



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Enabling quantum optomechanics for phononic crystals and superfluid helium films

Wei, X.

### Citation

Wei, X. (2026, September 8). *Enabling quantum optomechanics for phononic crystals and superfluid helium films*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4309245>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/4309245>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

# 总结与展望

---

我们熟悉的宏观世界遵循经典物理规律，而原子、电子等微观粒子的行为则由量子力学描述。一个长期以来备受关注的的问题是：当量子系统的尺度不断增大时，会在何时、以及如何失去其量子特性？腔光力学利用光与机械运动之间的相互作用，实现对机械系统的精确测量和调控，是研究这一问题以及微小机械系统中丰富物理现象的重要实验平台，在宏观量子态制备、精密测量以及非线性动力学等方向都发挥着重要作用。

本论文主要介绍了两个腔光力学实验。第一个实验利用光对一块极薄（25nm）的氮化硅薄膜进行测量和冷却，为未来探索宏观尺度下的量子现象奠定基础；第二个实验研究凝结在光学谐振腔表面的超流氦薄膜，观察其在光的作用下产生的复杂动力学行为。这两个实验分别聚焦于宏观量子现象和非线性动力学，展示了腔光力学在不同研究方向中的应用。

---

量子测量是量子力学的基本问题，也是量子信息科学的重要基础，为量子密码学和量子纠错等技术提供了理论支撑。为了从实验上研究量子系统向经典世界过渡的过程，探索宏观物体的量子叠加态已成为当前的重要研究方向。

本论文介绍了两个腔光力学实验，其中利用光来测量和控制宏观机械系统的运动。第一个实验将一块氮化硅薄膜耦合到法布里-珀罗（Fabry-Pérot）光学腔中，目标是将机械振子冷却到量子基态。第二个实验将光学环形谐振腔与一层超流氦薄膜耦合，并研究其非线性动力学。在这两个系统中，机械运动都会引起光学腔共振频率的变化，而腔内光场又会反过来作用于机械振子的模式。

论文第一部分介绍了低温氮化硅薄膜（membrane-in-the-middle）实验平台的搭建与实验结果。实验目标是将氮化硅薄膜冷却至接近其机械基态，并通过探测单个Stokes 与anti-Stokes 散射光子来测定其声子占据数。实现这一目标需要三个关键组成部分：薄膜的边带冷却、高性能的光子滤波系统，以及具有高探测效率和低背景噪

声的单光子探测系统。

第一章介绍了第一部分工作的研究背景与总体内容。第二章主要介绍单光子探测系统的搭建及性能测试。实验中，将四个WSi 超导纳米线单光子探测器 (SNSPD) 安装在稀释制冷机的1 K 平台，通过优化光学和电磁屏蔽，系统实现了高探测效率和低暗计数率。在1064nm 波长下，系统探测效率最高达到约94%。实验结果表明，该探测系统已具备探测腔光力学实验中弱散射光子的能力。

第三章介绍了光学滤波系统的设计与实现。该系统用于将机械运动产生的边带信号与强驱动激光分离，由四个串联的法布里-珀罗腔组成，并采用基于反射信号的锁定方案实现稳定运行。实验中，整个滤波系统的总光学透过率约为40%，理论上可在距离载波1 MHz 处提供约140 dB 的泵浦光抑制。结合第二章搭建的单光子探测系统，该滤波系统为后续开展Stokes 与anti-Stokes 光子计数实验提供了关键的实验平台。

第四章展示了低温膜片腔光力学实验平台。为了获得高机械品质因子，实验采用具有声子带隙结构的高应力氮化硅薄膜，并将其置于法布里-珀罗光腔内，在稀释制冷机中冷却至90 mK。声子带隙结构能够有效抑制机械能量向支撑结构泄漏，从而显著降低机械耗散。整个光腔安装于混合室平台 (mixing chamber plate)，并进行了机械隔振，以降低脉冲管制冷机振动对实验的影响，为约1 MHz 机械模的低温测量提供稳定的实验环境。

薄膜振动会调制光腔共振频率，并在驱动激光两侧产生Stokes 与anti-Stokes 边带。红失谐驱动增强anti-Stokes 散射，实现机械模冷却；蓝失谐驱动则增强Stokes 散射，从而放大机械振动。实验结果验证了上述动力学过程，并最终将机械模平均声子数降至约 $\bar{n}_m \approx 10$ 。

在完成机械冷却、光学滤波和单光子探测系统的搭建后，原计划进一步开展单光子边带探测实验，通过测量Stokes 与anti-Stokes 光子的计数率，以单光子探测的方式表征机械模的量子状态。然而，由于邻近实验室装修产生的粉尘污染，薄膜样品及低温光腔受到损坏，这一实验最终未能完成。尽管如此，本论文完成了实现单光子边带探测所需各项关键技术的设计、搭建与实验验证，为后续开展机械量子态实验奠定了基础。

论文第二部分研究了低温下凝结于直径约6 mm 光学环形谐振腔表面的超流氦薄膜。超流氦薄膜支持第三声集体振荡，并通过光学倏逝场与环形谐振腔耦合，实现对其动力学的光学探测。

与氮化硅薄膜实验中动力学行为主要由辐射压驱动不同，超流氦系统的动力学主要来源于腔内光场产生的光热效应。局部加热打破了超流氦薄膜的热平衡，引发超流流动并重新分布薄膜厚度。薄膜厚度的变化又会影响腔内光场，从而形成光场、温度和超流流动之间的反馈回路，并产生丰富的非线性动力学行为。

在较低光功率下，不同膜厚条件均观察到了清晰的第三声集体振荡模式。随着驱动光功率逐渐增加，系统首先发生频率切换，主导振荡频率跃迁至更低频率；继续增

大驱动后，频谱中出现约为原始频率一半的亚谐波响应，表明系统进入更复杂的非线性动力学状态；当驱动进一步增强时，系统最终演化为持续数分钟的混沌运动。本实验观测到了超流氦薄膜丰富的非线性动力学行为，包括规则振荡、频率切换、亚谐波响应以及混沌运动。

目前的实验尚不能唯一确定每一种观测到的动力学过程背后的物理机制。实验结果表明，观测到的复杂动力学行为很可能是多种物理机制共同作用的结果。例如，光热效应会改变超流氦薄膜的厚度分布，引发超流流动；有限的热弛豫时间引入延迟反馈，而第三声模式之间的耦合则进一步增加了系统的动力学自由度。此外，超流氦薄膜的大振幅振荡引起的第三声频率的强非线性效应也可能在系统动力学中发挥重要作用。

对于氮化硅薄膜实验，下一步工作是在洁净的实验条件下恢复实验平台，并完成冷却后的机械谐振器与滤波系统及单光子探测系统的联合实验。通过测量Stokes与anti-Stokes光子的散射率，可独立标定机械模的平均声子占据数，并与传统边带热测方法进行交叉验证。在此基础上，进一步探索宏观机械系统量子叠加态的制备与操控。

对于超流氦薄膜的实验，未来工作可以进一步系统研究其非线性动力学行为。通过扫描光功率、激光失谐、温度以及液膜厚度等实验参数，可构建更加完整的动力学相图，从而进一步区分光热效应、热延迟反馈、超流流动以及模式耦合等不同物理机制的贡献。结合定量理论模型，有望深入理解超流氦薄膜中的非线性动力学过程，并进一步推动光学操控超流氦薄膜的发展，使其成为研究宏观量子流体动力学的重要实验平台，为第三声激发、量子涡旋动力学以及高精度腔光力学传感等方向提供新的研究基础。