

300MHz~500MHz和500MHz~700MHz

声测用微波谐振腔的研制

李 杰 吴庆阳 徐志坚 秦 俭

(同济大学物理系固体物理研究室)

一、引 言

研究单晶材料的声学性能所使用的超声波,较适合的频率为数百兆赫到数十京赫。在这样高的频率下,把压电换能器粘接在样品上来激发和接收声场的方法已不适用,需代之以表面激发技术。

声表面激发的腔体有谐振式和非谐振式两类。非谐振式腔体频带宽、结构简单、制作方便,但激发效率低,而且其中心电极贴近样品的一个端面,在低温测量中容易在样品内部形成温度梯度,影响测量结果。谐振式腔体 Q 值高,其中心导体远离样品,可以保证样品内部温度场的均匀,故特别适用于低温下的声学测量,其不足之处是谐振频率固定。

de Klerk^[1]应用微波技术的成果,研制了两个在宽频带内可连续调谐的谐振式腔体,用来激发和检测700MHz到8.5GHz的微波声子。这种腔体兼有谐振式和非谐振式腔体的优点,是一种有效的固体声学实验手段。本文介绍工作于较低频率(300MHz到700MHz)的可调谐的声测用微波谐振腔的设计和制作。

二、谐振频率的计算公式

图1给出了可调谐的微波谐振腔的结构

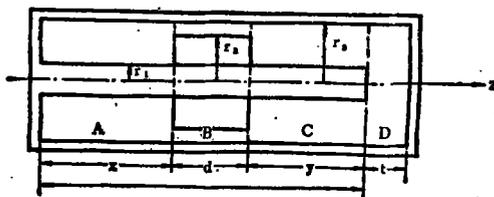


图1 谐振腔结构简图

示意图。腔体由一个同轴谐振腔和一个套在内导体上可以沿内导体滑动的滑块组成。这一滑块称为不连续块,改变其位置就改变了腔体的谐振频率,达到调频的目的。

为了计算腔体的谐振频率,或更具体地说计算不连续块位置与谐振频率的关系,可以建立腔体内空间的亥姆霍兹方程及相应的边界条件,然后求解其本征值。但由于腔体形状复杂,计算很繁复。Whinnery^[2]等人研究了内导体截面突变对同轴线中电磁场分布的影响,并建立了等效电路理论。它可以方便地用于我们腔体的谐振频率计算。

根据Whinnery的理论,可以建立带有不连续块的同轴腔的等效电路图(图2)。腔

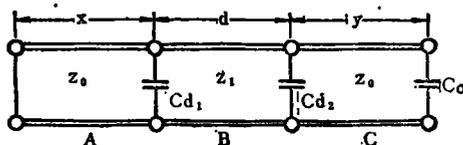


图2 谐振腔等效电路图

体由A、B、C三段同轴线串接而成,其中A、C段的特征阻抗为 Z_0 ,B段的特征阻抗为 Z_1 ,而

$$Z_0 = 60 \ln \frac{r_3}{r_1} \quad (1)$$

$$Z_1 = 60 \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2)$$

其中 r_1 为腔体内导体外径, r_3 为腔体外导体内径, r_2 为不连续块外径。 C_0 为末端集总电容, 其数值可由下式求得:

$$2\pi Z_0 f_0 C_0 = \text{ctg } 2\pi f_0 l_0 / C \quad (3)$$

式中 l_0 为腔体长度(图 1), f_0 为去掉不连续块时腔体的最低谐振频率, C 为光速。 C_d 反映了内导体截面不连续的影响, Whinnery 等利用 Hahn 函数计算了 C_d 的近似值^[2]

由等效电路图, 根据电纳法原理, 我们可以导出谐振波长 λ 和滑块位置 x 所满足的超越方程:

$$\frac{Z_0 - \omega C_0 Z_0^2 \text{tg} \frac{2\pi y}{\lambda}}{\omega(C_d + C_0)Z_0 + \text{tg} \frac{2\pi y}{\lambda} - \omega^2 C_d C_0 Z_0^2 \text{tg} \frac{2\pi y}{\lambda}} = \frac{Z_1 \text{tg} \frac{2\pi d}{\lambda} + Z_0 \text{tg} \frac{2\pi x}{\lambda}}{Z_1 - \omega C_d Z_0 Z_1 \text{tg} \frac{2\pi x}{\lambda} - \omega C_d Z_0 Z_1 \text{tg} \frac{2\pi d}{\lambda} \text{tg} \frac{2\pi x}{\lambda} - Z_0 \text{tg} \frac{2\pi d}{\lambda} \text{tg} \frac{2\pi x}{\lambda}} \quad (4)$$

式中 Z_0 、 Z_1 由公式(1)、(2)计算, C_0 由公式(3)计算, C_d 可由文献^[2]图 8 查得, 几何尺寸 x , y , d 见图 1。

三、腔体几何尺寸设计

由于谐振频率主要受不连续块的几何尺寸(d 、 r_2)的影响, 而导体不连续的影响即 C_d 的影响仅起次要的作用, 因此导体不连续的影响在设计时可以先不考虑。这样我们可以利用 Stephenson 的计算结果^[3]初步确定腔体几何尺寸, 然后再代入(4)式复算。

设计的步骤如下:

1), 根据实验的需要确定频率复盖范围: f_{\min} 和 f_{\max} 。一般 $f_{\max}/f_{\min} \leq 1.7$;

2), 确定腔体的长度 l_0 : 我们采用 $\lambda/4$ 模式, l_0 的计算式为

$$l_0 = \frac{C}{4f_0}, \text{ 一般可取 } f_0 = f_{\min}.$$

3), 由样品的长度和腔体的特征阻抗 Z_0 来确定腔体的内、外径 r_1 和 r_3 ;

4), 由文献^[3]图 C 和 f_{\max}/f_{\min} 确定 $\frac{d}{\lambda_0}$ 和 Z_1/Z_0 , 从而确定不连续块的几何尺寸 d 和 r_2 。

二个腔体具体设计数据列于下表。

表1 腔体几何尺寸设计

		300MHz~ 500MHz腔	500MHz~ 700MHz腔
频率范围	f_{\min}	300MHz	500MHz
	f_{\max}	500MHz	700MHz
	f_{\max}/f_{\min}	1.7	1.4
腔体长度	l_0	150.0mm	107.0mm
特征阻抗	Z_0	42Ω	62Ω
	Z_1	5Ω	9Ω
腔体内外径	r_1	6.0mm	5.0mm
	r_3	12.0mm	14.0mm
不连续块尺寸	r_2	11.0mm	12.0mm
	d	48.0mm	34.7mm
末端电容	C_0	0.8pf	1.0pf

四、腔体的结构设计和制作

腔体设计时还需考虑提高激发和接收效率问题和低温测试中的真空密封及热传导等问题。图 3 给出了腔体的结构示意图。电磁信号与腔体采用磁耦合, 耦合环置于腔体内磁场最强处, 耦合环的平面与该处的磁力线垂直; 压电晶体样品置于腔体内电场最强处, 样品支架用紫铜制作, 以保证样品内部温度均匀, 测温电阻粘贴在样品支架附近的腔壁上。

为了提高腔体的 Q 值, 需要尽量减少电磁场在腔体内表面上的能量损耗。由于加工

和装配的要求，腔体必须分体制作，为此我们分析了腔体表面电流强度的分布，在电流

密度较小处分割腔体。选用黄铜作为腔体材料。外导体内壁采用先粗加工而在焊接好样

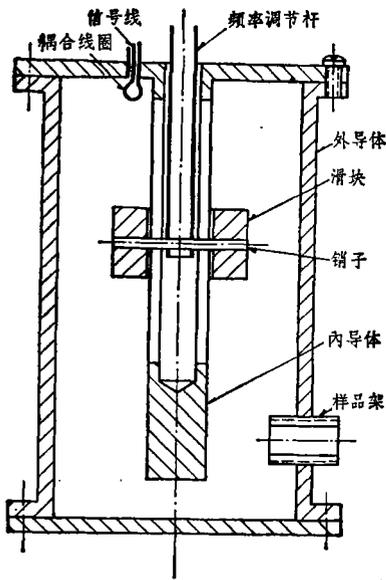


图3 腔体结构图

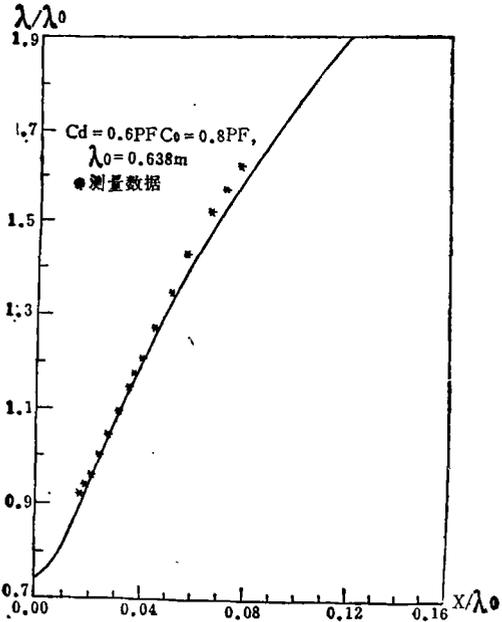


图5a 利用快速弦截法的计算结果与实测值的比较

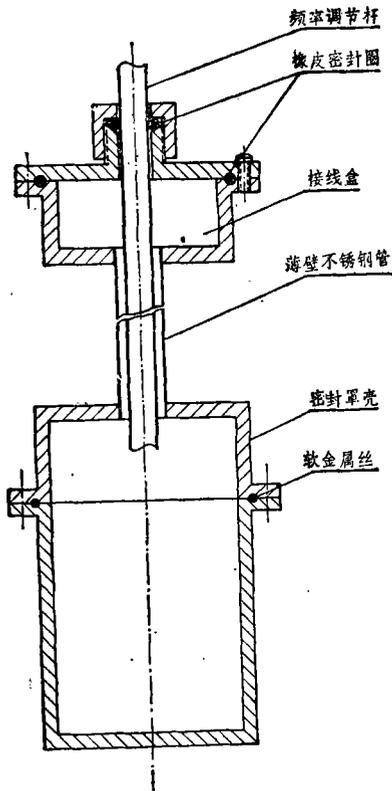


图4 低温密封装置示意图

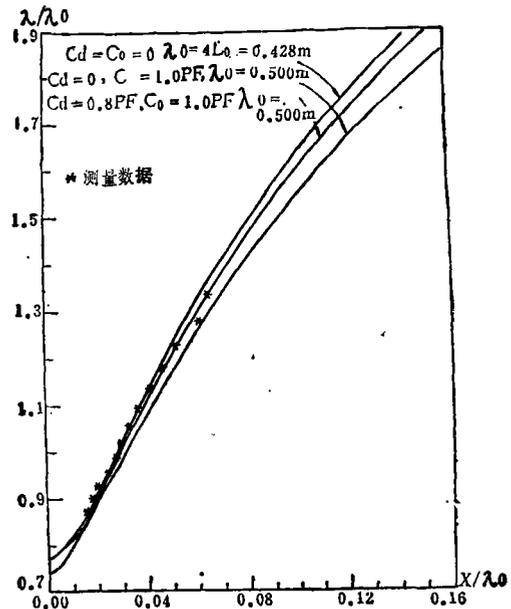


图5b 利用快速弦截法的计算结果与实测值的比较

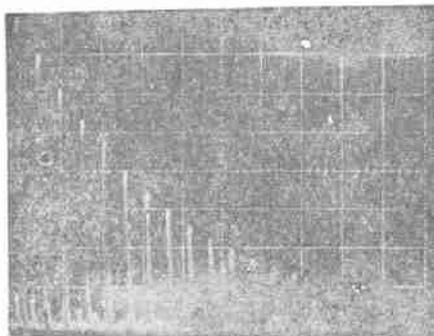


图6 在铌酸锂晶体中沿 X 轴传播的快横波的脉冲回波列图案频率 500MHz 温度 230K

品支架后再精加工的二次加工工艺。腔体内壁最后用化学法镀银,以降低表面电阻。

为了使腔体能在低温下工作,采用了腔体外再加一个黄铜密封罩壳的方法。图4为低温密封罩的结构示意图。由图3和图4还可以看到频率调节机构的结构。内导体的中段沿径向开有一长孔,调节杆伸进内导体,并经穿过长孔的梢子与滑块连接。频率调节杆的另一端通过橡皮密封圈伸出密封罩,因此频率调节的操作在室温区进行。

五、腔体实际性能

将表1所列数据代入公式(4),采用快速

弦截法计算,计算结果列于图5(a)和图5(b)。图中实线为计算结果,*号为实测结果。由图可见实测数据与计算值吻合良好。两个腔体的实测谐振频率分别复盖了300MHz~500MHz频段和500MHz~700MHz频段,满足了设计要求。图5(b)还列出了不计 C_d 和 C_o 时的计算结果。

图6为用500MHz~700MHz腔体获得的在铌酸锂晶体内沿X轴传播的快横波在230K时的声脉冲回波列图案。由图可见,测得的脉冲回波具有足够的信噪比。实验还表明,在从室温到液氮温度间的温区,腔体工作稳定,调频操作简便,满足了实验的要求。

参 考 文 献

- [1] de Klerk, J. Ultrasonics, 2, 137(1964)
- [2] Whinnery, J. R. Jamieson, H. W. Teo Eloise Robbino, Proc. IRE, 32, 695(1944)
- [3] Gregg J. Stephenson Electronics, (January 18, 1963) 46.

第二届西太平洋地区国际声学会议在香港举行

第二届西太平洋地区国际声学会议于1985年11月28日至30日在香港理工学院举行。中国、日本、新西兰、澳大利亚、印度、新加坡、南朝鲜、丹麦、荷兰、英国、美国及香港等国家及地区的100多名声学工作者出席会议,约80多名代表在会上宣读了学术论文。

会议的学术报告分环境噪声、物理现象和测量与分析等三个专题。会议论文集共发

表论文111篇,其中我国声学工作者提交了有关建筑声学、噪声控制、超声、水声、语言声学、换能器及声学测量等学术论文31篇。有21位学者参加了这次会议,宣读了学术论文。

会议建议1988年第三届西太平洋地区国际声学会议将在我国召开。

(同济大学 钱梦碌)