



浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY



基于数字锁相放大器的教学实验

物理学院 物理实验教学中心

郑远

phyyzheng@zju.edu.cn



第一部分

背景与原理

第二部分

锁相放大器应用举例

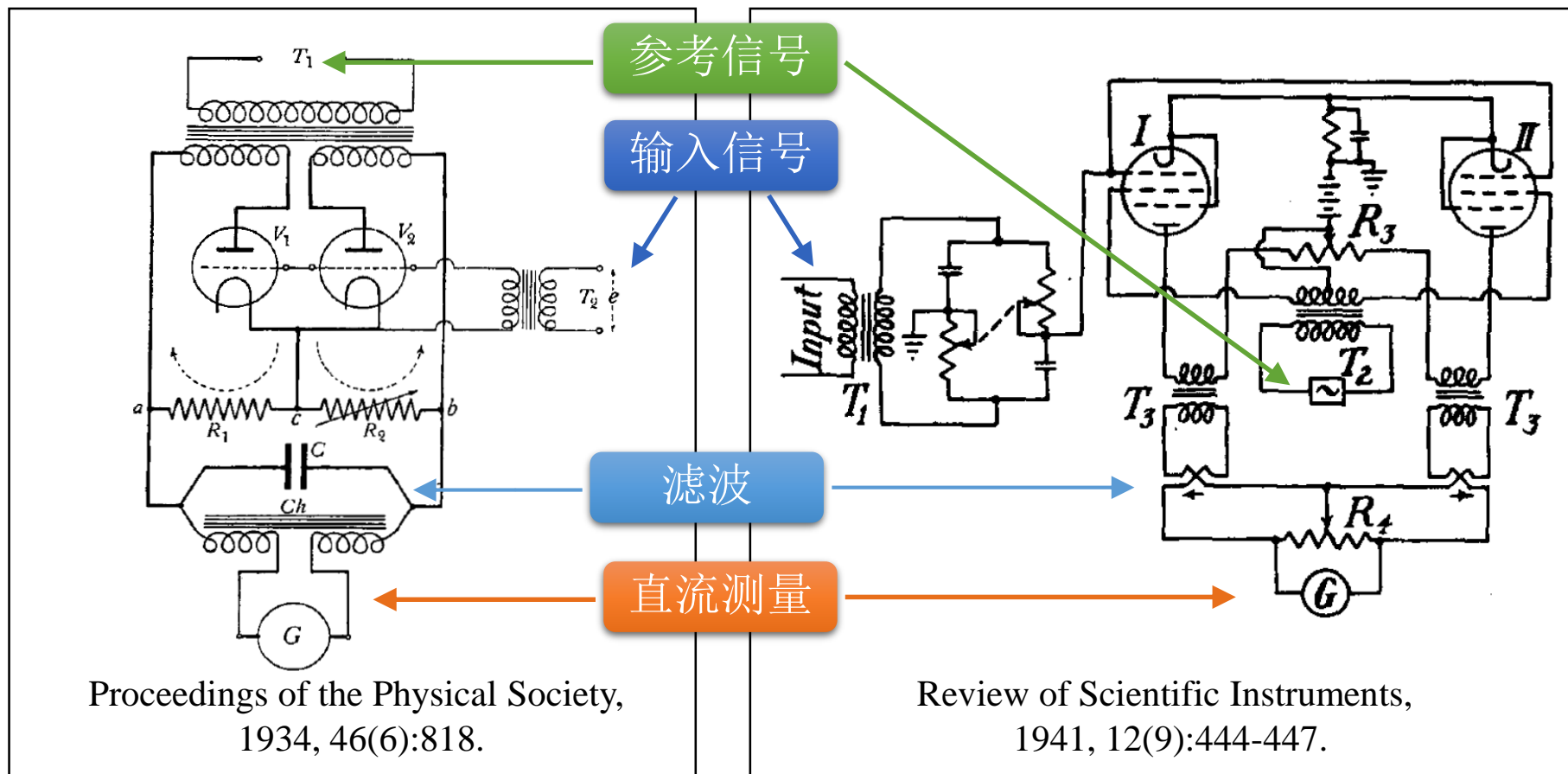
第三部分

锁相放大器实验教学

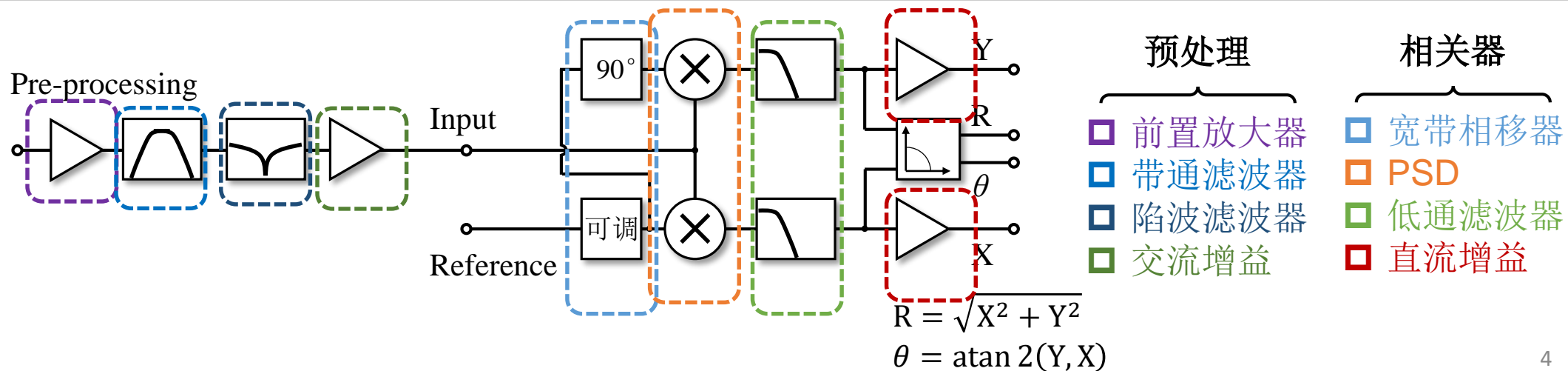
第四部分

总结与展望

- 1934年，C. R. Cosens制作基于三极管交流电桥的电平衡锁相仪
- 1941年，W. C. Michels和N. L. Curtis制作基于五极管的锁相放大器



- 1934年，C. R. Cosens制作基于三极管交流电桥的电平衡锁相仪
- 1941年，W. C. Michels和N. L. Curtis制作基于五极管的锁相放大器
- 半导体工业发展，现代数字型锁相放大器



Input signal:

$$V_{in}(t) = A_{in} \sin(\omega_s t + \varphi_s) + B_{in}(t)$$

Reference signal:

$$\begin{cases} V_{r1}(t) = A_r \cos(\omega_s t + \varphi_r) \\ V_{r2}(t) = A_r \sin(\omega_s t + \varphi_r) \end{cases}$$

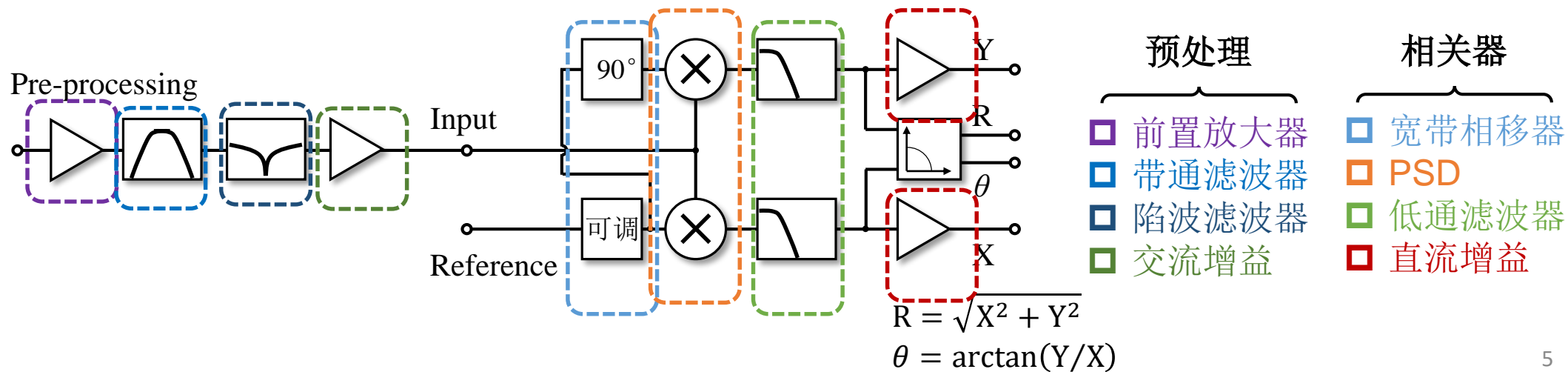
×



$$\begin{cases} V_{in} \cdot V_{r1} = \frac{1}{2} A_{in} A_r [\sin(\varphi_s - \varphi_r) + \sin(2\omega_s t + \varphi_s + \varphi_r)] + B_{in}(t) A_r \cos(\omega_s t + \varphi_r) \\ V_{in} \cdot V_{r2} = \frac{1}{2} A_{in} A_r [\cos(\varphi_s - \varphi_r) - \cos(2\omega_s t + \varphi_s + \varphi_r)] + B_{in}(t) A_r \sin(\omega_s t + \varphi_r) \end{cases}$$

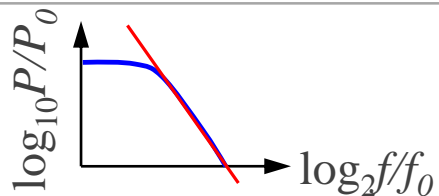
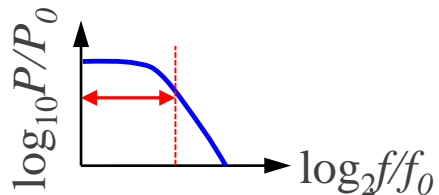
低通

$$\begin{cases} X = \frac{1}{2} A_{in} A_r \cos(\varphi_s - \varphi_r) \\ Y = \frac{1}{2} A_{in} A_r \sin(\varphi_s - \varphi_r) \end{cases}$$



低通滤波：时间常数

- 时间常数为 RC
- 滤波带宽反比于时间常数

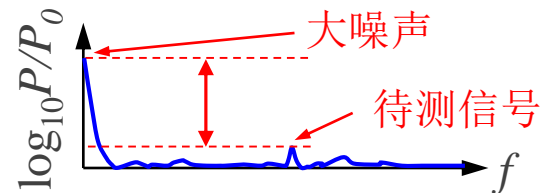


- 陡降决定滤波边沿斜率
- 滤波阶数越高斜率绝对值越大

低通滤波：陡降

动态储备

- 动态储备反映容错能力
- 信噪比低需要大动态储备



- 满刻度灵敏度根据信号调节
- 小信号需要高灵敏度

满刻度灵敏度

锁相放大
主要性能



光谱测量

- 吸收谱
- 荧光谱
- 激光谱等

光干涉仪

- 迈克尔逊干涉仪
- 克斯特干涉仪
- 马赫-森德干涉仪等

红外热像仪

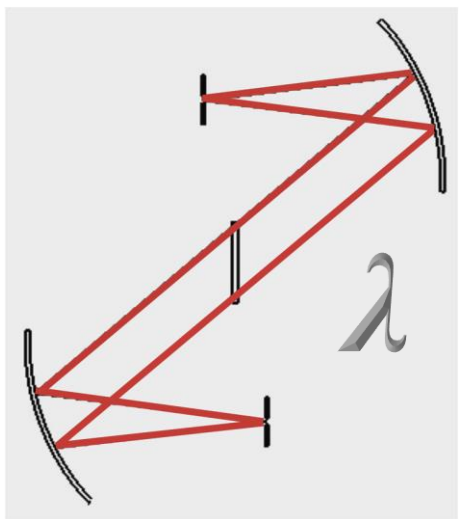
- 光热辐射
- 光致热成像
- 超声热成像等

高阶显微技术

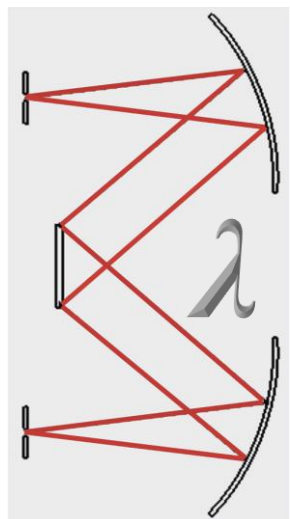
- 扫描隧道显微镜
- 极化分辨共聚焦显微镜等

Applications of lock-in amplifiers in optics
Gerhard Kloos

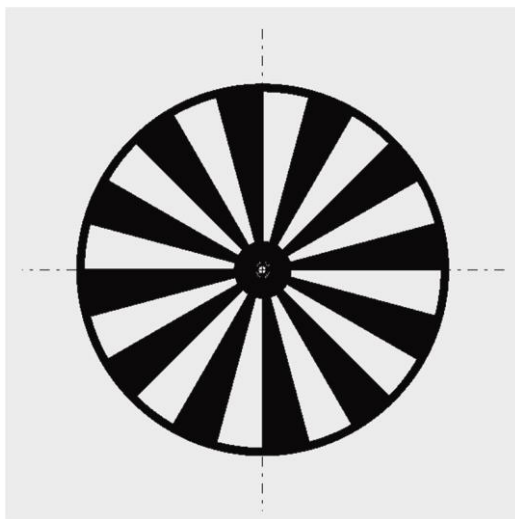
光谱测量



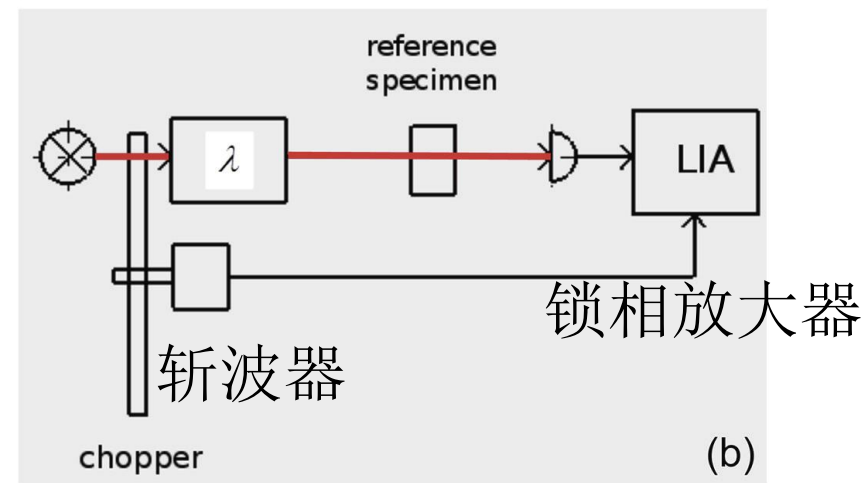
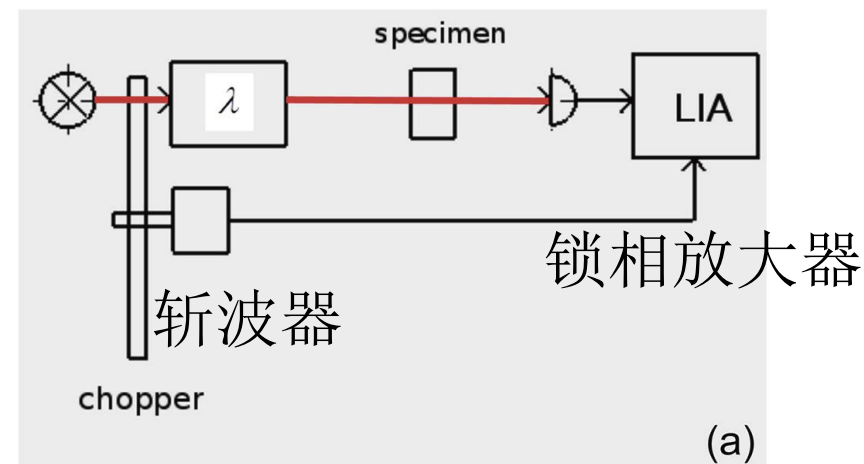
透射式



反射式

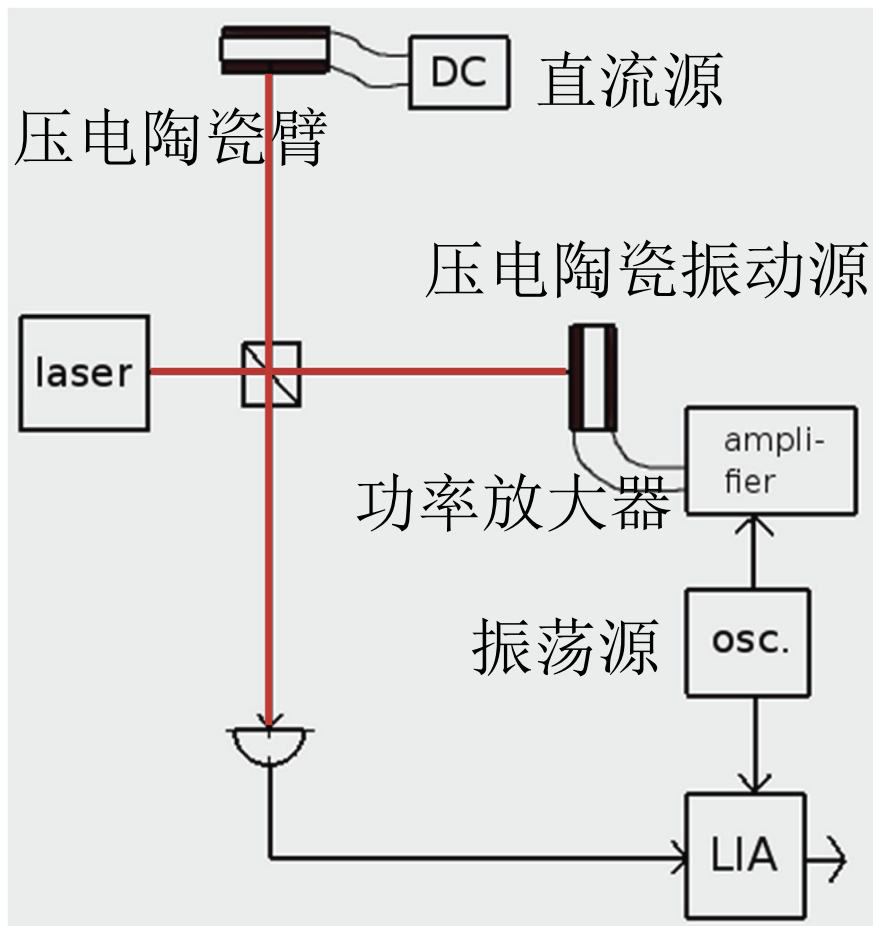


斩波器

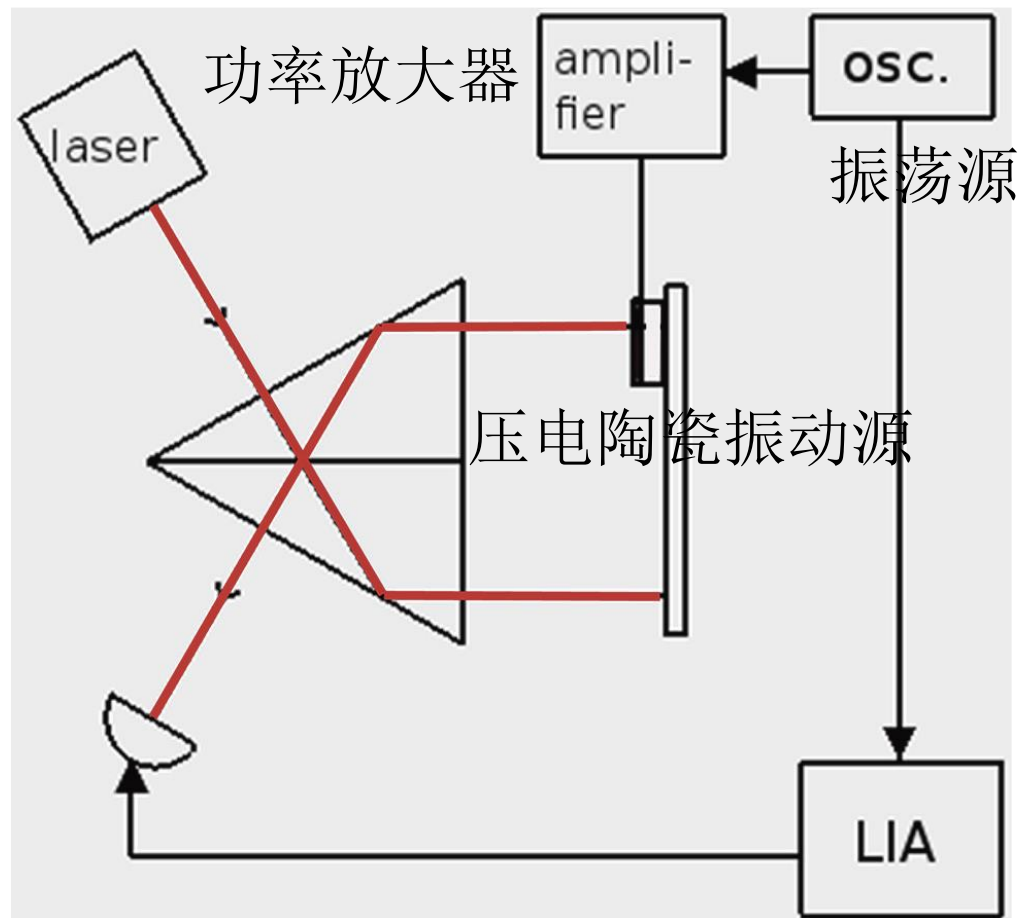


光路原理图

光干涉仪

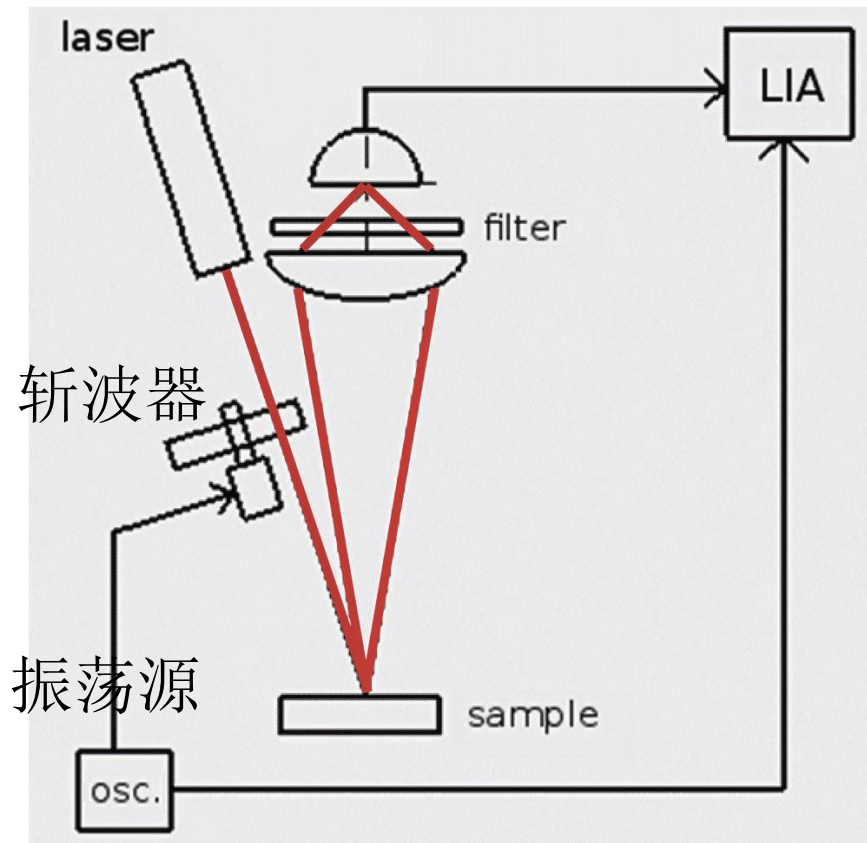


迈克尔逊式光路原理图



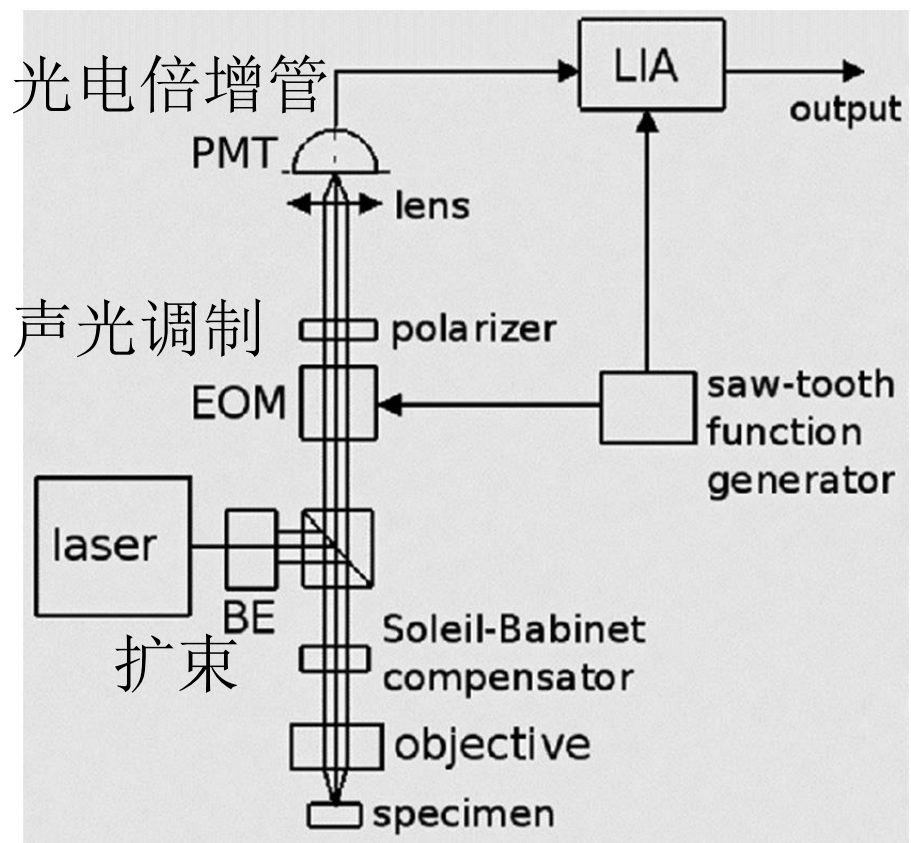
克斯特式光路原理图

红外热像仪



光致热辐射光路原理图

高阶显微技术



极化对比共聚焦显微光路原理图



教学设计安排

近代物理实验 (本科3年级、4学时, 物理专业120人)

普通物理学实验II (本科2年级、21学时, 工科20-50人/580人)

各类竞赛指导 (本科1-2年级、暑期, 物理专业约50人)

早期教学实验

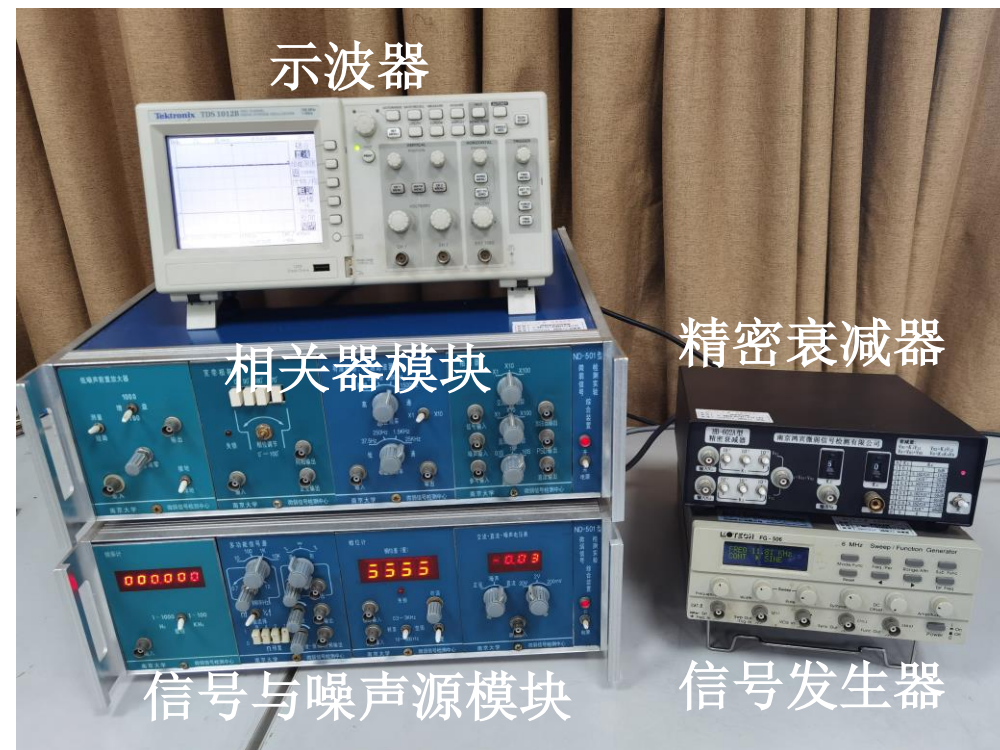
相关器波形观察及输出电压测量

相关器对不相关信号的抑制能力

相关器对噪声的抑制能力

模拟实际测量

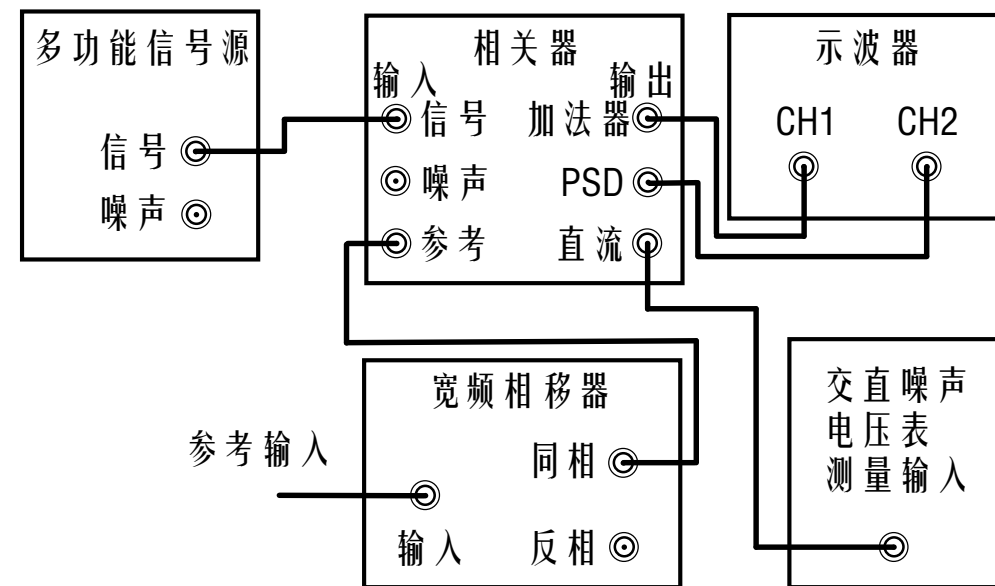
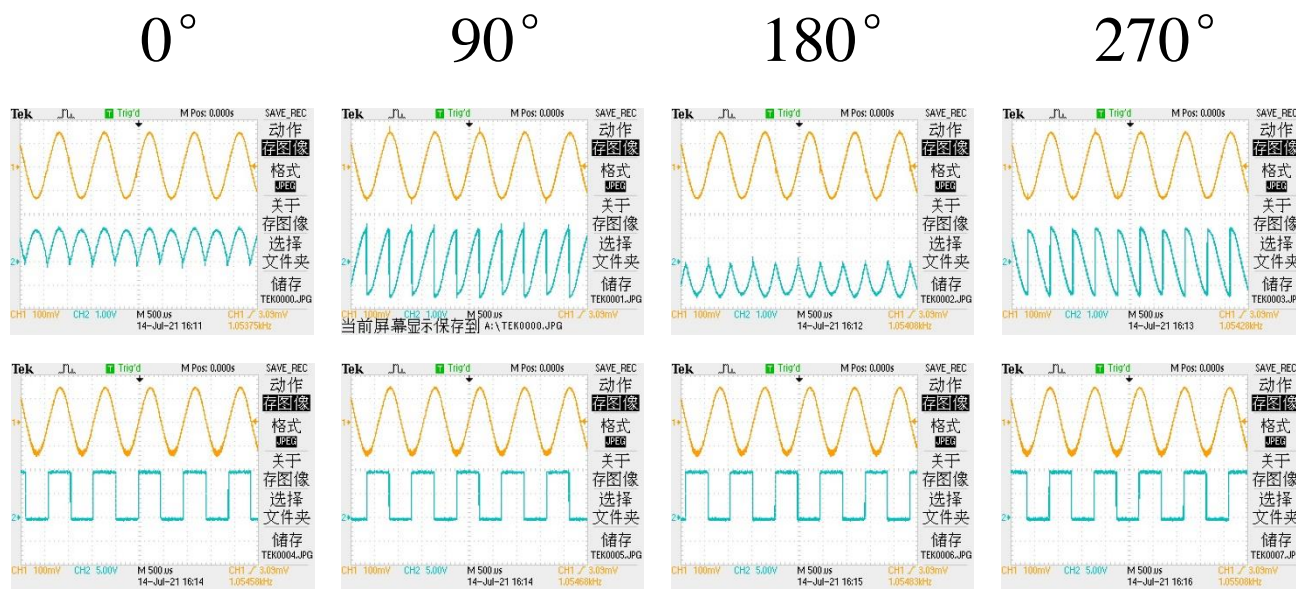
南京大学研制模块化教学仪



早期教学实验

相关器波形观察及输出电压测量

相关器波形观察电路

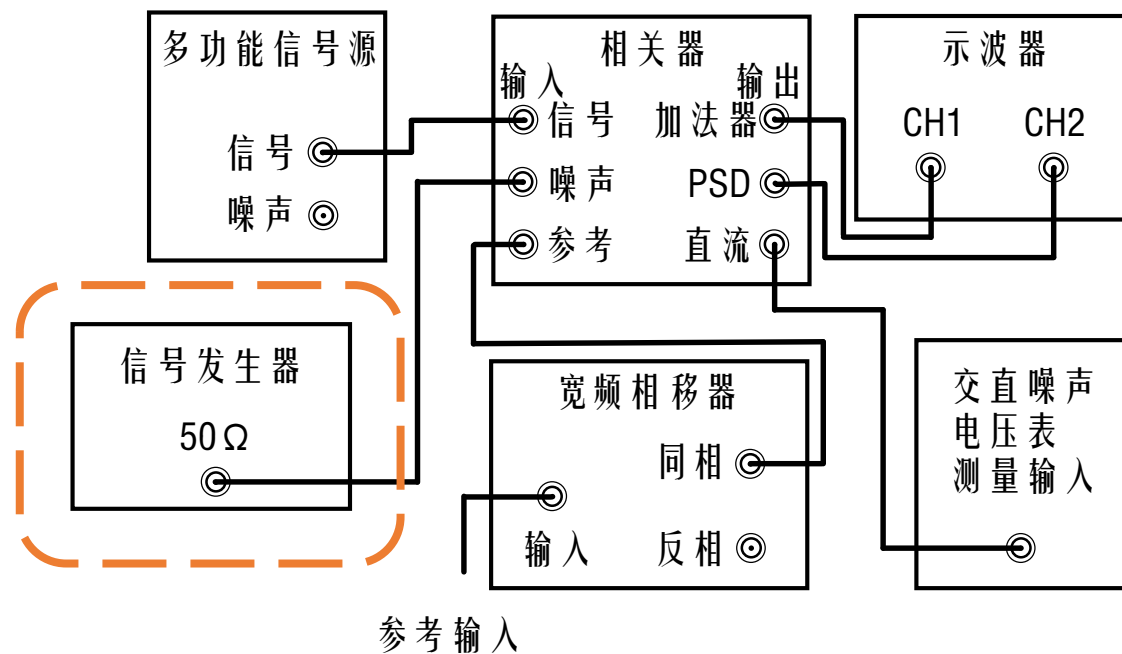


早期教学实验

相关器对不相关信号的抑制能力

- 接入信号发生器，选择偏离信号频率
- 接入信号发生器，选择接近信号频率
- 改变时间常数，观察效果

无关信号抑制能力观察电路

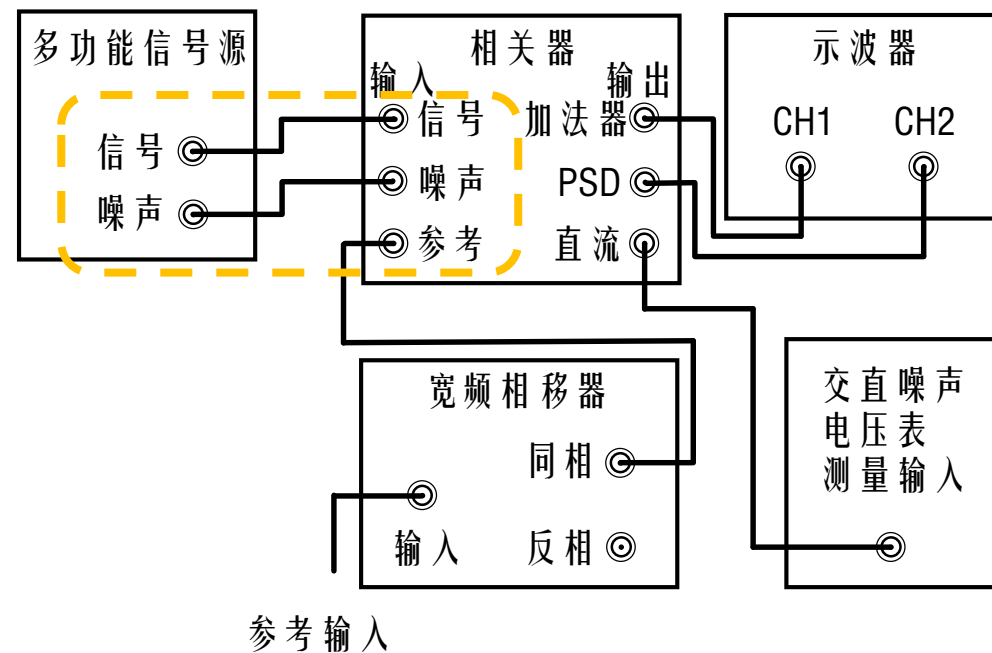


早期教学实验

相关器对噪声的抑制能力

- 接入白噪声信号，调节噪声幅度并测量
- 评估锁相放大器前后的信噪比
- 改变时间常数，观测信噪比

噪声抑制能力观察电路

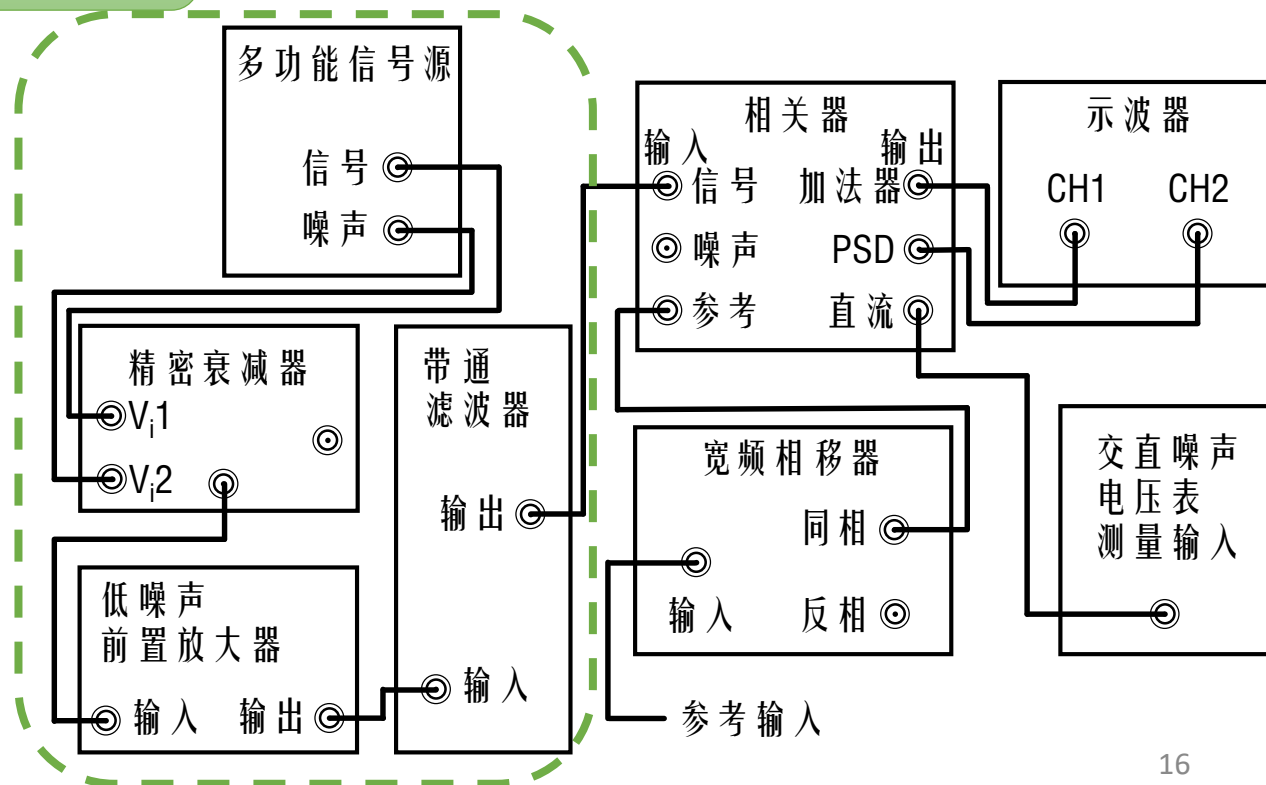


早期教学实验

模拟实际测量

- 接入精密衰减器
- 接入前置放大器、带通滤波器
- 通过调节参数，优化信噪比

模拟实际测量电路



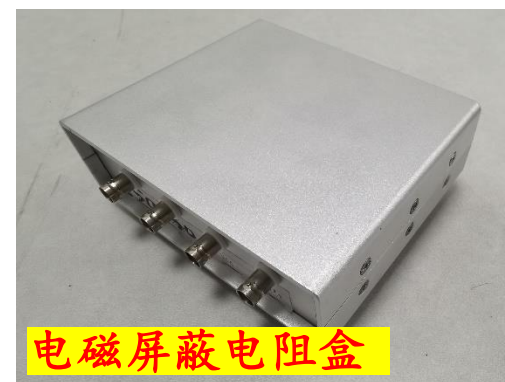
更新教学实验

基于LabVIEW的数据采集

电阻噪声特性测量实验

锁相放大器的参数实验

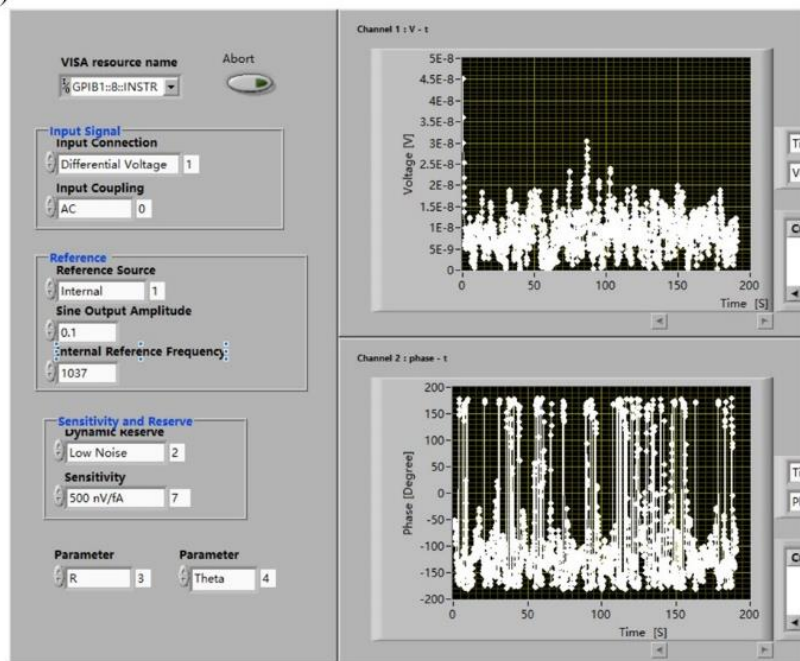
SR830锁相放大器教学实验



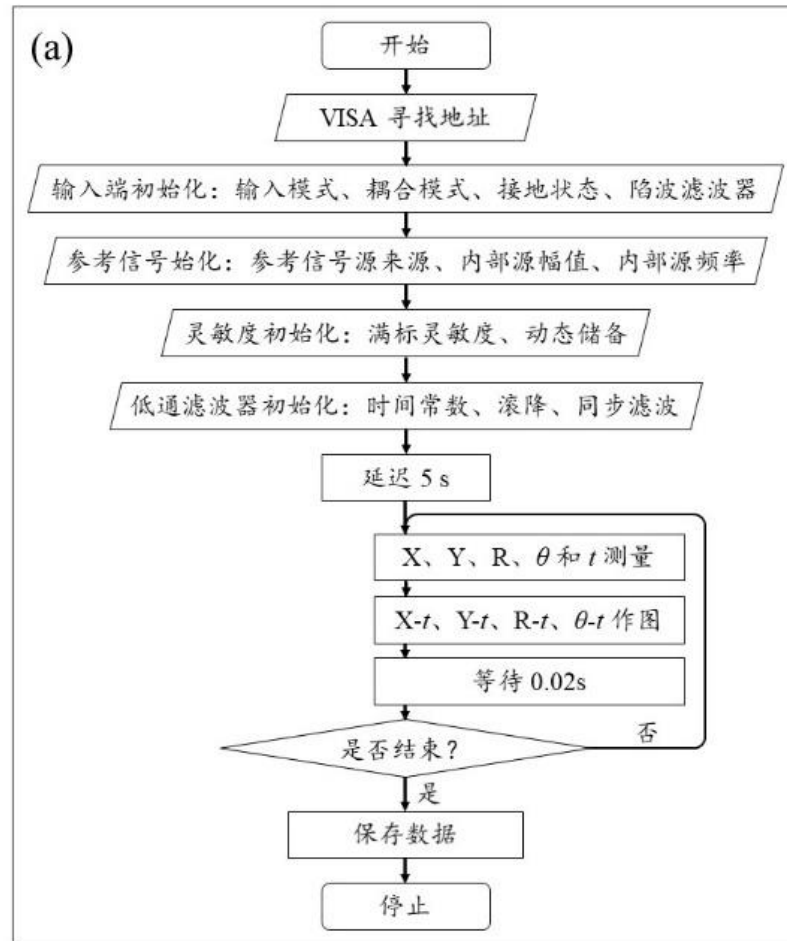
更新教学实验

基于LabVIEW的数据采集

(b)

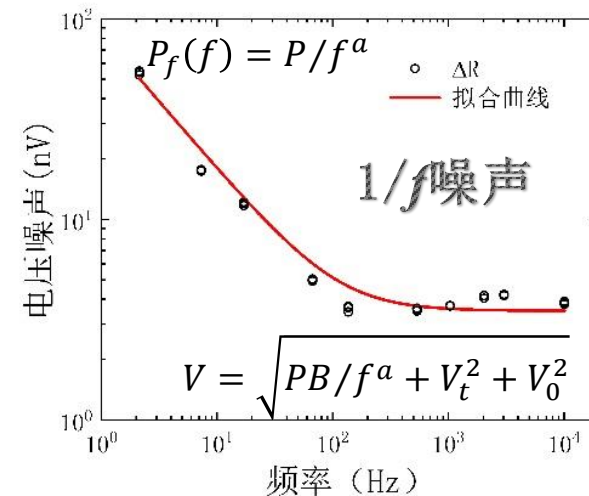
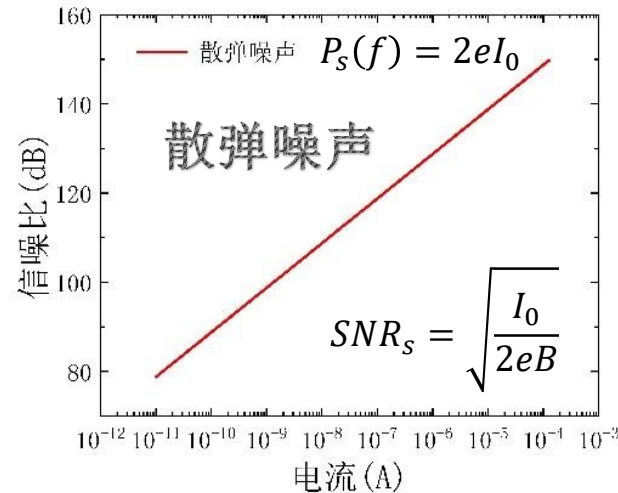
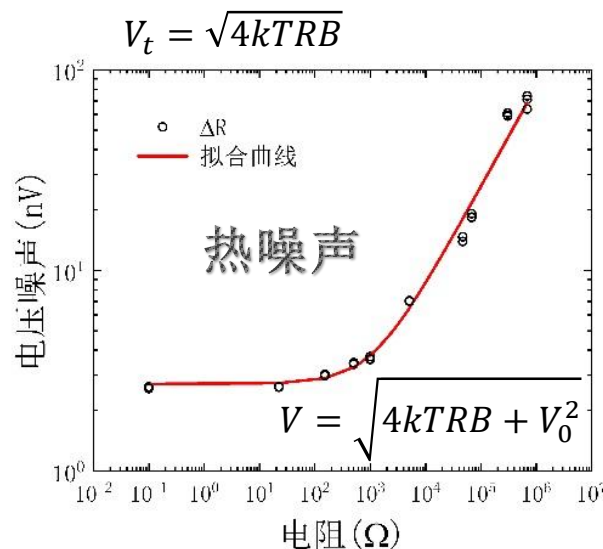
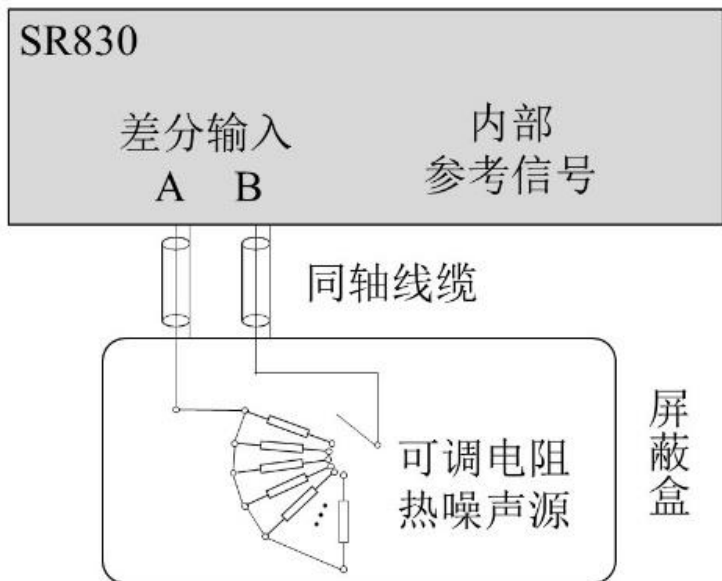


(a)



更新教学实验

电阻噪声特性测量实验



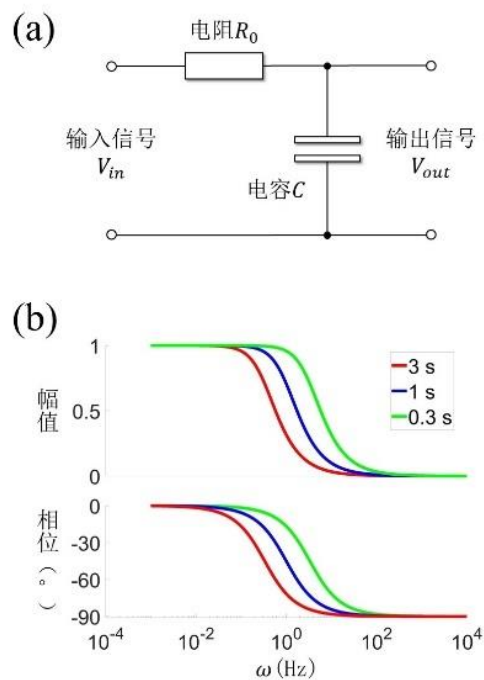
更新教学实验

锁相放大器的参数实验

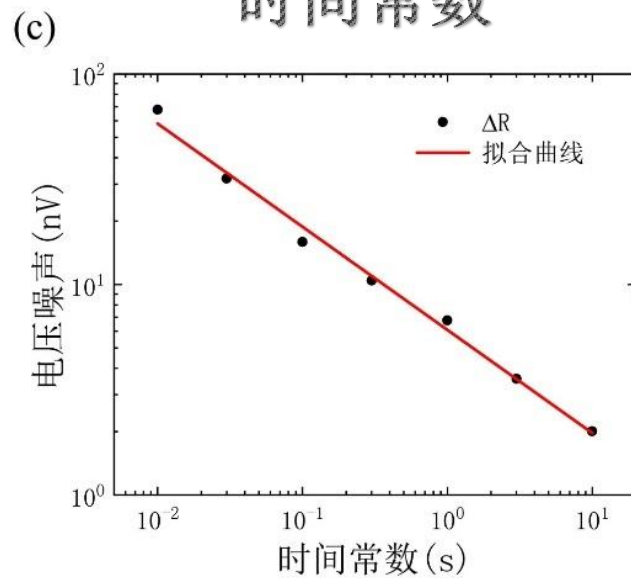
RC滤波电路

响应函数

$$\begin{cases} V_{out} = H(\omega) \cdot V_{in} \\ H(\omega) = 1/(i\omega R_0 C + 1) \end{cases}$$



时间常数



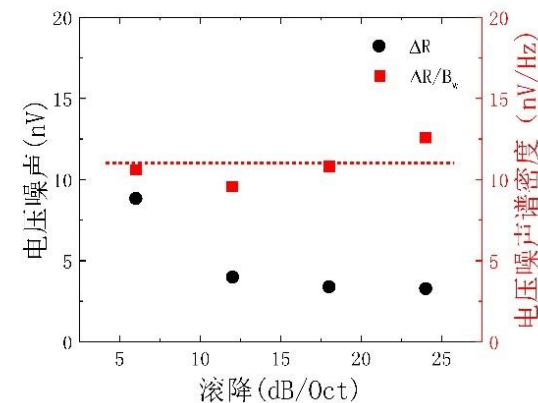
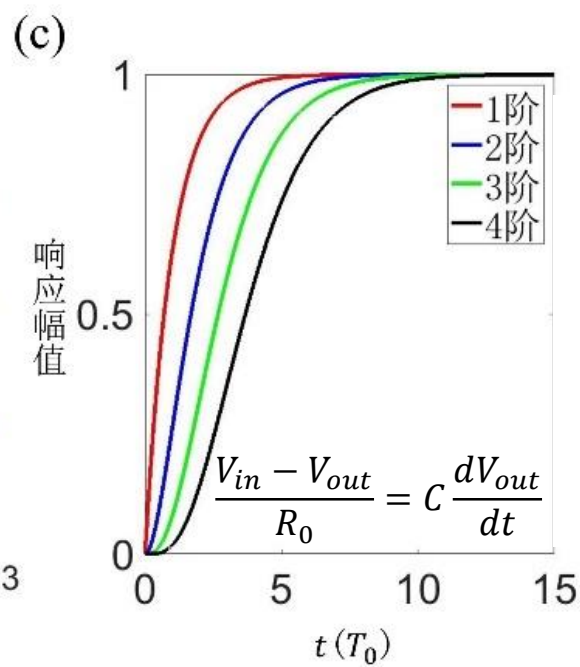
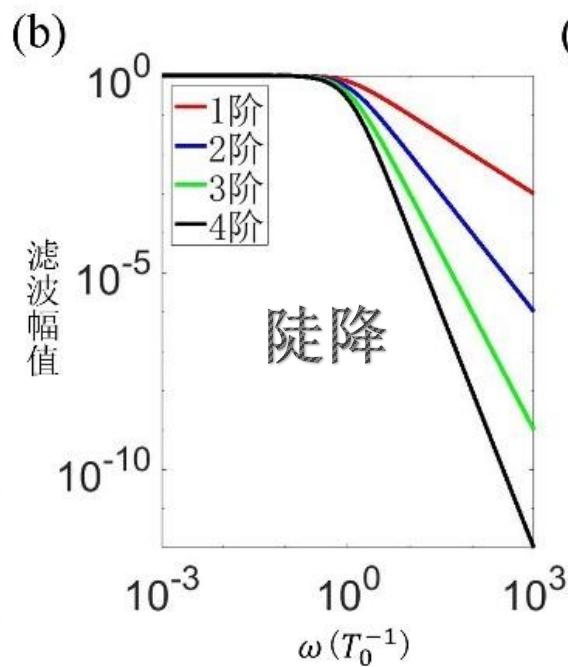
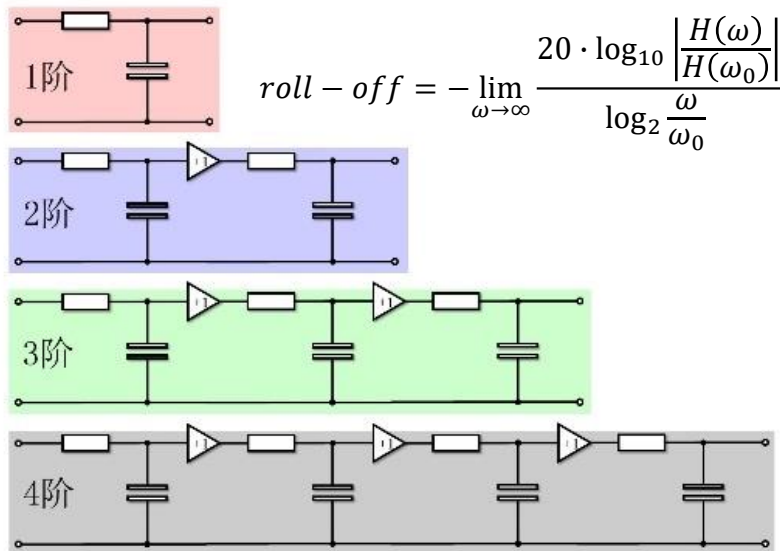
更新教学实验

锁相放大器的参数实验

表 1 多阶低通滤波器参数

阶数 n	响应函数 $H(\omega)$	陡降 dB/Oct	白噪声等效带宽	阶跃响应时间
1	$1/(i\omega R_0 C + 1)$	6	$1/(4T_0)$	$4.6T_0$
2	$1/(i\omega R_0 C + 1)^2$	12	$1/(8T_0)$	$6.7T_0$
3	$1/(i\omega R_0 C + 1)^3$	18	$3/(32T_0)$	$8.4T_0$
4	$1/(i\omega R_0 C + 1)^4$	24	$5/(64T_0)$	$10T_0$

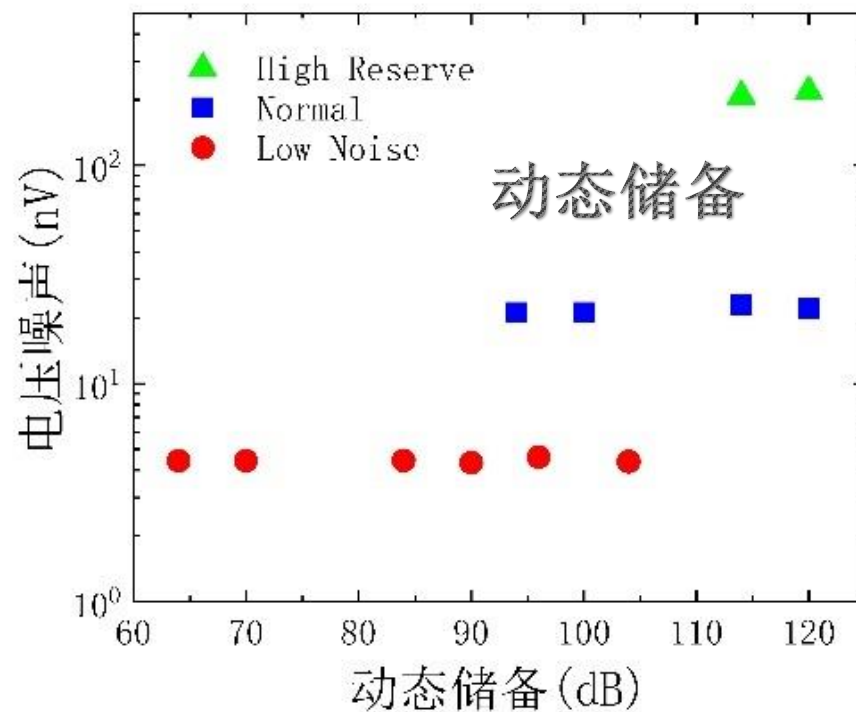
(a) 多阶滤波与陡降



更新教学实验

锁相放大器的参数实验

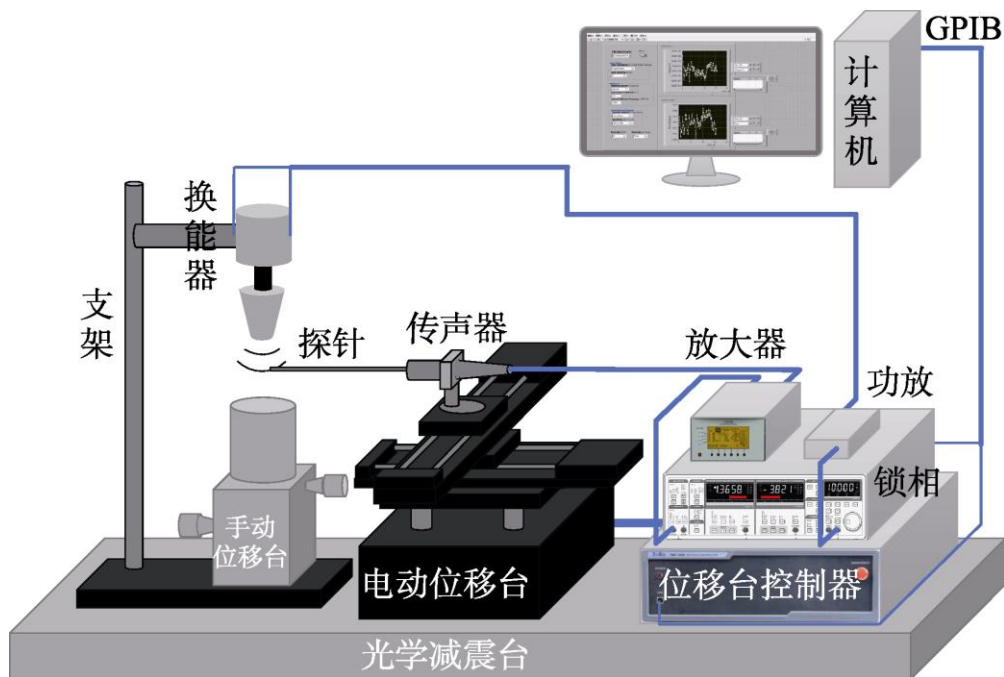
满刻度灵敏度
动态储备



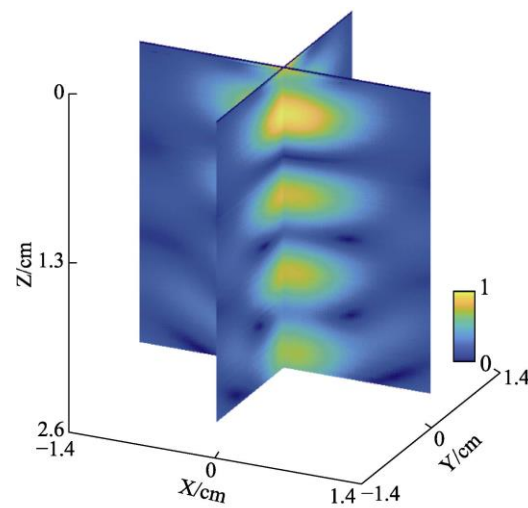
郑远, 等. 基于数字锁相放大器的电阻噪声特性研究[J]. 物理实验. 2021, 41(10).

更新教学实验

举例：传声器超声声场测量

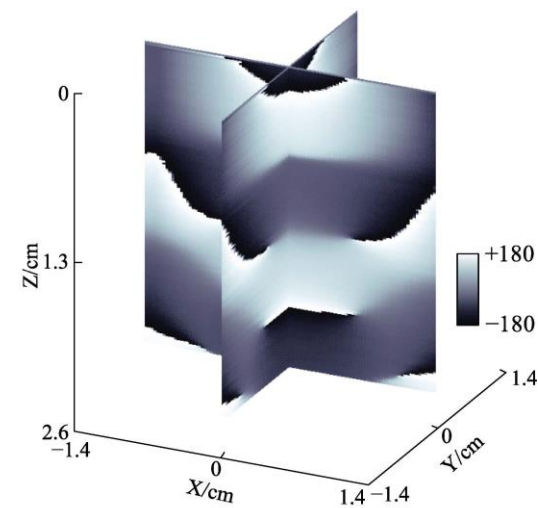


声场声压



(a) 声压分布

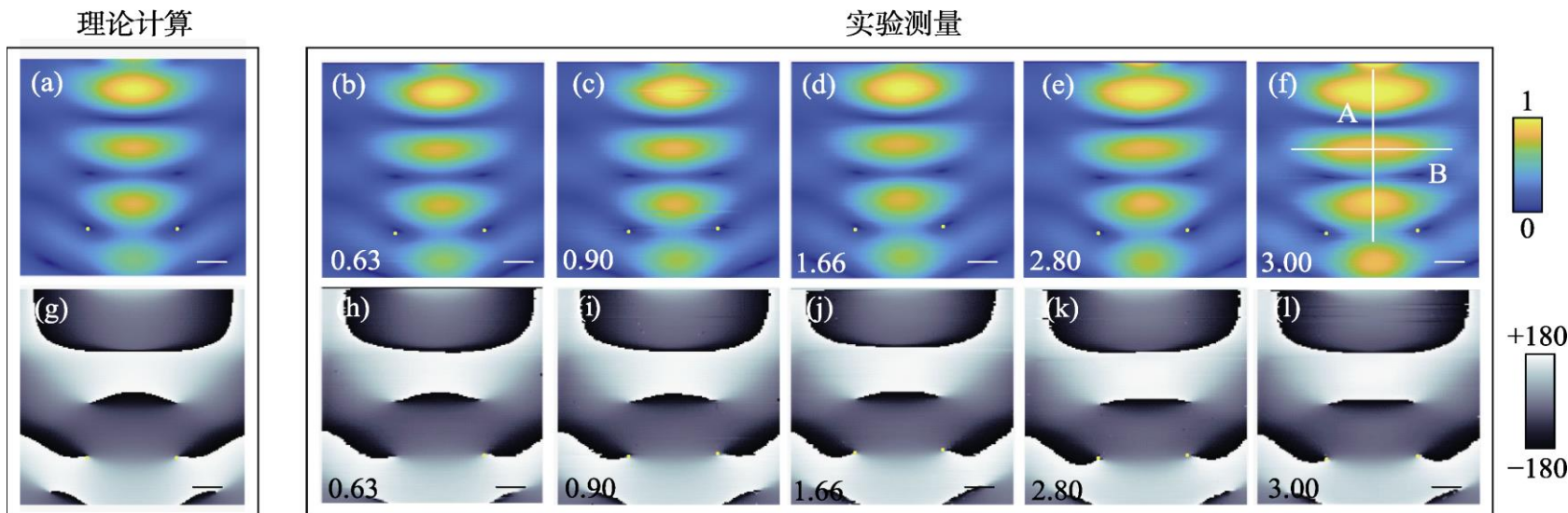
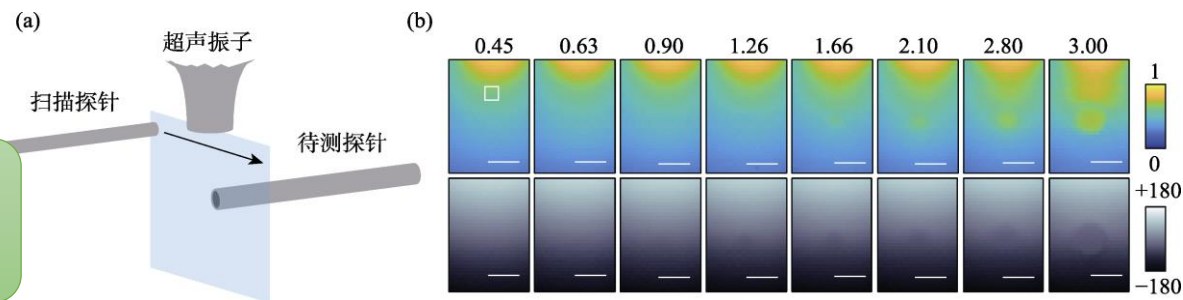
声场相位



(b) 相位分布

更新教学实验

举例：传声器超声声场测量





- 保留加强锁相放大器模块化、波形可视化实验训练
- 引入计算机、数据采集、软件编程等，建设自动化基础测量实验训练
- 以噪声实验加强对锁相放大器使用的理解与认识
- 基于数字锁相放大器，开设更多形式精密测量实验

THANKS

谢 谢 大 家

