



哈爾濱工業大學
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

第十一届全国高等学校物理实验教学研讨会

气体分子高分辨吸收光谱测量

娄秀涛

哈尔滨工业大学

2022年8月，厦门

目录

实验背景

实验原理

实验装置

实验结果与分析

目录

实验背景

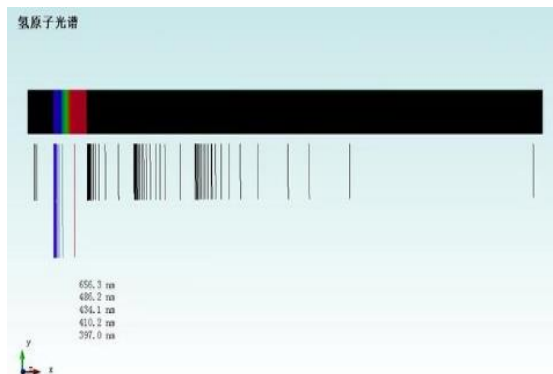
实验原理

实验装置

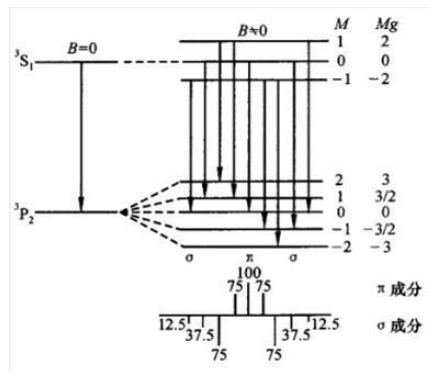
实验结果与分析

光谱学有关内容在大学物理的光学部分中占有一定的比重，这也相应的反映在了大学物理实验，特别是近代物理实验中。

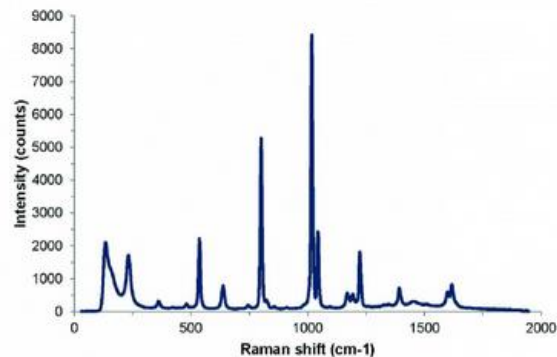
氢原子光谱



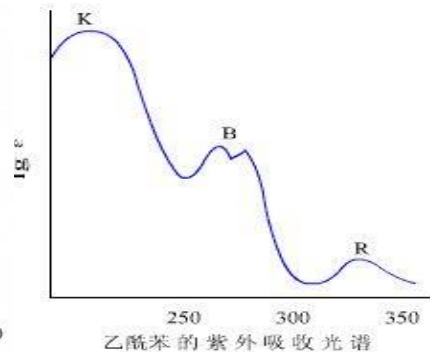
塞曼效应



拉曼光谱



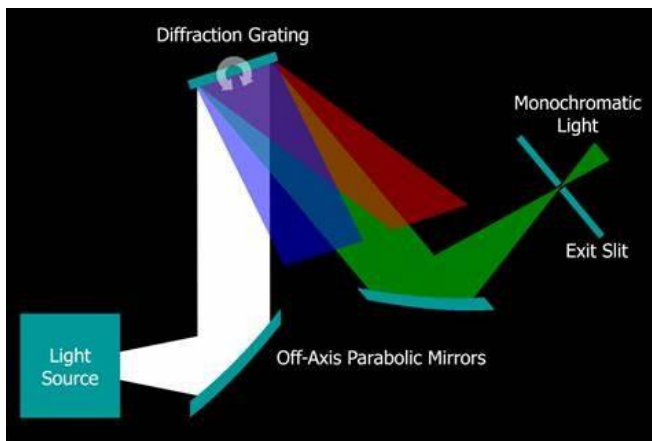
吸收光谱



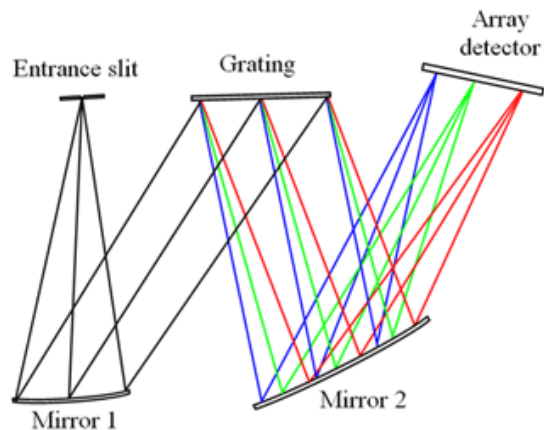
吸收光谱是分子光谱学的一个重要分支，很多高校将其纳入了近代物理实验教学内容。

吸收光谱实验的主流方案

- 采用光栅单色仪，利用点探测器对某一波长透射光进行选择探测



- 采用光栅摄谱仪，用阵列探测器对不同波长透射光进行同时探测



- 两种方案的共同本质：宽谱带光源+分光装置
- 分辨率nm量级，仅适用于具有宽谱带吸收的固态或液态物质。

气态小分子吸收谱线窄 ($<0.1\text{nm}$)，需要更高光谱分辨率 (pm级)，具有窄带发射光谱的可调谐二极管激光光源 (线宽 0.01 pm 量级) 是最佳选择。

目录

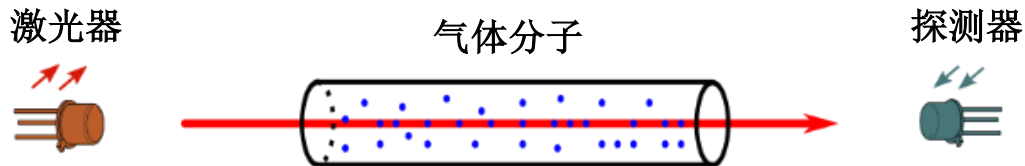
实验背景

实验原理

实验装置

实验结果与分析

吸收光谱测量原理



激光穿过气体，激光波长扫过气体吸收谱线，产生由吸收所带来的光强衰减，由比尔-朗伯定律描述：

$$I_t = I_0 \exp[-S\phi(\nu)NL]$$

吸收线强

吸收线型表达式

分子数密度

吸收路径长度

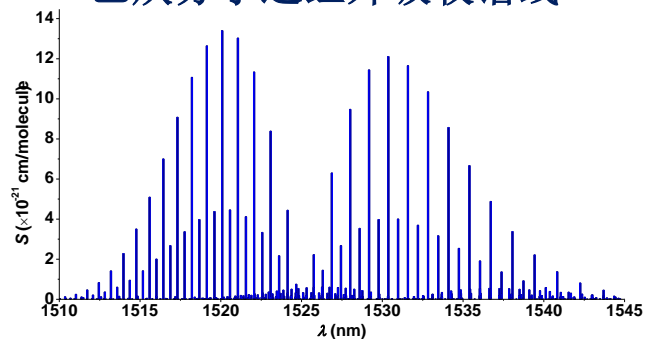
$$\phi_c(\nu) = \frac{\Delta\nu_c / 2\pi}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu_c / 2)^2}$$

吸收谱中心频率

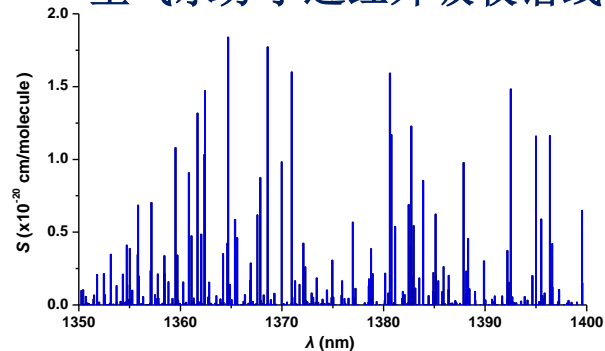
谱线半高全峰宽(FWHM)

气体在常压情况下，碰撞展宽占主要优势，近似为洛伦兹线型

乙炔分子近红外吸收谱线



空气水分子近红外吸收谱线



二极管激光波长调谐原理

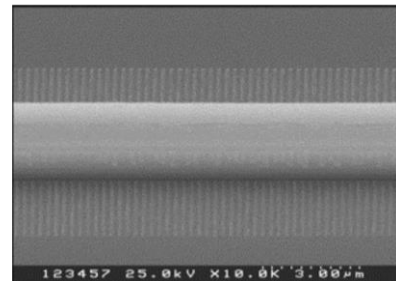
➤ 单纵模输出

二极管激光器半导体晶体内刻布拉格反馈光栅，可实现亚皮米量级的窄线宽单纵模输出。

激光器实物照片



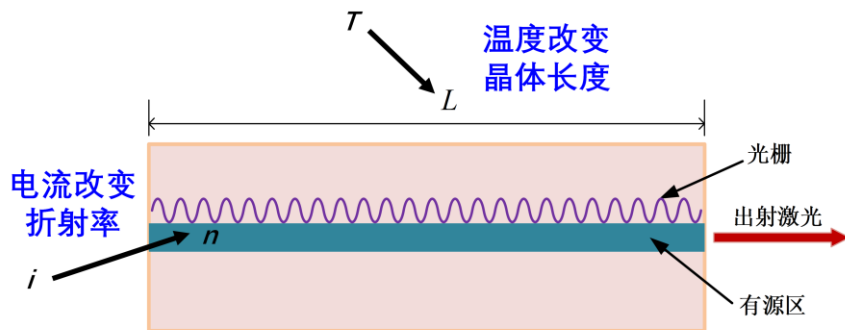
激光晶体光栅电镜图



➤ 波长调谐

大范围：调节激光器的工作温度，改变激光晶体长度，进而实现输出波长的较大范围调节（几个nm）

快速：调节激光器的工作电流，通过改变半导体增益区载流子密度改变其折射率，进而实现输出波长的快速调谐（~0.5 nm@1 kHz）



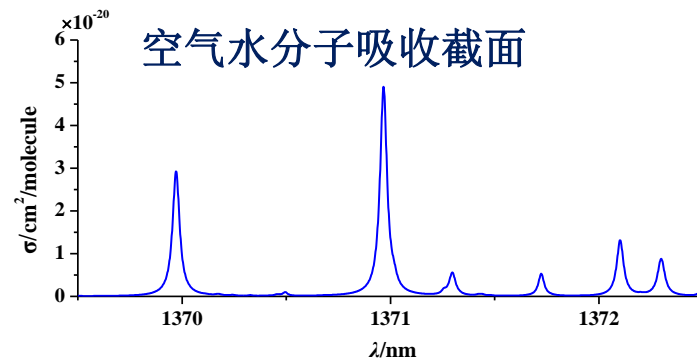
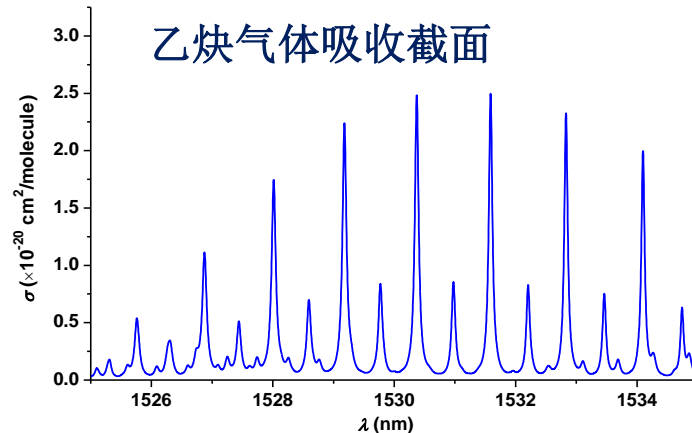
$$\lambda = 2nL / m$$

$$-\ln(I_t / I_0) = \sigma(\nu)NL$$

吸收截面 $\sigma(\nu) = S\phi(\nu)$

两种气体浓度分析方案

- 先用可溯源的标准气体测量得到气体吸收截面，再用该标准吸收截面分析待测气体浓度
- 直接用标准数据库（如HITRAN）中的吸收截面（通过理论或实验获取）分析待测气体浓度



目录

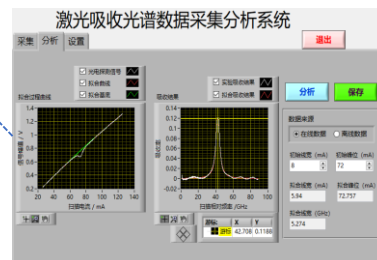
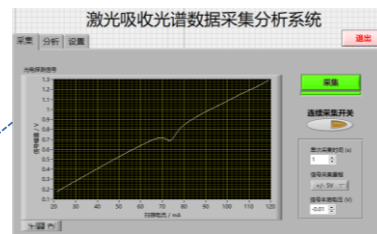
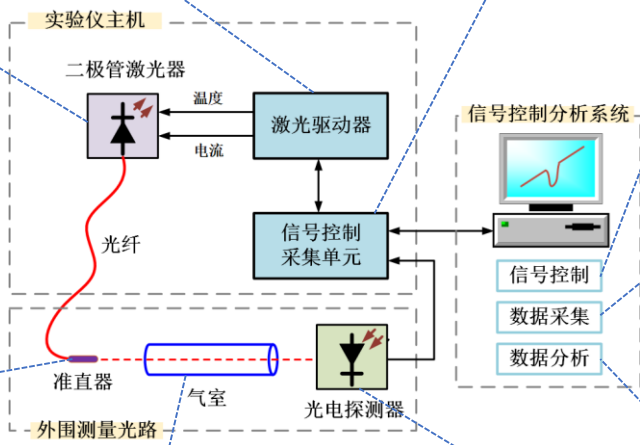
实验背景

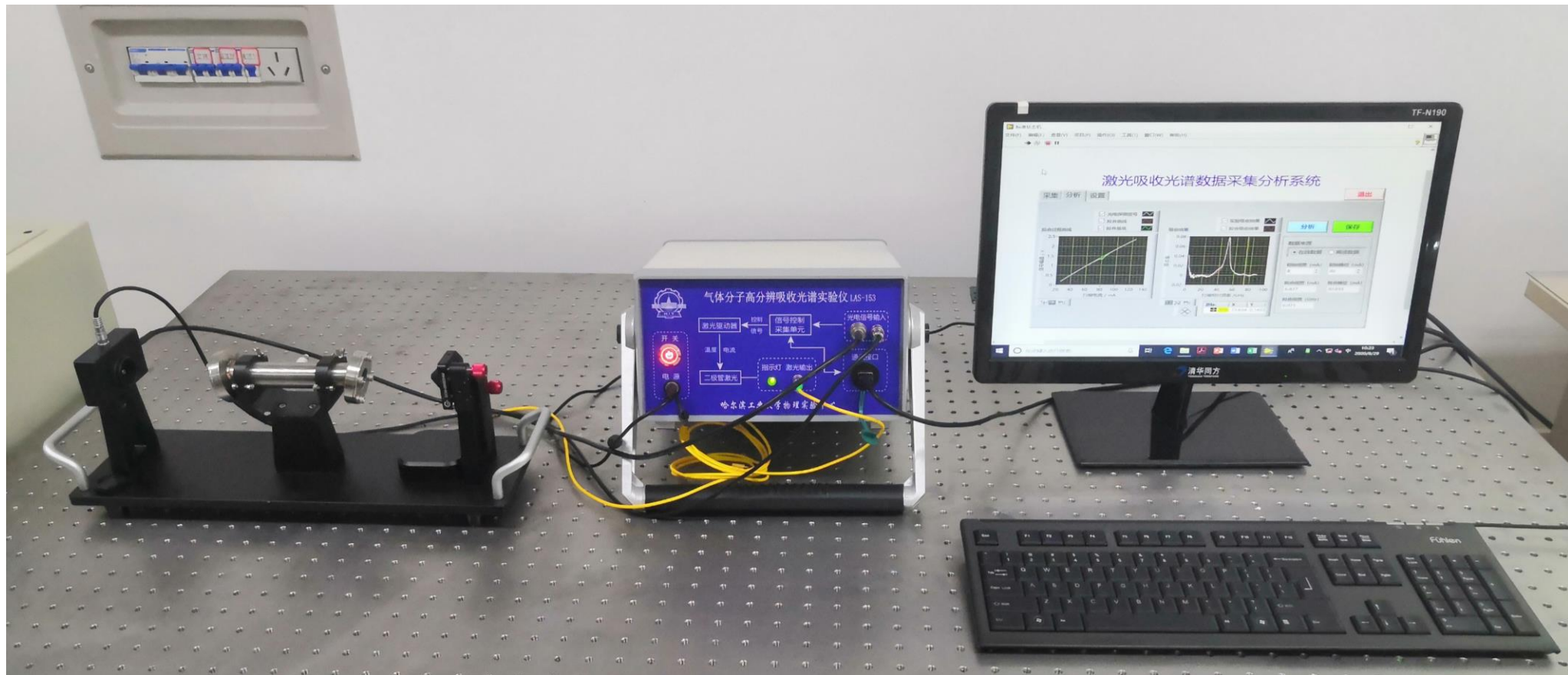
实验原理

实验装置

实验结果与分析

实验装置组成结构





目录

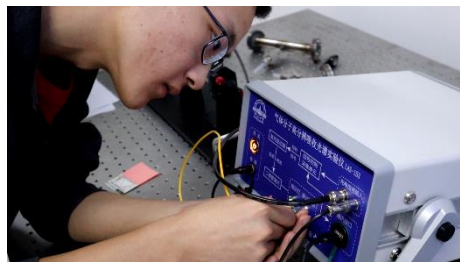
实验背景

实验原理

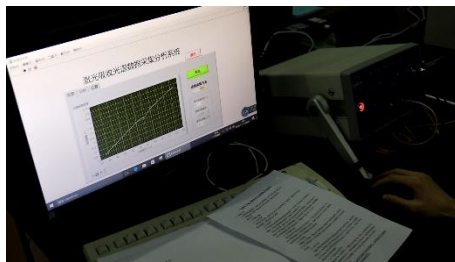
实验装置

实验结果与分析

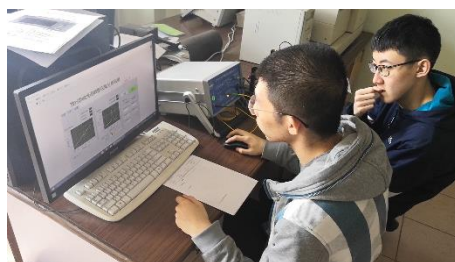
系统搭建 与光路调节



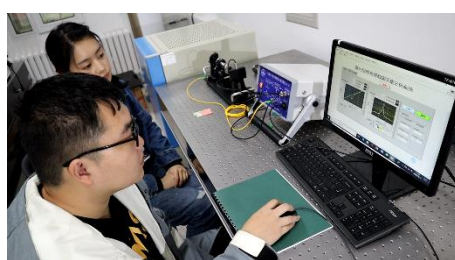
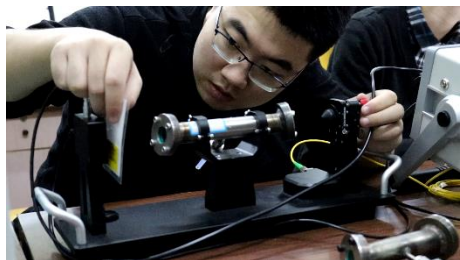
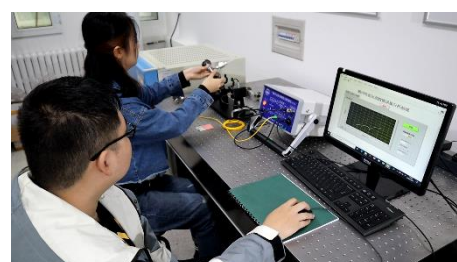
气体吸收信号 观察与优化



吸收光谱信号 采集与分析

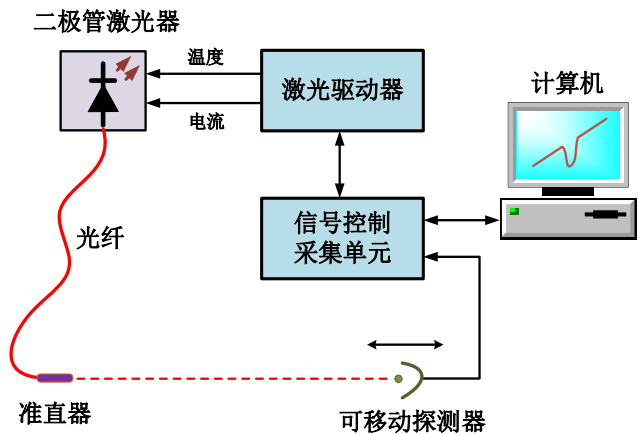


气体浓度 传感分析



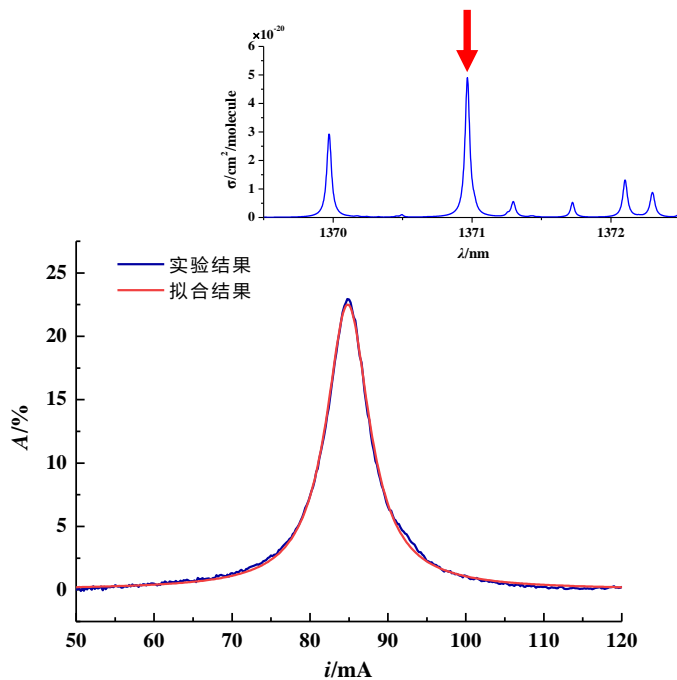
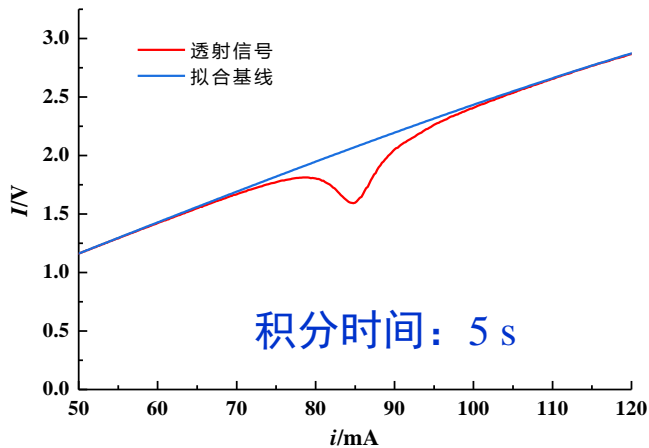
实验结果与分析——以空气中水分子为例

实验参数



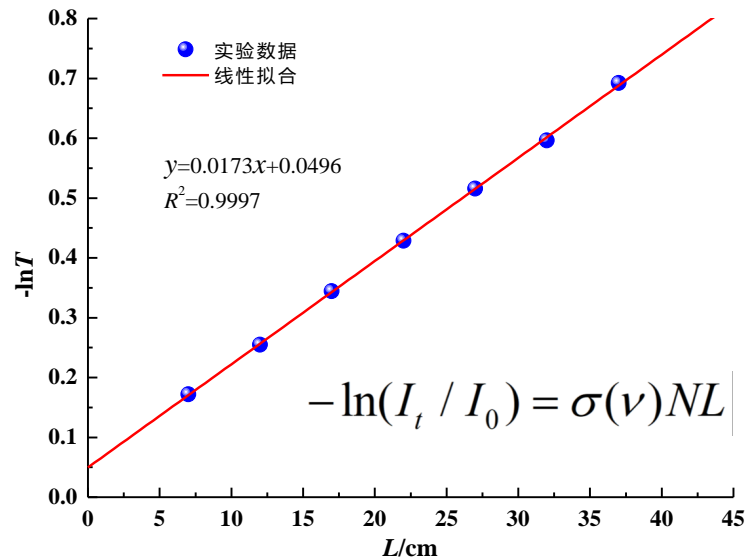
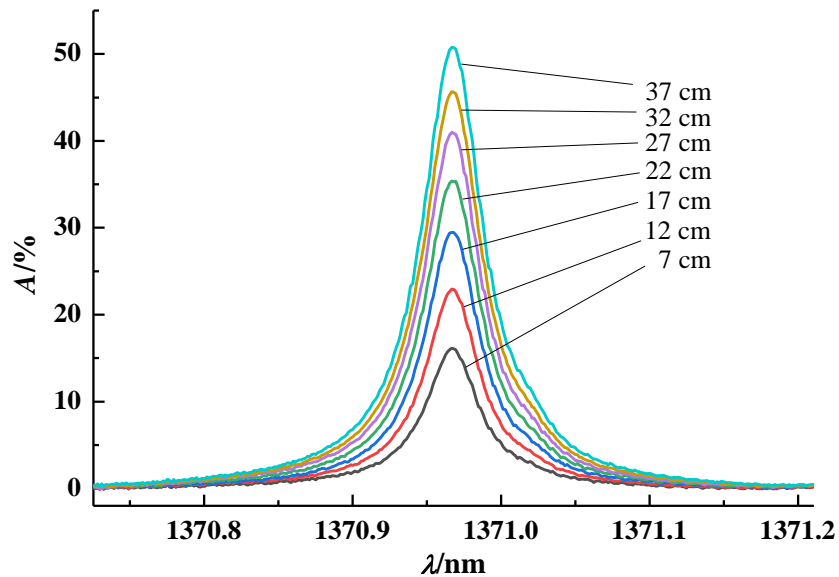
激光工作温度：28.5 °C
激光输出中心波长：1370.97 nm
激光线宽：~0.01 pm
电流调谐系数：5.56 pm/mA
波长扫描范围：~0.5 nm
波长扫描重复频率：10 Hz

原始信号与数据处理



采用洛伦兹线型对吸收信号实施最佳拟合，拟合结果与实验结果具有良好的一致性，验证了在常压情况下气体水分子的吸收谱线展宽以碰撞展宽为主。

不同吸收光程下空气水分子吸收光谱数据分析



根据吸收光谱两端非吸收区的噪声水平评估得到噪声等效吸收率为0.1%，对应1 m吸收光程下的水分子最低探测限为4.8 mg/m³。

测得空气水分子粒子数密度为 3.52×10^{17} 个/cm³，对应空气绝对湿度为10.5 g/m³，相对湿度为54.2% (实验室室温22 °C)。

- 只需更换低成本的激光光源就可开展不同气体分子吸收光谱测量，实现实验内容的有效拓展。（已开发出两种气体的吸收光谱测量实验仪）

气体	吸收波段
乙炔 (C_2H_2)	1510~1540 nm
水蒸气 (H_2O)	1340~1400 nm
二氧化碳 (CO_2)	1570~1574 nm
一氧化碳 (CO)	1565~1572 nm
氨气 (NH_3)	1510~1530 nm
硫化氢 (H_2S)	1570~1580 nm

- 介绍了利用波长可调谐的二极管激光实现气体分子高分辨吸收光谱测量的原理、装置和方法。
- 展示了空气水分子吸收光谱实验结果，验证了常压情况下空气水分子吸收光谱以碰撞展宽为主要展宽机制，通过测得水分子高分辨吸收光谱实现了空气湿度的快速、准确传感分析。
- 所提出的气体分子高分辨吸收光谱测量实验，拓展了当前高校开设的吸收光谱实验内容，可与目前基于光栅光谱仪的液体和固体吸收光谱实验形成有益互补，对于学生了解和掌握基于可调谐激光光源的高分辨光谱测量手段具有很好的启发意义。

谢谢!



Email: louxiutao@hit.edu.cn

电话: 18686748206