0)

        end_point.change(0.0, -0.1)
        self.g_spot(end_point)

    def Side_groove(self, Cr_or_LN):
        end_point = Point(0.0, -0.71)
        self.g_spot(end_point)
        self.Waveguide_array(Cr_or_LN, self.L_sum, self.H_BS)

        if self.dual_or_not == 0:
            end_point.change(0.0, 2.0)
        else:
            end_point.change(0.0, 0.85)
        self.g_spot(end_point)
        self.Waveguide_array(Cr_or_LN, self.L_sum, self.H_BS)

        end_point.change(0.0, -0.1)
        self.g_spot(end_point)

    directory = os.path.splitext(os.path.basename(__file__))[0]
    # create track
    Loss_delay_line(directory)

    Code_Matrix_Visualization(directory, '', plot_key=1, equal_key=1)

```

第 4 章 氮化硅波导与铌酸锂微环腔的耦合

片上氮化硅(Si_3N_4)受益于其较宽的通光窗口(400-2350 纳米)和成熟的半导体制备工艺被广泛的应用于低损耗光子集成器件、光子芯片等领域。作为对硅光子学和 III-V 族光子学的补充,氮化硅波导技术开辟了新一代的芯片级应用。以氮化硅波导为基础的光子器件可以实现超低损耗 (1dB/m)的实现光场传输和调制,并且可以是实现各种线性和非线性光学功能,以及实现的片上光子器件包括超高品质因子的微纳谐振器、光学滤波器、高相干激光器、光信号处理电路、非线性光学器件、频率梳发生器和生物光子片上系统。由于氮化硅的晶胞结构为中心对称型没有自发极化,故线性电光系数较小,在不注入载流子的情况下无法实现高效的电光调制。而针对这一缺点,基于铌酸锂的片上光子器件系统受益于其优良的线性电光调制特性可以完美弥补。但是就目前已经成熟的技术来说,铌酸锂于氮化硅的制备工艺并不兼容。所以急需一套制备方案去完成铌酸锂于氮化硅的片上集成。而本章工作的工作重点就是针对铌酸锂微环腔于氮化硅波导的片上集成展开研究。

4.1 氮化硅在片上光子学领域的发展现状

氮化硅同铌酸锂一样是一种人工合成材料。1857 年, Henri Etienne Sainte-Claire Deville 和 Friedrich Wohler 首次报道了氮化硅的合成方法。之后人们惊喜的发现氮化硅拥有优秀的物化性质,其化学稳定性高、电阻率高、耐高温、抗热冲击、高辐射硬度、机械性能好、光学性能优良等等。氮化硅的相对分子质为 140.28,通常呈灰色、白色或灰白色。属高温难溶化合物,无熔点,抗高温蠕变能力强,不含粘结剂的反应烧结氮化硅负荷软化点在 1800°C 以上;六方晶系。晶体呈六面体。反应烧结法制得的 Si_3N_4 密度为 $1.8\sim 2.7\text{g/cm}^3$,热压法制得 Si_3N_4 密度为 $3.12\sim 3.22\text{g/cm}^3$ 。莫氏硬度 9~9.5,维氏硬度约为 2200,显微硬度为 32630MPa 。熔点 1900°C (加压下)。化学性能方面,除氢氟酸外,氮化硅不与其它任何酸反应,具有极强的抗腐蚀能力和良好的抗氧化能力。氮化硅属多晶材料,普遍人们认可的氮化硅存在三种晶型,分别是 α 、 β 和 γ 三相。 α 和 β 两相是 Si_3N_4 最常出现的型式分别是三方结构和六方结构,且可以在常压下制备。 γ 相是立方结构只有在高压及高温下,才能合成得到,它的硬度可达到 35GPa 。收益

以上这些优良的物化性能使得氮化硅在在炼油化工、光电产业、半导体产品均具有广泛的应用。

氮化硅的诸多应用之一就是光子集成电路(PICs), 其中包括数据通信电子通信, 生物传感, 定位和导航、低噪声微波合成器、光谱学、射频信号处理、量子通信、和原子钟等等新应用[151]。今天, 绝缘体上的单晶硅薄膜(SOI) 得益于成熟的互补金属氧化物氧化物半导体(CMOS)工艺提供了大尺寸的光子互联器件。传统 SOI 波导被二氧化硅覆盖, 具有高折射率对比度, 光场被强烈束缚在波导核心。优异的光场束缚能力是 SOI 波导具有较小的弯曲半径和中等的波导损耗 0.1 dB/cm 的量级。与 SOI 波导相比。也可以用传统的 CMOS 工艺制备的 Si_3N_4 波导提供了更低的波导损耗。光波导采用核心层嵌在二氧化硅周围的 Si_3N_4 包层材料。作为包层的二氧化硅的折射率在 1.55 μm 波长处为 1.45, 最为波导核心的氮化硅的折射率在 1.55 μm 波长处为 1.98, 虽然不及 SOI 波导, 但是氮化硅波导的折射率对比度也达到了 0.47, 足以支撑起其在 400 纳米到-2350 纳米的通光窗口类以 0.3 dB/m 至 1.0 dB/cm 的低损耗传输。一般而言, 波导损耗大最小弯曲半径是设计波导最重要的两个指标, 根据不同的片上波导材料都有较大差异。图 4.1 总结了目前研究中公布氮化硅、硅以及磷化铟波导的最小的传播损耗、弯曲半径以及波长的工作范围[151]。

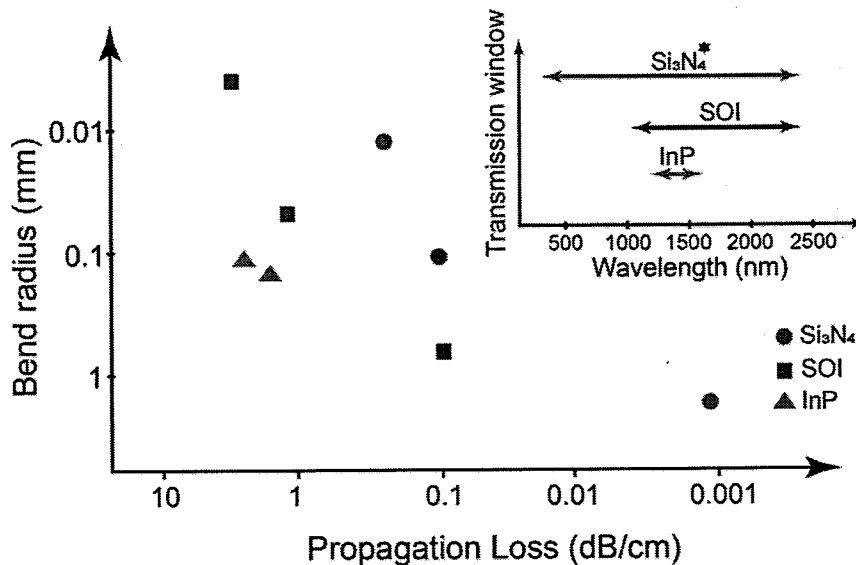


图 4.1 发表的 Si_3N_4 , SOI 和 InP 波导的弯曲半径、传播损耗和透明窗口[151]

Figure 4.1 Bend radii, propagation loss, and window of transparency for published Si_3N_4 , SOI, and InP waveguides. [151]

如图 4.2 所示是目前位置三种构型的氮化硅波导的结构示意图和扫描电子显微镜的剖面照片[152]。按照包层类型分为单层约束 (Single stripe)、多层约束 (Multilayer)、完全约束 (Buried)，其中多层约束按照包层构型还可分为对称双层平板型、非对称双层平板型以及环绕型。其中对光场的约束能力强弱为完全约束波导 > 多层约束型 > 单层约束型。

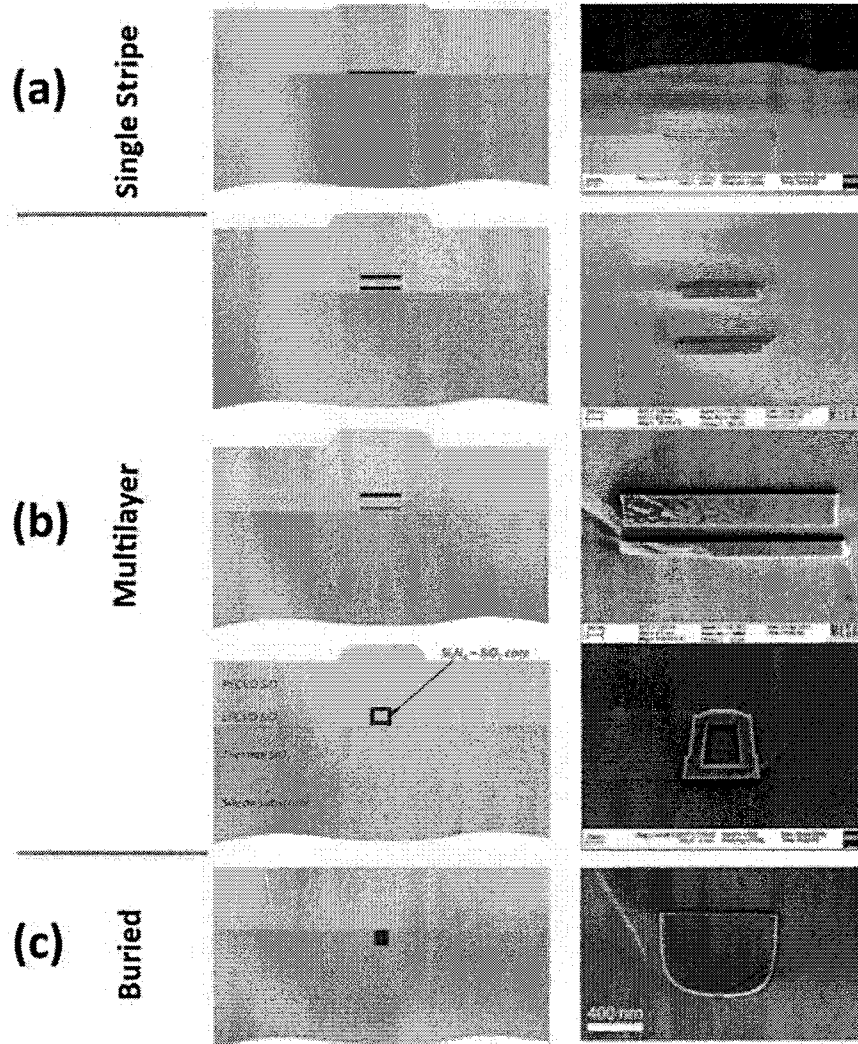


图 4.2 三种氮化硅波导类型截面构型图和 SEM 照片 (a)单层约束型 (b)多层约束型 (c)完全约束型波导[152]

Figure 4.2 Si_3N_4 waveguide types, cross sections and SEM photographs: (a) single stripe; (b) multilayer structures comprising both double stripe (DS) and asymmetric double stripe (asymmetric double-stripe, ADS and box shapes); and (c) buried waveguides. [152]

如图4.3所示是基于磷化铟波导与氮化硅波导的混合外腔激光器的结构示意图和实物照片[153], 其中前端是基于磷化铟的半导体光放大器, 后端是基于氮化硅波导的相调制器、基于氮化硅微环谐振腔的频率调制器以及基于氮化硅马赫曾德干涉仪的功率调制器。这个级联结构可以将磷化铟半导体光放大器产生的激光线宽窄化至 300Hz 以下, 同时可以实现波长调谐的功能。

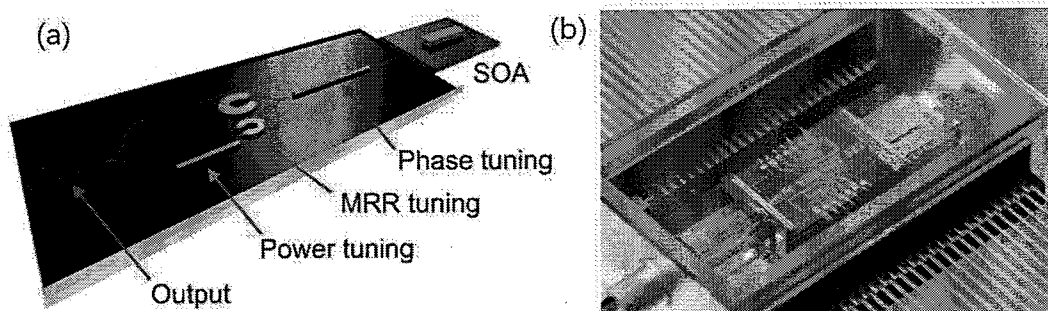


图 4.3 基于磷化铟与氮化硅的混合外腔激光器(a)主要组件:基于磷化铟的增益放大器连接到氮化硅的可调谐腔镜 (b)装置的实物照片[153]

Figure 4.3 An InP-Si₃N₄ hybrid external cavity laser. (a) Principle components: InP-based gain section (SOA) connected to tunable mirror in Si₃N₄ platform. (b) Assembled device as seen in. [153]

通常氮化硅片上波导中光场调制, 只能通过热光效应或者载流子注入完成, 其中热光效应的响应时间太长, 通常大于毫秒量级, 这决定了其调制频率难以超过 300KHz, 而载流子注入实现的电光调制往往又会引入较大的波导损耗。所以对于氮化硅波导的应用而言, 将其与有优异的电光性能铌酸锂波导进行片上的集成具有非常重要的意义。

在本章的工作中, 我们将展示铌酸锂微环谐振器与氮化硅波导在垂直方向上耦合集成结构。首先采用光刻辅助化学机械刻蚀(PLACE)技术在片上铌酸锂薄膜(LNOI)上制备了微环谐振器。通过化学机械抛光结合聚焦离子刻蚀形成耦合沟槽, 后在沟槽底部通过化学气相沉积结合聚焦离子刻蚀发方法制备氮化硅波导。聚焦离子刻蚀技术保证了波导与环形谐振器之间耦合距离的精度。通过此结构, 我们成功激励了铌酸锂微环腔, 在通信波段得到了品质因子高达 1.4×10^7 的谐振模式。

4.2 铌酸锂微环谐振腔与氮化硅波导耦合结构的制备

为了将氮化硅波导与铌酸锂微环谐振腔在垂直方向上通过倏逝波耦合, 我对

在本文第二章与第三章所使用的 PLACE 工艺进行了改良。实验中所使用的晶片为济南晶正公司生产的 900 nm 厚的 X 切单晶铌酸锂薄膜。该铌酸锂薄膜下方与由 2 μm 厚的二氧化硅层结合合 500 μm 厚的铌酸锂衬底支撑，其的剖面结构如图 4.4(a)所示，具体工艺流程如图 4.4(b)-(k)所示。制备过程包括：(1)通过磁控溅射在 LNOI 表面沉积厚度为 400 nm 的薄层铬(Cr)(图 4.4(b))；(2)利用聚焦飞秒激光束对 LNOI 表面涂层的铬层进行二维的选择性烧蚀，以产生微环谐振腔的图案(图 4.4(c))。此步骤中采用中心波长为 1025 nm、脉冲宽度为 170 fs、全宽度为 13.8nm 的光纤飞秒激光器(PHAROS, LIGHT CONVERSION)，平均功率入瞳为 0.1 mW。同时利用 100x 物镜(M Plan Apo NIR, Mitutoyo Corporation, NA0.7)产生一个紧聚焦的光斑其直径 $\sim 0.8 \mu\text{m}$ ，飞秒加工过程中的图案是通过 Aerotech 公司的三维气浮位移平台(ABL1500-ANT130)相对于聚焦光斑的运动实现的，其具体系统设置见第二章；(3) 通过化学机械抛光将飞秒烧蚀形成的铬掩膜层的图案转移到铌酸锂薄膜层上(图 4.4(d))。在此步骤中，未被铬掩膜覆盖的铌酸锂薄膜将完全被抛光去除，而处于铬掩膜保护下的铌酸锂膜将会抛光过程中留存下来；(4) 通过化学湿法蚀刻去除铌酸锂薄膜表面残留的铬掩模，之后进行第二次化学机械抛光以进一步提升铌酸锂薄膜的表面光滑度(图 4.4(e))，至此铌酸锂微环谐振的制备已经完成，之后我们将在微环之上制备一层氮化硅波导；(5)通过等离子体增强的强化学气相沉积(PECVD)在铌酸锂微环表面上沉积一层 1.5 微米厚的二氧化硅，其将作为铌酸锂微环谐振腔于氮化硅波导的耦合介质(图 4.4(f))；(6)第三次使用化学机械抛光将沉积上的二氧化硅层抛至光滑(图 4.4(g))；(7)使用聚焦离子束(FIB)刻蚀对二氧化硅层进行刻蚀(图 4.4(h))，在铌酸锂微环上方形成槽。值得注意的是，此处利用 FIB 刻蚀技术可以控制刻蚀槽的深度，精度可达 $\sim 10 \text{ nm}$ ；(8) 使用 PECVD 技术在二氧化硅层上沉积一层 550 nm 厚的氮化硅薄膜，填充在上一步利用 FIB 形成的刻槽中(图 4.4(i))；(9)用第四次化学机械抛光去除二氧化硅层上方多余的氮化硅，仅仅留下凹槽中的氮化硅(图 4.4(j))；(10)再次利用 FIB 蚀刻留在凹槽中的氮化硅，以形成波导(图 4.4(k))。最终形成的铌酸锂与氮化硅波导的耦合结构的三维示意图如图 4.4(l)所示。其中化学机械抛光的设备与参数与第三章中相同。

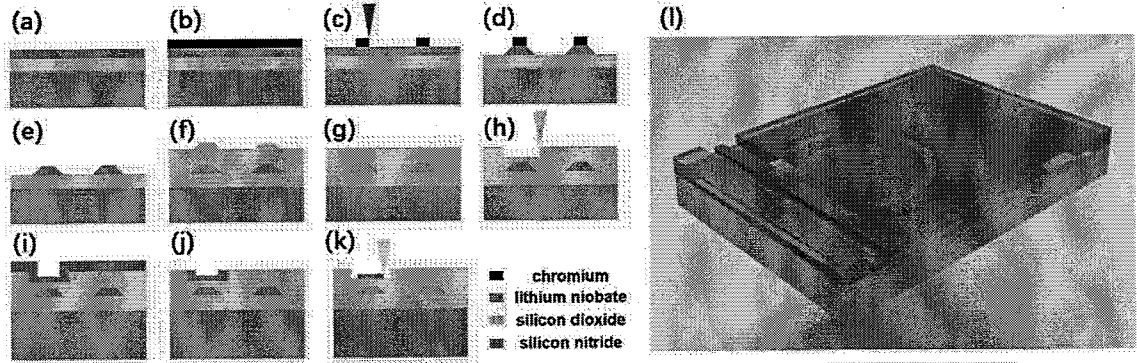


图 4.4 氮化硅波导与铌酸锂微环谐振腔在垂直方向上的耦合偶结构的制备流程图
(I) 所制备结构的 3D 结构示意图

Figure 4.4 (a~k) Process flow of fabricating a lithium niobate (LN) microring resonator coupling with a silicon nitride (Si_3N_4) waveguide in the vertical configuration. (I) 3D diagram of the coupling structure.

在此，我们选择制备微环腔而非微盘腔主要是考虑，1. 相对于微盘腔，微环腔的高阶模式更少，更利于模式的调控；2. 微环腔的几何构型与波导更匹配、这意味着其在材料折射率相同的情况下有效折射率也更加接近，更易于耦合的实现。

值得注意的是在本文之前所提到了光刻辅助的化学机械抛光刻蚀（PLACE）工艺中存在一个问题，即铬掩膜之间间距过小时（小于 $3.5\ \mu\text{m}$ ）的铌酸锂抛光去除速率很低。例如当我们在铬掩膜上加工一条 2 微米的槽，希望通过化学机械抛光将槽转移到铌酸锂薄膜上，这件事情很难在外界辅助手段的情况下完成。原因在于当金属掩膜之间的间距过小时，铌酸锂薄膜无法在化学机械抛光过程中充分接触到抛光液，同时收到抛光垫的压力太小。这意味着单纯的通过 PLACE 技术无法完成铌酸锂片上光子器件的低损耗的耦合结构的制备，特别是波导与片上谐振腔的耦合。本章的工作将重点是在 PLACE 的工艺过程中通过引入聚焦离子束刻蚀（Focused ion beam etching, FIB）来解决这个问题。

这套制备流程相可以精准的实现氮化硅波导与铌酸锂微环腔在垂直方向上的耦合。但是其相较于前两章中所使用的 PLACE 技术的制备流程，在工艺流程更加繁琐，涉及四次化学机械抛光、两次聚焦离子刻蚀，单个样品的聚焦离子刻蚀时长高达 4 个小时，这导致其成本高难度大良品率低。在我们后续的分析将讨论如何优化这套制备工艺，以去除对高成本低效率的聚焦离子刻蚀的依赖。

4.3 垂直型倏逝波耦合结构的光学性能表征

所制备的耦合结构的扫描电子显微照片如图 4.5 所示。所制备的铌酸锂微环的直径为 $100\mu\text{m}$ ，如图 4.5(a)所示。其中蓝色虚线方框区域的扫描电子显微镜的截面图如图 4.5(b)所示。可见铌酸锂微环的截面几何构型为顶宽 $2.5\mu\text{m}$ 、底宽 $7.5\mu\text{m}$ 、厚 800nm 的梯形形状，上方被 $1.5\mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 包层覆盖。图 4.5(a)中黄色虚线方框区域为氮化硅波导和铌酸锂微环腔的耦合区域，其扫描电子显微镜的截面图如图 4.5(c)所示。从底部到顶部可以清晰地看到 LN、 SiO_2 和 Si_3N_4 三层结构。其中 Si_3N_4 波导的宽度为 $3.5\mu\text{m}$ ，脊状高度为 550nm ， SiO_2 层耦合为 600nm ，这也就是耦合层的厚度，也即耦合距离。其中 PECVD 沉积的二氧化硅层的厚度从 $1.5\mu\text{m}$ 减小到 600nm 以及氮化硅脊状波导的形成都是通过聚焦离子刻蚀实现的。

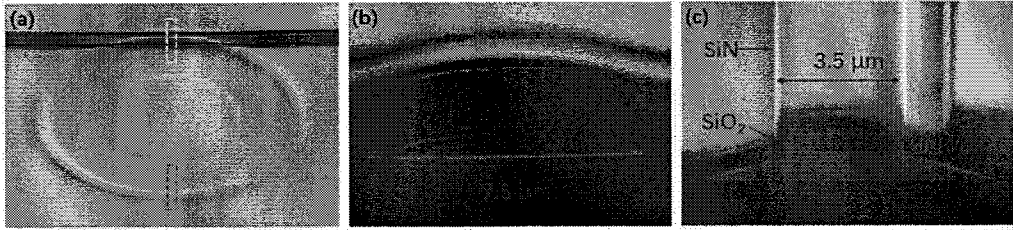


图 4.5 氮化硅波导与铌酸锂微环谐振腔耦合结构的扫描电镜图(a)氮化硅波导与铌酸锂微环谐振腔在垂直方向上的耦合偶结构的扫描电子显微镜俯视图像 (b)图 2(a)中蓝虚线框位置结构的截面的 SEM 图像 (c) 图(a)中黄色虚线框位置结构的剖视图 SEM 图像

Figure 4.5 Scanning electron microscope image of the coupling structure of silicon nitride waveguide and lithium niobate microring resonator (a) Top view SEM image of LN microring resonator and Si_3N_4 waveguide. (b) Sectional view SEM image of the structure at the location of the blue dashed box in Fig. 2(a). (c) Sectional view SEM image of the structure at the location of the yellow dashed box in Fig. 2(a).

此外，我们测量了化学机械抛光后的铌酸锂微环谐振腔的表面粗糙度以及 FIB 刻蚀产生的二氧化硅层凹槽底部的表面粗糙度，因为这两个地方的粗糙度直接决定了微环腔的平直因子和波导损耗。我使用原子力显微镜测得了这两处的表面粗糙的均方值，如图 4.6 所示，其中图 4.6(a)(c)分别式微环腔的 SEM 照片和其 AMF 照片，测得表面均方根粗糙度为 $R_q \sim 0.45\text{nm}$ ，图 4.6(a)(c)分别式二氧化硅凹槽的 SEM 照片和其 AMF 照片，测得表面均方根粗糙度为 $R_q \sim 1.22\text{nm}$ 。可见 FIB 加工过的区域的粗糙度还是明显高于化学机械抛光形成的区域，这也可以辅证我们使用 PLACE 工艺制备的铌酸锂片上光子器件的品质会高于通过离子刻蚀制备的光子器件。

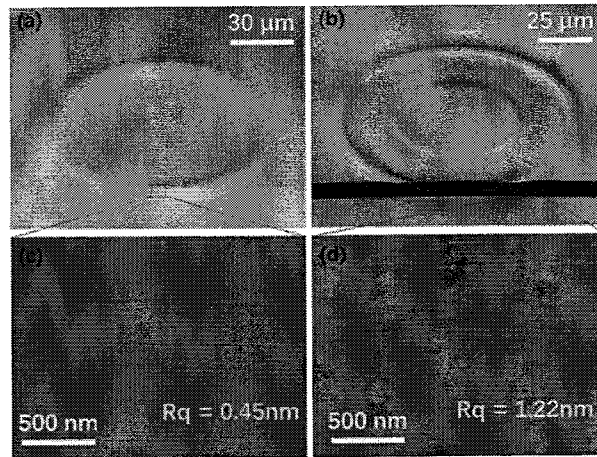


图 4.6(a)制备的 LN 微环谐振器的俯视图 SEM 图像。(b)在 SiO₂ 包层中制备的沟槽的俯视图 SEM 图像。(c)和(d)分别是(a)中微环表面和(b)中沟槽表面的 AFM 图像

Figure 4.6. (a) Top view SEM image of the fabricated LN microring resonator. (b) Top view SEM image of the trench fabricated in the SiO₂ cladding layer. (c) and (d) AFM images of the surfaces of the microring in (a) and the trench in (b) respectively.

为了得到所制备的微环谐振腔的透射谱、品质因子以及验证耦合结构的有效性，我们使用了如图 4.7 所示的测试实验装置。其中光源部分采用 New Focus 公司的可调谐激光器(tlb6728)，将其产生线宽为 200 kHz 的频率可调的 1520 nm 至 1570 nm 波段的激光通过锥角为 90° 透镜光纤将光耦合进氮化硅波导，如图 4.7 中的插图所示。为了增强探测信号，在耦合进氮化硅波导之前，可调谐激光器产生的激光被掺铒镱光纤放大器(EYDFA)增强，再通过光纤偏振控制器调节泵浦激光器的偏振。出射光同样由锥角为 90° 的光纤透镜收集进入光 Newport 公司生产的电探测器(1811-FC-AC)，光电探测器将收集到光信号转化成电信号送入示波器形成图像。为了精准稳定的得到微环腔的谐振模式透射谱，我们使用任意波形发生器(AFG3052C)来同步可调谐激光和示波器信号。

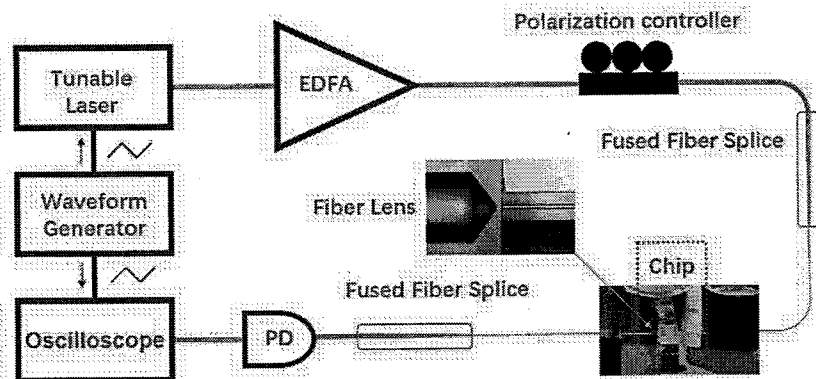


图 4.7 结构透射谱的测试装置示意图。插图为光纤透镜与波导耦合的光学显微照片。

Figure 4.7 Schematic of experimental testing setup. Inset: optical micrograph of the fiber lens coupling with the Si₃N₄ waveguide.

使用上述的测试方法我们得到如图 4.8(a)所示的 1537 ~ 1562 nm 波长范围的透射光谱。微谐振腔的自由光谱范围 FSR 为 3.34 nm。通过洛伦兹拟合，在谐振波长 1543.52 nm 附近选择一对劈裂的回音壁道模测量其因子。测量 Q 因子分别为 1.49×10^7 和 1.09×10^7 ，如图 5(b)洛伦兹曲线所示。这个结果说明这个铌酸锂微环腔被成功激励，基模的透射谱深度达到~0.9，接近临界耦合。同时除了基模透射谱中也存在部分高阶模式，说明铌酸锂微环腔并非严格单模的，这是考虑到这套直奔方案以及足够复杂，在此之上制备单模波导会增加工艺难度，进一步降低良品率，所以选择制备工艺相对简单的多模微环腔。

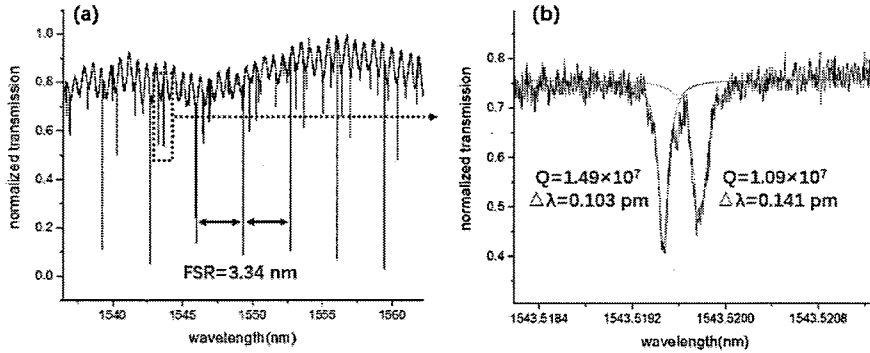


图 4.8 (a) 铌酸锂微环谐振腔的透射谱。(b)对图 4(a)中红色虚线处的劈裂模式进行洛伦兹拟合，品质因子分别为 1.49×10^7 (红色实线)和 1.09×10^7 (绿色实线)。

Figure 4.8. (a) Transmission spectrum of the LN microring resonator. (b) The Lorentz fitting of the splitting modes at the location of the red dotted box in Fig.4(a) reveals a Q-factor of 1.49×10^7 (red solid line) and 1.09×10^7 (green solid line), respectively.

4.4 不同耦合状态的调控

在本文第二章中提到微腔与波导耦合的基础理论中，有透射光强在入射光的波长在满足谐振条件（即失谐量为 0）的情况下为：

$$T = \left(\frac{\kappa - \alpha}{1 - \kappa\alpha} \right)^2 \quad (4.1)$$

式中 κ 为耦合强度， α 为微环中的损耗系数，由此根据耦合强度与损耗的相对大小，耦合状态通常分为三种情况

1) 临界耦合(critical coupling)

耦合强度 κ 和损耗系数 α 相等， $T=0$ 。光场在微腔中传播一个周期的损耗等于耦合引起的耗散，此时本征 Q 值恰好为负载 Q 值的两倍，微腔处于临界耦合状态(critical coupling)，共振频率处波导的输出端光功率为零，所有光场能量全部通

过耦合进入了微腔。

2) 过耦合(over coupling)

耦合强度 κ 大于损耗系数 α , 光场在微腔中传播一个周期的损耗远小于耦合引起的耗散, 微腔的耦合损耗为主要部分, 此时属于过耦合状态(over coupling), 微腔实载 Q 值较低;

3) 欠耦合(under coupling)

耦合强度 κ 小于损耗系数 α , 光场在微腔中传播一个周期的损耗远大于耦合引起的耗散, 微腔的本征损耗为占主要作用, 此时属于欠耦合状态(under coupling), 微腔实载 Q 值较高。

我们通过在本章第二节提出的片上垂直耦合结构的制备方案, 展示了耦合效率和品质因子可以通过改变 Si_3N_4 波导和 LN 微环之间的垂直耦合距离, 即 SiO_2 层的厚度来调整。这可以通过精确制备工艺中 4.4 (h) 中 FIB 刻蚀深度来实现。我们制备了三种不同耦合距离情况下的氮化硅波导与铌酸锂微环腔的耦合结构并用如图 4.7 的装置测量得到了他们的透射谱和品质因子, 其横截面结构和基模的分布如图 4.9 所示。

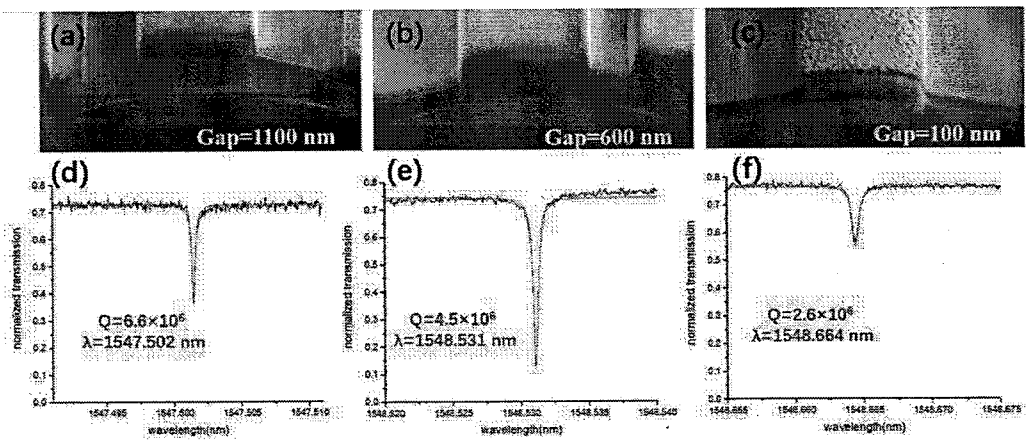


图 4.9 分别为 1100 nm (a)、600 nm (b) 和 100 nm (c) 时耦合结构的扫描电镜剖面图。(d)、(e) 和 (f) 分别为 (a)、(b) 和 (c) 中结构模式的洛伦兹拟合。

Figure 4.9 Sectional view SEM images of the coupling structures when the thickness of the SiO_2 cladding layer are 1100 nm (a), 600 nm (b), and 100 nm (c), respectively. The Lorentz fitting of the modes of the structures in (a), (b), and (c) are illustrated in (d), (e), and (f), respectively.

图 4.9(a) 和 4.9 (d) 为耦合距离为 1100 nm 时的情况, 这时耦合距离较大, 导

致氮化硅波导与铌酸锂微环的耦合效率较低,即耦合损耗较小,导致品质因子较高 6.6×10^6 。注意这里和接下来讨论的都是实载品质因子(即与本征品质因子相对应的考虑耦合损耗之后的品质因子)。如图 4.9(b)所示,我们将距离调整到 600 nm。在图 4.9 (e) 中可见其透射谱的最低光强达到了最大光强的 10%以及接近临界耦合条件。 q 因子为 4.5×10^6 。当距离进一步减小到 100 nm 时,其横截面构型如图 4.9(c)所示,此时的耦合效率过高,为微环腔引入了过大的耦合损耗,耦合系数 t 远大于微环腔中的损耗系数 a , Q 因子降低到 2.6×10^6 ,如图 4.9(f)所示。至此,我们完整的展示了通过控制耦合距离来调控微环腔的三种耦合状态。值得注意的是,在实验中我们采取的是调整垂直的耦合距离去实现耦合状态的调整,其实也可以通过调整氮化硅波导在水平方向上相对于微环的位置以实现对其耦合状态的控制,这可能在复杂的耦合结构制备中式更为高效的方法。

4.5 耦合结构制备工艺的优化

在介绍制备工艺的过程中我们分析到,使用引入聚焦离子束刻蚀的 PLACE 技术成本高、效率低、且工艺复杂度较大。我们在进行本章的工作时,面对上述困难依然选择这套技术是本着优先使用手边的工具完成实验为先的原则。在未来的工作中,我们完全可以对制备片上异质耦合结构的工艺进行优化以去除聚焦离子束刻蚀的限制。

这里给出可行的优化方案,其制备工艺流程如图 4.10 所示,其与图 4.4 所展示的工艺的主要区别在 h 步骤以及其之后, h 步骤之前制备铌酸锂微环谐振腔以及二氧化硅层的沉积都是相同的。在图 4.4 的工艺中。耦合区域的二氧化硅厚度是由聚焦离子束刻蚀控制的,但是在优化之后的方案中,我们通过化学机械抛光精确控制铌酸锂上方的二氧化硅层的厚度如图 4.10 (g),其厚度的实时监测可以由膜厚测量仪来实现,之后通过 PECVD 技术在二氧化硅层上沉积一层 550 nm 厚的氮化硅薄膜如图 4.10 (h),之后图 4.10 中的 i 、 j 、 k 步骤重复 b 、 c 、 d 步骤的过程使用 PLACE 技术,镀膜膜、飞秒激光烧蚀形成波导形状的铬掩膜,化学机械抛光将铬掩膜图案转移到氮化硅薄膜层上。唯一不同就是铌酸锂薄膜层换成了氮化硅薄膜层。值得注意的是虽然套工艺中虽然也可以通过精确控制化学机械抛光过程实现对垂直耦合距离的控制,但是由于化学机械抛光是一个全平面去除

的过程,在单片多个耦合结构中无法实现在对每个结构的耦合距离的单独控制,所得如果要独立的在同一个样品中控制多个耦合结构处于不同的耦合状态,需要使用横向调节耦合距离的方法。

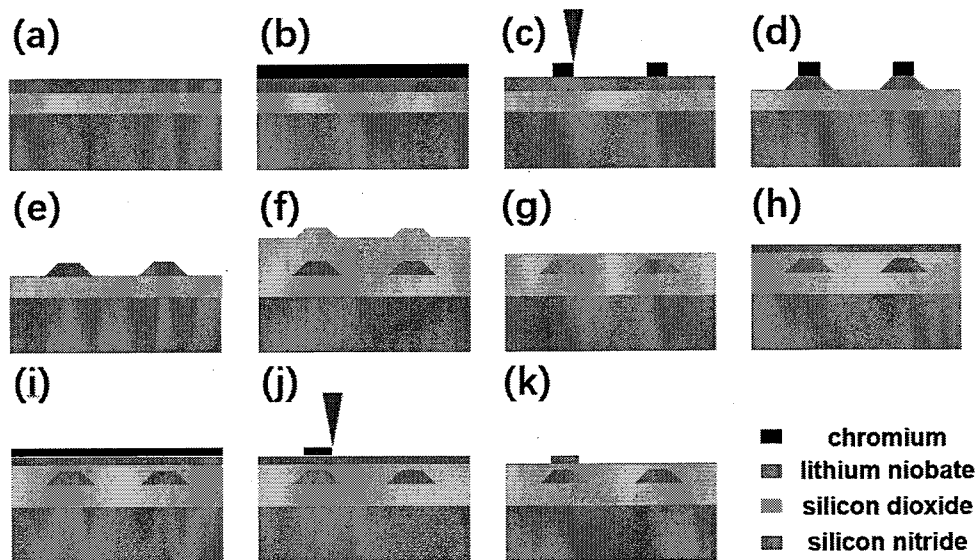


图 4.10 优化后的飞秒光直写结合化学机械抛光制备氮化硅波导与铌酸锂微环谐振腔的耦合结构的工艺流程图

Figure 4.10 The process flow chart of the optimized femtosecond optical direct writing combined with chemical mechanical polishing to fabricate the coupling structure of Si_3N_4 waveguide and LiNbO_3 microring resonator

我们进行本章的工作时,没有采用这套方案,主要原因是,当时我们并没有完全掌握氮化硅薄膜的高质量沉积方法,在二氧化硅上沉积的氮化硅薄膜总会出现键合不牢固,在抛光过程中脱落的问题。但是我们相信在后续的实验,随着经验的积累这个问题终将被解决,届时,我们就可以实现高效率的低成本的片上垂直耦合器件的制备。

4.6 本章小结

在本章的工作中,我们通过将聚焦离子刻蚀引入飞秒激光光刻辅助的化学机械抛光中的制备方案中,成功制备了氮化硅波导与铌酸锂微环谐振腔的片上高集成度的上下耦合耦合结构。该结构中,我们使用光线透镜将光耦合进氮化硅波导,氮化硅波导通过倏逝波将光耦合进铌酸锂微环谐振,后收集铌酸锂微环谐振腔耦合回氮化硅波导的光信号得到铌酸锂微环谐振腔的透射谱,得到了铌酸锂微环谐

振腔的透射谱，表征了其自由光谱范围 FSR 为 3.34 nm，品质因子最高高达 1.49×10^7 ，验证了在和半导体工艺的兼容中，我们提出的飞秒激光直写辅助的化学机械抛光技术依然可以保持超高的器件质量。同时，通过精确控制耦合距离（~10nm）实现了耦合状态调控，展示了过耦合、欠耦合和进临界耦合三种耦合状态。最后未来克服焦距离子刻蚀成本高效率低下的缺点，我们还讨论重复利用 PLACE 技术对这套制备工艺的优化。

本章的工作所提出的制备片上光子器件的方案使得单根波导在同一个芯片上与多个异质的谐振腔的耦合成为可能，同时可以独立控制每个微腔的耦合效率，这有利于大规模片上光子芯片的集成。因此该方案提供了一种很有前途的光子集成解决方案，有望助推铌酸锂片上光子器件在片上非线性光学、片上光学互连、片上人工智能等广泛领域应用。

第5章 总结和展望

5.1 全文总结

本文最重要的工作是开创性的将化学机械抛光技术与飞秒光刻蚀相结合,发展出来一套具备大规模生产潜力的铌酸锂片上光子器件的制备方案。主要工作包括以下三个部分:

1. 创新性的将化学机械抛光应用于铌酸锂片上光子器件的制备中,结合飞秒激光直写,在全世界范围内首次制备出了品质因子超过一千万的铌酸锂微盘谐振腔。主要制备步骤为在铌酸锂薄膜材料上利用吹起辅助的飞秒激光直写构建铬金属掩膜、化学机械抛光将掩膜图案转移到铌酸锂薄膜层上、氢氟酸的缓冲腐蚀液腐蚀形成凌空的片上铌酸锂微盘谐振腔。后利用光线锥耦合,得到铌酸锂微盘的透射谱并且表征了其品质因子高达 1.47×10^7 ,并且在 1550nm 光的激励下,探测到了微腔中所产生 775nm 附近的倍频信号以及倍频信号的拉曼散射,并确定了拉曼信号的转换效率为 0.28%。为了进一步提高微腔品质因子,我们在抛光工艺上进行了系统的优化,进一步将微腔的品质最高提升至 4.70×10^7 ,此外我们使用原子力显微镜表征了所制备的铌酸锂微盘腔的表面粗糙度,其表面粗糙度均方根 R_q 为 0.115nm。同时应用此方案制备了大量不同直径的片上铌酸锂微盘谐振腔验证制备方案的稳定性,并且研究了微腔 Q 值随微腔尺寸变化的规律,后使用有限元模拟辅证了猜想。最后利用对制备过程中对化学机械抛光的精准控制,我们对铌酸锂微盘谐振腔的边缘楔角实现了 9° 至 51° 的连续可调,为控制铌酸锂微腔中的光场模式提供了一个额外的自由度。
2. 利用飞秒激光直写辅助的化学机械抛光技术,成功制备了高折射率对比度的铌酸锂单模波导。制备的工艺流程主要是 1. 在铌酸锂单晶薄膜上沉积一层 600nm 厚的金属铬膜; 2. 利用飞秒激光直写将单模波导的掩膜图案刻写到金属铬上形成铬波导掩膜,掩膜宽度 1.1 微米; 3. 利用化学机械抛光将铬掩膜图案转移到铌酸锂薄膜层上,形成铌酸锂波导; 4. 利用铬腐蚀液清除残余的铬掩膜; 5. 利用化学气相沉积蒸镀上二氧化硅覆盖层。如此制备

出的铌酸锂单模波导，波导层的铌酸锂与覆盖层二氧化硅的折射率差值达到 0.7，使得波导的转弯半径小于 50 微米。基于上述的技术，我们制备了分光比为 48: 52 的多模干涉耦合器。并基于多模干涉耦合器设计并制备了完美分光的马赫曾德干涉仪，并标定了其消光比为 28.8dB，半波电压为 15V。后用完美分光的马赫曾德干涉仪连接不同长度的铌酸锂单模波导回旋延时线，通过对比两根延时线的出口光场强度，得出所制备的铌酸锂单模波导损耗为 0.13dB/cm。为了提升光纤到所制备的铌酸锂光子芯片的耦合效率，我们利用选择性的化学机械抛光将铌酸锂光子芯片靠近端口的波导抛光至锥形，故端口处的模场得以放大，更加匹配光纤中的模场，使用这种方法，光纤到芯片的耦合效率从 1%提升至 15%。

3. 通过将聚焦离子刻蚀引入上述的制备方案中，成功制备了氮化硅波导与铌酸锂微环谐振腔的片上高集成度的上下耦合耦合结构。该结构中，我们使用光线透镜将光耦合进氮化硅波导，氮化硅波导通过倏逝波将光耦合进铌酸锂微环谐振，后收集铌酸锂微环谐振腔耦合回氮化硅波导的光信号得到铌酸锂微环谐振腔的透射谱，得到了铌酸锂微环谐振腔的透射谱，表征了其自由光谱范围 FSR 为 3.34 nm，品质因子最高高达 1.49×10^7 ，验证了在和半导体工艺的兼容中，我们提出的飞秒激光直写辅助的化学机械抛光技术依然可以保持超高的器件质量。同时，通过精确控制耦合距离 (~10nm) 实现了耦合状态调控，展示了过耦合、欠耦合和进临界耦合三种耦合状态。

5.2 展望

近年来，在铌酸锂薄膜片上的光子器件的研究逐渐兴起，各种制备方案各种光子器件层出不穷，但仍有许多尚未解决的问题，例如：

目前各个研究组制备的铌酸锂薄膜光子器件都还是无源的，需要外接引入光源去激励所制备的铌酸锂光子器件。在铌酸锂光子器件下一步的发展道路上，需要思考如何将具有源的偶极子能级结构集成到芯片上，如量子点、色心、可集成的微型半导体激光器等等。这对铌酸锂片上光子器件的制备提出了更高的要求。

基于我组提出的飞秒激光结合化学机械抛光的制备方案，其最主要的两个优势在于超高的器件表面光滑度(低损耗、高品质因子)和大规模的并行生产潜力。但是此套制备技术也有需要克服的缺点，例如如何兼容成熟的半导体制备工艺的

极紫外光刻，从而进一步提升光子芯片的加工效率；例如克服小线宽（小于1微米）的化学抛光抛光的掩膜图案转移问题；如何摆脱聚焦离子刻蚀这样的高成本低效率的微纳制备技术，基于飞秒光直写结合化学机械抛光实现片上的铌酸锂器件的耦合等等

目前光子芯片的片外到片上的耦合方案尚不成熟，高效低成本的耦合方案可以进一步降低光子芯片的插损和光子芯片的制备成本，为光子芯片的市场化应用打开局面。目前的光纤透镜耦合、锥形波导耦合等方案都存在进一步发展的空间。未来在光子芯片的片外到片上的耦合研究上，我们可以大有所为。

我相信随着越来越多的科研力量进入铌酸锂片上光子学的研究中，上述的问题终究会在一位位的科研人的日以继夜的努力奋斗中得以解决，铌酸锂片上的微纳光子学终会在光子芯片这个重大应用方向上大放异彩。