电 子 科 技 大 学

学术学位研究生学位论文中期考评表

攻读学位级别： □博士 ☑硕士

学科专业： 信息与通信工程

学 院： 信息与通信工程

学 号： 202021010238

姓 名： 郑 翔

论文题目： 高稳定度铌酸锂基

腔光机械振荡器

指导教师： 黄勇军

填表日期： 2022 年 7 月 9 日

电子科技大学研究生院

1. 已完成的主要工作

|  |  |
| --- | --- |
| **1.开题报告通过时间：** 2022 年 4 月 28 日 | |
| **2. 课程学习情况** | |
| 是否已达到培养方案规定的学分要求 | ☑是 □否 |
| **3. 论文研究进展** | |
| 从理论分析或计算部分、实验（或实证）工作等方面进行总结（可续页）  根据论文开题时所制定的研究计划，本论文主要研究内容以及现阶段完成情况如下图1所示。    图1 学位论文整体研究内容、创新点及研究进展  腔光机械系统是一种在维纳尺度上同时存在光学腔体模式和机械振荡模式，且这两种模式之间具有强耦合互作用效应的新型微腔系统。本学位论文聚焦于光子晶体腔光力系统，针对现有腔光力系统中光机械振荡射频信号源无法实现长时间高稳定度这一技术瓶颈，结合了单晶铌酸锂薄膜材料所具有的的宽光谱低损耗特性，拟研究设计一种高稳定度的铌酸锂基光机械振荡器。   1. **铌酸锂基光子晶体腔光力系统的设计：**   **研究原因与动机：**  光子晶体是通过周期性地纳米图案化薄膜结构以获得光和机械运动的共同限制。推动光力晶体发展的主要包括两个方面：其一是光机晶体具有光学和机械场局域在一个器件上的特性且其纳米级结构使得振子质量极低。这种结构原则上可以比法布里-珀罗腔光力系统提供更大的光机械耦合强度；第二个方面是光子晶体打孔以及其结构设计等技术可以为开发具有更高复杂的光机械系统提供更多的自由度，由于其在结构设计灵活方面的巨大优势，使得光力器件的应用范围以及光声信号的调制能力得到了很大的提高。光子晶体光力器件未来在经典光通讯，非线性动力学研究以及量子通讯，量子信息，量子计算等领域都将发挥出更大的作用。  腔光机械系统还可用以实现超高稳定度的射频信号源输出，进而应用于芯片级精准授时、通信等领域。但是，在基于腔光力系统的高稳定度射频信号源研究领域，已报道的各种光机械振荡射频信号源技术方案并未从本质上改善光机械振荡信号的频率稳定性，且远未达到芯片级参考时钟和高精度导航与定位等器件与系统的性能需求。  针对此关键科学问题，综合利用铷原子气体超精细分裂原子能级跃迁可输出超高稳定度射频信号的优势，以及单晶铌酸锂薄膜材料所具有的的宽光谱低损耗特性，将两种频率源结合起来。鉴于目前实验室光源工作在通信C波段（~1550nm），首先需要设计一款能工作在~1550nm的铌酸锂基光子晶体腔光力系统。  **创新点：**   1. 使用铌酸锂作为基底加工单晶铌酸锂薄膜。铌酸锂材料具有宽光谱低损耗特性，其光学模式的品质因子Q~106，比硅基高出一个数量级。 2. 使用空气槽加载的光学谐振腔。空气槽起到了自由空间场局域化的作用，空气槽中的电场强度提高，进一步提高了光学模式的品质因子。 3. 提出一种固定铌酸锂薄膜四角的双悬臂型机械振子结构。可以调节悬臂尺寸来调制铌酸锂薄膜的机械振动频率。   **具体内容：**  光子晶体腔光力系统的设计可以分为四部分：光子晶体阵列设计、光子晶体波导设计、光子晶体微腔设计、光子晶体光机耦合设计。    图2 铌酸锂基光子晶体腔光力系统设计  （1）光子晶体阵列设计部分：与普通晶体中周期性电势形成电子能带和电子带隙类似，光子晶体中周期性介电常数对光子的调制形成了光子能带与光子带隙。实验使用300nm后的铌酸锂晶圆，通过通过调节光子晶体晶格常数、空气孔半径参数，设计获得能工作在通信C波段（~1550nm）的铌酸锂基二维光子晶体。  **仿真结果验证：**  使用时域有限差分法（FDTD）仿真研究不同参数（晶格常数、小孔半径、平板厚度）对铌酸锂基光子晶体能隙的影响，依此选择合适的参数。  以小孔半径的研究为例，在保证晶格常数和平板厚度不变的条件下，研究不同空气孔半径对光子晶体能隙宽度和范围的影响。进行了三组不同晶格参数条件下的仿真研究如图3所示：  其中左图为能隙宽度随空气填充率的变化，可以看出随着空气填充率的增大，能隙宽度呈现出先增大后减小的趋势，且小孔半径为0.35倍晶格常数时，可以获得最宽的带隙，此时带隙宽度能达到240nm；  其中右图为能隙位置随空气填充率的变化，选择能隙中心为纵坐标，可以看出随着空气填充率的增大，能隙中心点一直呈现向低波长移动的趋势。  选择晶格常数为650nm，鉴于实验中所用激光源的波长范围为1510-1620nm范围，为使得能隙范围能较好覆盖激光源范围，选择小孔半径为185nm，由此得到了最后的铌酸锂基光子晶体参数：晶格常数650nm、小孔半径185nm、铌酸锂平板厚度300nm，能隙范围为1.47-1.64um。    图3 小孔半径对铌酸锂基光子晶体带隙的影响   1. 光子晶体波导设计部分：在二维平板光子晶体中引入线性缺陷，即可形成光子晶体波导。光子晶体波导在水平方向通过禁带束缚光子，在垂直方向通过全反射束缚光子，形成一系列波导模式。在设计好的铌酸锂基光子晶体的基础上，通过通过调节光子晶体线缺陷宽度，设计获得能工作在通信C波段（~1550nm）的铌酸锂基二维光子晶体波导。   **仿真结果验证：**  使用Lumerical软件中的MODE模块进行光子晶体波导模式的仿真。在光子晶体阵列的基础上，设置一排固定宽度的线缺陷，就形成了光子晶体波导。研究光随着光子晶体波导传输时的衰减，从光源出发，选择传输5um、10um之后的光透射率，以此表征光波导的束缚效果如图4所示：  其中左图为线缺陷宽度为1143nm的透射率曲线，图中三条曲线分别为光源位置处透射率（即x=0曲线），此时透射率为1，可以看出随着光波导的传输，波长范围为1.5-1.65um的光可以稳定传输，而1.65um以上波长的光会随着传输不断衰减；  其中右图为线缺陷宽度为1372nm的透射率曲线，图中三条曲线分别为光源位置处透射率（即x=0曲线），此时透射率为1，可以看出随着光波导的传输，波长范围为1.5-1.65um的光可以稳定传输，而1.65um以上波长的光会随着传输不断衰减。    图4 光子晶体波导传输效果   1. 光子晶体微腔设计部分：在光子晶体中引入缺陷实现光限制，就形成了微腔，使用光子晶体的带隙结构来实现光的反射，如果腔的尺寸正适合容纳一个处在禁带中的模式，就将这个模式束缚在了缺陷处，如果这个模式与传播模有非零耦合，能量就会从谐振方向泄露出去，这一特性用微腔的品质因子Q来描述。本文设计研究了L3型微腔结构，并将周围三层空气孔分别进行不同程度的位移dA=15nm、dB=10nm、dC=5nm实现光限制。   之后在在已获得的铌酸锂基二维光子晶体微腔结构的基础上，进一步的，在线缺陷型二  维光子晶体波导的波导中线部分进行空气槽加载。对于平板型微谐振腔，此处空气槽起到了自由空间场局域化的作用，空气槽中的电场会提高，使得模型的Q值提高。  **仿真结果验证：**  使用Lumerical软件中的FDTD模块进行光子晶体微腔设计的仿真验证。首先验证空气槽  自由空间场局域化对空气槽中电场的影响。由于光子晶体腔中的电场的TE模是x偏振的，因此空气槽表面附近电场的边界条件是：    其中和分别是光子晶体材料和空气的介电常量，和分别是光子晶体材料里  面和外面的位置，这样空气槽中的场强提高了两个介电常数之比约为2倍。选取模型中x,z=0处，观测y值不同的情况下空气槽附近的场能量如图5所示：  其中左图为不同y即不同模型点处的场能量曲线，横坐标为波长，纵坐标为场能量，曲线从上到下y依次等于0、40nm、50nm、60nm，空气槽中心处坐标xy均为0，可以看出越靠近空气槽中心场能量越高；  其中右图是选取了左图中场能量最高点，横坐标为y坐标值，纵坐标为最高的场能量值，可以直观看出空气槽中心处场能量最高，两边场能量对称且越远离空气槽中心场能量越低。    图5 研究空气槽对附近能量的影响效果  之后研究不同参数对铌酸锂基光子晶体微腔光学模式的影响，包括对光学模式谐振波长和品质因子的影响。以空气槽宽度的研究为例，在保证线缺陷宽度、微腔小孔微扰等参数都不改变的条件下，研究不同空气槽宽度对光学模式谐振波长和品质因子的影响如图6所示：  其中左图中横坐标为空气槽的宽度，纵坐标为谐振波长，可以看出随着空气槽宽度的增加，谐振波长不断减小；这是因为线缺陷区域的有效折射率系数随着空气槽的变宽单调地减小，因此谐振腔的有效腔长减小，谐振波长变短。且随着空气槽宽度的不断增大，此处的一阶偶模谐振点会消失，原因是设计的光子晶体带隙如右图约为1450-1650nm，当超出带隙范围之后谐振模式的场能量聚集效果会逐渐变差，最后消失；  其中右图中横坐标为空气槽的宽度，纵坐标为光学模式的品质因子Q值，可以看出随着空气槽宽度的增加，Q值也在不断减小；Q对空气槽宽度的依赖性主要通过有效折射率的降低来解释，即随着槽宽度的增加，全内反射(TIR)的条件变得严重。    图6 研究空气槽宽度对光子晶体光学模式的影响   1. 光子晶体光机耦合设计部分：   采用腔光机械系统的多物理场耦合理论，构建本文的铌酸锂基腔光机械机构的光学-机械  场耦合模型：  (1-1)  (1-2)  式(1-1)中为微腔内的光场，为光学失谐率，为光机械耦合率，为光学谐振模式衰减率，为外部衰减率，为激励激光强度；  式(1-2)中为机械位移量，为机械谐振衰减率，为机械谐振频率，为机械振子的有效质量，和分别为光学力和热噪声力。采用微扰理论、准静态近似法等研究获得铌酸锂基二维光子晶体腔光机械结构的光机械耦合特性：  (1-3)  式(2-3)中为分界面外法向单位向量，为铌酸锂介质与空气介质介电常数之差，为平行于界面的电场分量，为垂直于界面的电位移场分量，为机械振子的零点波动振幅。  利用COMSOL等多物理场联合仿真模块，仿真计算出铌酸锂基二维光子晶体腔光机械结构的光机械耦合率，研究不同光学模式、不同机械模式情况下的光机械耦合率变化特性如图7所示：  根据已获得的铌酸锂基二维光子晶体腔光机械结构的各参数，结合式(2-1)和(2-2)推导得到腔光机械结构中的光场特性：  (1-4)  和简化的光学弹性效应理论关系式：  (1-5)  便可理论计算出机械振荡频率（）与腔光机械结构的光机械耦合率（）、激光-腔体失谐率、光学谐振值、腔体内能量之间的关系曲线如图7所示，进而逆向指导、优化设计整个铌酸锂基二维光子晶体腔光机械结构，实现机械振荡频率的有效控制。    图7 光机械耦合特性及光学弹性特性理论与仿真结果   1. **铌酸锂基光子晶体腔光力系统的测试：**   **腔体制备流程：**  铌酸锂基二维光子晶体微腔的制备拟采用如图1-6所示成熟制备流程。具体流程包括：（1）采用标准 RCA 流程清洗从济南晶正电子科技有限公司购买到的高性能X-切向铌酸锂晶圆；（2）采用等离子增强化学气相沉积法（PECVD）在已清洗好的晶圆上沉积非晶硅层；（3）在非晶硅表面旋涂 PMMA 电子束刻蚀光刻胶，然后经电子束光刻机（EBL）曝光、显影得到设计好的光子晶体圆孔阵列和空气槽；（4）采用标准反应离子刻蚀（RIE）法刻蚀非晶硅层；（5）继续采用Ar+等离子刻蚀技术刻蚀铌酸锂层；（6）采用丙酮等去除顶层光刻胶、氢氧化钾（KOH）等溶液去除非晶硅层、RCA 清洗晶圆；（7）使用氢氟酸（HF）气体刻蚀机，释放氧化硅层，得到悬空的铌酸锂基二维光子晶体微腔结构。在上述多步刻蚀及腐蚀过程中，需要多次尝试，优化具体刻蚀工艺精度、刻蚀流程、刻蚀时间，以及优化氢氧化钾和氢氟酸溶液浓度、腐蚀时间，保证最终制备出的光子晶体结构具有良好的表面光滑度，空气孔和空气槽部分具有最为陡峭和光滑的切面。    图8 铌酸锂基二维光子晶体腔光机械结构加工流程  **测试平台：**  测试系统如图1-7，测试得到的光写和机械谐振特性的数据通过数据采集卡、GPIB等经计算机Labview程序控制进行采集与存储。    图9 二维光子晶体腔光机械结构性能测试系统  **具体内容:**  目前已经投版加工了一版芯片，但是天津加工方的芯片刻蚀深宽比无法满足实验设计好的芯片参数需求，未能将空气孔刻透。由于第一版铌酸锂基光子晶体微腔芯片加工失败，就先使用之前硅基的小微腔进行光学模式的测试练习。测试过程可以分为三个部分：  首先加工制作带有微凹的光纤，在使用光纤熔融拉锥机将光纤拉倒足够细之后使用打磨好的约100um粗的铅笔芯在光纤最细处压出一个微凹形状并定型封装如图10所示；  之后将封装好的亚克力支架固定在搭好的测试平台上，将光纤耦合到光子晶体的空气槽处使用空气槽加载光源观测计算机采集到的光强曲线。  9[QLKJ20$HP2$WB]355CO5U D2X46@N0HBWX4WBS4UN%4{O  图10 光纤的加工定型与封装  1 Ln-9dbm-耦合2  图11 光纤与光子晶体微腔的耦合  06090609--  图12 观测到的光子晶体光学模式与机械模式  可以看出在1580nm和1595nm处有光的衰减现象，这是由于光子晶体微腔中的缺陷将这一波长的光束缚在光子晶体微腔之中，形成了光学模式和机械模式。 | |
| **4. 阶段性研究成果** | |

1. 存在的主要问题和解决办法

|  |
| --- |
| 1.未按开题计划完成的研究工作，研究工作存在的原理性、技术性难题以及在实验条件等方面的限制（可续页）  **未按开题计划完成的研究工作：**   * 加工测试设计的腔光机械振荡器，分析性能指标。工作在1550nm的铌酸锂基光子晶体微腔仍未能拿到芯片成品，天津加工方由于工艺深宽比限制无法加工设计好的铌酸锂基光子晶体微腔，目前更换了加工方，加工进度仍在跟进。   **研究工作存在的问题:**   1. 铌酸锂基光子晶体微腔的光学模式品质因子Q值问题   光学模式品质因子Q值的计算一直是仿真设计中的一大难点。由于FDTD内置的Q分析器得到的计算结果很容易收到仿真模型中一些无关量的影响（光子晶体品质因子的大小，理论上只取决于光子晶体微腔的参数，而实验中发现光源的位置也会对分析器结果产生影响），因此品质因子的计算只能采用定性的方式，在保证所有其他参数不变的条件下，控制改变其中某一参数变化来定性分析该参数对光学模式品质因子的影响。   1. 硅基光子晶体微腔测试的机械模式分析问题   硅基光子晶体微腔的测试目前也存在两大问题。一方面是由于此硅基芯片已经使用较久，在长期的测试过程中，微腔的很多结构已经出现了一些损毁，光纤与微腔耦合时要谨慎避开损毁处，同时也不好确定芯片上的一些残留是否会对机械模式产生影响；另一方面是光纤与微腔耦合要遵循两大原则：耦合长度足够短、光纤宽度足够细，光纤宽度就需要尽可能让光纤熔断拉锥台将光纤拉倒足够细，耦合长度就对光纤的定型有较大的需求。在实际加工过程中，满足以上两大原则的光纤成品率不高，因为他对仪器和实验员操作熟练度都有很高的需求。 |
| 2.针对上述问题采取何种解决办法，对学位论文的研究内容及所采取的理论方法、技术路线和实施方案的进一步调整，以及下一步的研究研究计划（可续页）   1. **铌酸锂基光子晶体微腔的光学模式品质因子Q值问题解决方案：**   仿真得到的品质因子可以作为参考表征设计得到的铌酸锂基光子晶体微腔的性能，但是由于FDTD软件中内置的Q分析器计算得到的结果不够精确，使得获得的Q值可能低于预期值。我们准备重新设计找到一个比较准确的品质因子计算方式，并结合Comsol软件获得的计算结果，综合考量得到一个比较理想的光学模式品质因子Q值。   1. **硅基光子晶体微腔测试的机械模式分析问题解决方案：**   实验测试得到的硅基的机械模式，目前品质因子较低，即其对光的束缚能力比较差，考虑是由于光纤微凹的部分较粗，使得光纤与光子晶体微腔耦合效果较差导致。我们准备多次实验，在尽可能使得微凹处光纤足够细的前提下，同时尽可能减少微凹与光子晶体微腔的耦合长度，理论上就可以得到一个高品质因子的模式。  **下一步工作计划及目标：**   1. 测试现有的硅基光子晶体微腔芯片，熟练腔光力系统的测试流程，耦合找到比较理想的机械模式。 2. 跟进铌酸锂芯片的加工进度，早日拿到芯片进行测试。测试加工得到芯片的成品率，并在考虑加工误差的条件下，重新优化设计铌酸锂基光子晶体微腔。   **时间进度安排及预期成果：**  表1 进度安排与研究内容   |  |  | | --- | --- | | **起始时间** | **完成内容** | | 2022年7月-2022年10月 | 跟进拿到铌酸锂基微腔的芯片，进行成品率及其光机模式的测试。 | | 2022年10月-2023年1月 | 考虑加工误差，对之前的铌酸锂基芯片进行优化设计。 | | 2023年1月-2023年4月 | 加工得到的高Q值铌酸锂基微腔的芯片，并完成硕士毕业论文的撰写。 |   在后续研究工作中，按照表3进度安排与研究内容进行研究，撰写并投稿1篇高水平论文，同时完成硕士论文的撰写以及硕士学位论文答辩。 |

1. 中期考评审查意见

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 1.导师对工作进展及研究计划的意见： | | | |
| 导师（组）签字： 年 月 日 | | | |
| **2.中期考评专家组意见** | | | |
| 考评日期 |  | 考评地点 |  |
| 考评专家 |  | | |
| 考评成绩 | 合格 票 基本合格 票 不合格 票 | | |
| 结 论 | □通过 □原则通过 □不通过  **通过：**表决票均为合格  **原则通过：**表决票中有1票为基本合格或不合格，其余为合格和基本合格  **不通过：**表决票中有2票及以上为不合格 | | |
| 对学位论文工作进展，从事科学研究的能力和作风，以及下一步研究计划的建议，是否适合继续攻读学位： | | | |
| 考评组签名：  年 月 日 | | | |
| **3.学院意见：** | | | |
| 负责人签名： 年 月 日 | | | |