

压电体的远程探测^{*}

李颀颖 潘 涛¹⁾ 夏小建

(华东师范大学分析测试中心, 上海 200062)

1)(苏州铁道师范学院物理系, 苏州 215008)

(1995 年 8 月 14 日收到; 1996 年 6 月 26 日收到修改稿)

提出用核四极共振谱仪对材料的压电效应进行远程的无线测量新方法, 研究了石英晶体的共振谱线强度随激发脉冲功率、激发脉冲宽度以及激发频率偏置等参数的变化情况. 实验结果显示, 用该方法能够在时间为秒的尺度内在几十厘米的范围内方便地检测到压电共振信号, 为压电材料更广泛的研究与应用提供了可能.

PACC: 7660

1 引 言

谐振是研究物体压电效应的重要实验手段. 测量方法有交流电桥、扫频振荡器以及 Q 表等. 在这些测量中, 通常需要在晶体表面附上电极并接入电路之中. 这时, 待测晶体与测量电路处于一种较强的耦合状态, 影响了测量的精度, 也限制了其应用的广度.

本文提出一种压电效应的测量新方法, 它利用脉冲傅里叶变换核四极共振谱仪系统, 将原谱仪探头的射频接收-发射线圈由螺线管改为开放的平面型, 从而实现了材料压电效应的远程测量. 因为采用傅里叶变换技术, 所以信号检测灵敏度非常高. 该测量技术将为压电材料的更广泛应用提供了基础.

2 实验装置与样品

远程 NQR 谱仪与常规的 NQR 谱仪结构基本相同, 主要区别在于探头系统的设计方面. 本文使用的谱仪是自行研制的简化 ^{14}N 远程 NQR 探测仪^[1]. 工作频率为 1.0—6.0 MHz. 整个系统分为三部分. 第一是激发部分, 它由频率综合仪、脉冲序列发生器和射频功率放大器构成. 这一部分将实验需要的射频脉冲放大至功率为 $P_0 \approx 100\text{ W}$ 左右后送到探头用来激发样品. 第二是接收机, 包括一宽带 (1—100 MHz) 低噪声前置放大器、宽带 (1—10 MHz) 主放大器和音频放大器, 总的电压增益不大于 130 dB. 该部分的功能是将探头线圈感应到的共振信号从 μV 量级放大至与模/数变换器 (ADC, 12 位) 匹配. 第三是谱仪整体的实时控制、数字信号处理以及结果输出部分, 由一台 PC386 微机承担.

^{*} 上海市科学技术委员会“青年科技启明星重点培养计划”资助的课题.

常规 NQR 谱仪的探头射频线圈为螺线管形状. 为了便于远程测量, 我们将射频线圈改为平面型, 如图 1 所示. 线圈用直径 $\phi = 1.5 \text{ mm}$ 漆包线绕 13 匝, 内半径 $R_1 = 45 \text{ mm}$, 外半径 $R_2 = 85 \text{ mm}$. 探头回路的品质因子 $Q \approx 50$, 不需要电磁屏蔽.

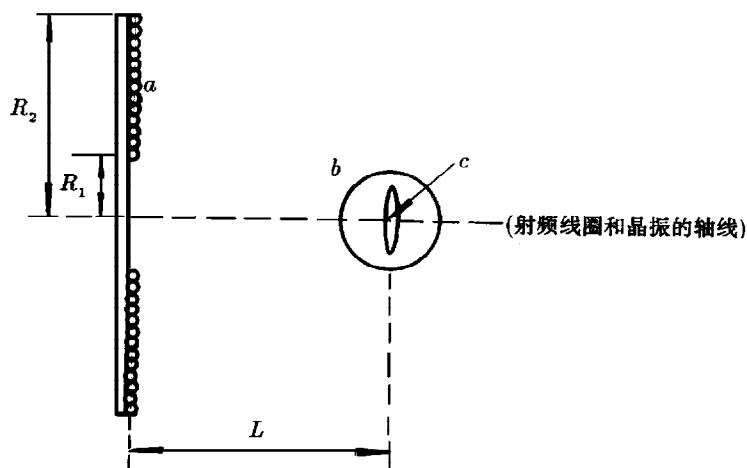


图 1 远程 NQR 探头的射频线圈结构示意图 其中 a 是射频平面线圈; b, c 分别为样品支架和石英晶体

样品是一石英晶振的半成品(未装电极), 直径为 7.5 mm , 中心厚度为 0.4 mm , 厂家提供的数据是: 谐振频率 $\nu_0 = 3.579 \text{ MHz}$, AT 切型(角度 $35^\circ 10''$). 实验时, 晶振放在一聚四氟乙烯支架上, 可绕垂直轴自由转动. 通常样品沿射频线圈的轴线放置, 两者之间的距离用 L 表示, 晶振圆片与平面线圈的平面平行, 对应于晶振的取向角 $\theta = 0^\circ$.

3 实验结果

本文利用远程 NQR 探测仪, 对石英晶体进行了详细研究. 测量信号采用单脉冲序列: $[-D_1 - D_3 - \text{ACO} - D_0 -]_{N_s}$, 其中 D_1 是射频激发脉冲的宽度, D_3 ($300 \mu\text{s}$) 为谱仪接收系统的恢复时间, ACO 是时域 FID 信号采样过程, D_0 为信号累加时的重复时间, N_s 是信号相干累加的次数. 实验时射频输出功率一般设置为 $P_0 = 100 \text{ W}$, 室内温度约为 19°C .

图 2 是石英晶体典型的共振谱线, 它基本上是一洛伦兹线型, 信噪比约为 40, 半高宽约为 0.3 kHz .

从图 2 的测量结果可以得到晶体的谐振频率 $\nu_0 = 3.595 \text{ MHz}$, 比厂家提供的数据略高一些. 这可能是因为本文的检测方法消除了常规测量技术中测量电路对晶振的负载效应的缘故. 谱线宽度是晶振在激发期间获得的能量在检测期间损失快慢的度量. 能量的损失除内部的结构原因外, 吸附于晶体表面的气体分子(如 H_2O 和 N_2 等)亦是一重要原因.

如果保持其他实验条件不变, 而只改变射频激发功率 P_0 , 则谱线强度亦发生变化, 实验结果如图 3 所示. 由图 3 可以看出, 谱线强度随射频场的增加而增加, 并几乎呈线性.

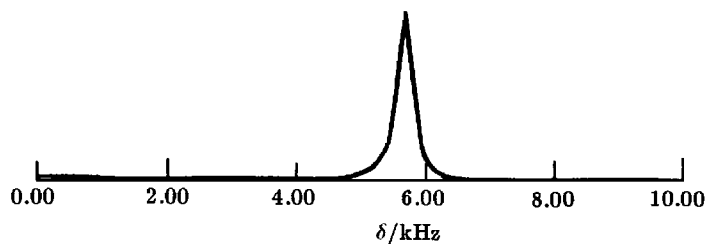


图2 典型的晶体共振谱线 实验条件: 射频脉冲宽度 $D_1 = 50 \mu\text{s}$, 激发频率 $\nu = 3.590 \text{ MHz}$, 射频功率 $P_0 = 20 \text{ W}$ 左右, 累加次数 $N_S = 64$, 重复时间 $D_0 = 0.5 \text{ s}$, 距离 $L = 8.0 \text{ cm}$, 晶振取向角度 $\theta = 0^\circ$

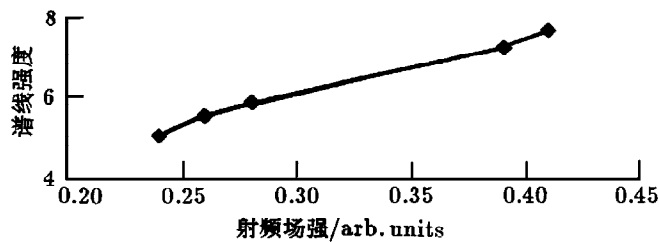


图3 晶体信号强度随射频场强度的变化情况 实验条件: $D_1 = 50 \mu\text{s}$, $\nu = 3.591 \text{ MHz}$, $N_S = 64$, $D_0 = 0.5 \text{ s}$, $L = 2.0 \text{ cm}$, $\theta = 0^\circ$

若保持其他实验参数不变, 而仅改变射频激发脉冲的频率即偏共振 δ (定义 $\delta = \nu - \nu_0$) 的大小, 那么共振谱线的强度也随之发生变化, 如图4所示. 因为激发脉冲是一矩形, 其频谱为中心位于 ν 处的 sinc 函数 ($\sin x/x$), 所以在频率为脉冲宽度的倒数 (即 $1/D_1$) 的整数 (零除外) 倍位置上激发功率为零. 由于实验时激发脉冲宽度 $D_1 = 300 \mu\text{s}$, 对应于激发功率为零的频率是 $n \times 3.3 \text{ kHz}$ ($n = 1, 2, \dots$). 图4的曲线说明, 在本文的实验条件下, 晶振是可以看成一个线性系统, 即输入增加一倍, 输出也增大一倍. 很明显, 这与 NMR 或者 NQR 体系是不一样的.

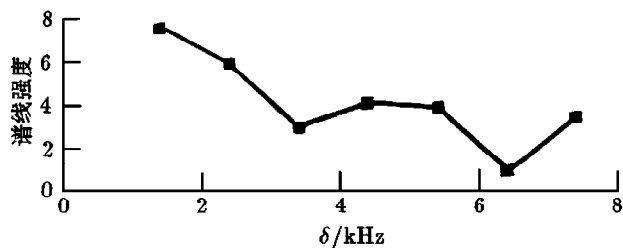


图4 晶体信号强度随偏共振 δ 的变化曲线 实验条件: $D_1 = 300 \mu\text{s}$, $N_S = 64$, $D_0 = 0.5 \text{ s}$, $L = 2.0 \text{ cm}$, $\theta = 0^\circ$

晶振谱线强度随激发脉冲宽度的变化曲线如图 5 所示. 改变激发脉冲的宽度, 也就改变了脉冲的激发频谱, 其激发功率零点的位置亦发生变化. 因此当脉冲宽度满足 $1/D_1 = \delta$ 时, 将出现激发功率零点频率. 图 5 中当脉冲宽度在 $200 \mu\text{s}$ 处出现的极小值就是这一原因. 但是, 在脉冲宽度较小 ($D_1 \leq 80 \mu\text{s}$) 时, 谱线强度随脉冲宽度的增大而增大. 因此图 5 的实验结果再次证明了晶振是一线性系统.

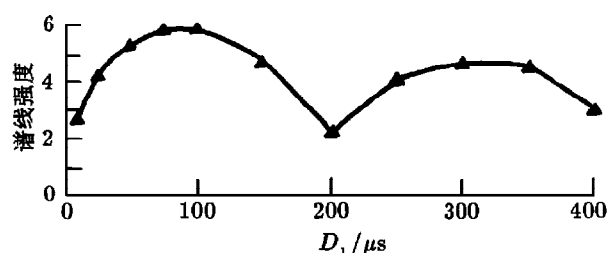


图 5 晶体信号强度随射频脉冲宽度的变化趋势 实验条件: $\delta = 4.4$ kHz, $N_S = 128$, $D_0 = 0.5$ s, $P_0 = 100$ W, $L = 2.0$ cm, $\theta = 0^\circ$

值得注意的是, 晶体共振谱线的强度与其空间取向角也有很大的依赖关系, 图 6 示出了这一情况. 此依赖关系还取决于其偏离射频平面线圈轴线的距离. 晶体在偏离射频线圈轴线不同距离上得到的取向曲线不一样, 可能是射频平面线圈的电磁场分布情况不同所致. 由图 6 的实验数据可知, 在前面图 2—图 5 的实验中, 测量信号都不是在晶体取向角最佳条件(即共振信号最强)下获得的.

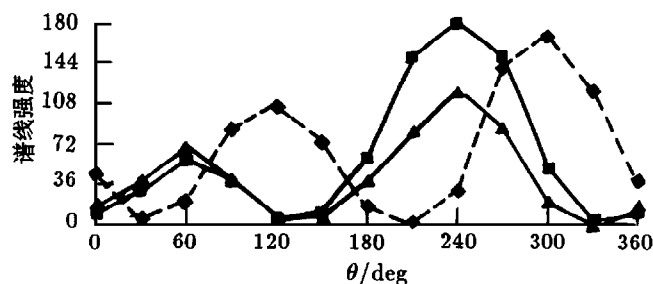


图 6 晶体信号强度随取向角 θ 的变化情况 ■为 $L = 3.0$ cm; ▲为 $L = 8.0$ cm, 测量时晶体轴线与射频线圈轴线重合; ◆为 $L = 5.0$ cm 的实验数据, 测量时晶体略微偏离(约 1 cm)射频线圈的轴线放置. 实验条件: $P_0 = 20$ W, $D_1 = 50 \mu\text{s}$, $\delta = 5.5$ kHz, $N_S = 64$, $D_0 = 0.5$ s

在用该方法测量压电效应中, 信号强度和检测距离 L 的关系是最感兴趣的. 图 7 示出了实验结果. 在测量图 7 的每个数据点时, 晶体的取向角在 $\theta = 240^\circ$ 附近稍加变化, 以保证检测信号达到最大. 很明显, 信号强度随距离增大而减弱. 但是在近距离范围 ($L \leq 5.0$ cm) 内, 谱线的强度无显著变化. 在 $L = 20$ cm 处, 谱线的信噪比大约为 3. 说明本文提出的压电效应检测方法的灵敏度是很高的. 实际上, 通过增加累加次数 N_S , 我们仍然能够

检测到 $L \geq 30$ cm 处的谱线.

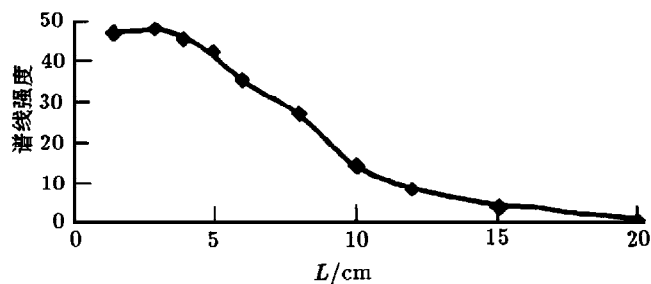


图7 晶体信号强度随距离的变化 实验条件: $P_0 = 20$ W, $D_1 = 50$ μ s, $\delta = 5.5$ kHz, $\theta \approx 240^\circ$, $N_S = 64$, $D_0 = 0.5$ s

4 讨 论

用脉冲傅里叶变换方法测量得到的压电材料共振信号与 NMR 或者 NQR 谱相似, 然而, 图 3—图 5 的实验结果说明晶振与 NMR/NQR 核自旋体系的性质不同, 它是一简单的线性系统. 因此在一定范围内提高压电谱线的检测灵敏度的一个直接办法是增加输入, 即加大射频发射功率. 制作大的射频发射-接收线圈或改变线圈的几何形状, 以及进行探头的电磁屏蔽等, 对提高灵敏度亦有不小的作用. 可以预见, 通过提高测量仪器的硬件指标, 可以在 1 m 的范围内方便地检测到晶振的共振信号.

压电材料(压电晶体、压电陶瓷、铁电体等)具有重要应用价值. 本文提出的压电效应的远程测量方法, 不仅将为压电效应的研究提供更为精确和可靠的手段, 而且将有助于压电材料的更广泛应用.

[1] 李颀颖、蒋 瑜、吴先球等, 波谱学杂志, 11(1994), 419.

REMOTE MEASUREMENT OF PIEZOEFFECT

LI GENG-YING PAN TAO^{a)} XIA XIAO-JIAN

(*Analytical Center, East China Normal University, Shanghai 200062*)

a)(*Suzhou Railway Teacher's College, Suzhou 215008*)

(Received 14 August 1995; revised manuscript received 26 June 1996)

ABSTRACT

A new method, which involves measurement of the piezoelectricity by nuclear quadrupole resonance spectrometer, is proposed. The spectral intensity of a quartz crystal versus the strength of the excitation pulse, the pulse width and the resonance offset is studied in detail. The experimental results demonstrate that the piezoelectric resonance signal originating from samples located tens of centimeter away from the probe may be detected in a time scale of seconds. This technique provides potential for more extensive investigation and application of the piezoelectric materials.

PACC: 7660