

组装式压敏晶体管送话器的探讨

徐志明

(上海电讯器材厂)

赵克勤

(国营红声器材厂)

1982年1月5日收到

本文探讨了压敏晶体管送话器的组装方法。其特点在于放弃了国外多数采用的送话器振膜与宝石针直接耦合对压敏晶体施压的方案,而采用事先研制好的压敏晶体管,然后再配以送话器振膜等声学构件组装成压敏晶体管送话器。这样组装的实验型压敏晶体管送话器,为进一步研制实用的压敏晶体管送话器提供了可资参考的依据。

一、概 述

自晶体管发明以来,人们又发现在具有平面结构半导体结的适当位置(如平面晶体管的发射区),施加一个垂直压力时,该力可通过发射区而传至晶体管的两个P-N结上,使晶体管的集电极电流发生很大变化^[1-2]。这个垂直的力称为各向异性应力,由各向异性应力引起的电流变化的效应称为各向异性应力效应(ASE),或压敏效应。

早在五十年代初期就有人试图利用这种效应研试一种新颖的换能器。晶体管机—电换能器就是基于这个效应而发展起来的。

1957年美国贝尔实验室的F. P. Burns设计成功了一种用N型锗作的悬臂式压阻效应传声器。但是,其所产生的功率仅 10^{-11} — 10^{-9} W,只相当于碳粒送话器的 10^{-7} 倍,无法实用^[3]。

1962年美国贝尔实验室M. E. Sikorsky等人第一次试制出高灵敏度的晶体管送话器。它是一只直径1.5in.,高2.5in.的实验室结构型送话器,由振膜上装一根 $\phi 0.5$ mm,针尖半径为 $10\mu\text{m}$ 的蓝宝石针对晶体管发射区加压构成的(图1)^[4-5]。由于发射区面积很小,只有当宝石针的针尖位于c-b结的边界附近时才能有高的灵敏度,同时还因加压位置与灵敏度有着密切的依赖关系,故针尖位置稍有偏移就会使灵敏

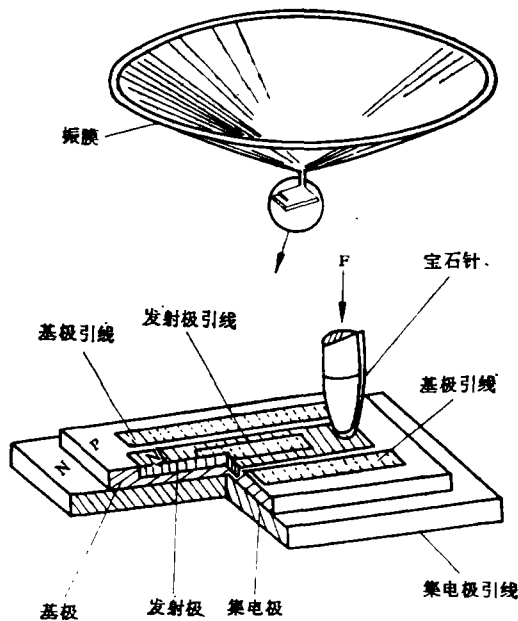


图1 美国(贝尔)早期实验室晶体管送话器结构示意图

度产生极大的变化,稳定性很差。

国外早期研制的这种送话器,据称只能放在防震桌上而不能随便携带。但是,据报道,这只实验室型的送话器在1000Hz, $1\text{dyne}/\text{cm}^2$ 力的交流有效值时,具有63mv的输出,其效率为11%,而碳粒送话器的输出为16mv,效率仅为 $1 \times 10^{-1}\%$ 。因此,它给人们展示了很有希望的前景。然而,要使产品实用化,还必须攻克一些难题,诸如压针施力不致给晶体管造成过荷、宝石针精确定位、性能稳定可靠以及装配方便

简单等。

通常的压针式换能器大多采用大振膜与宝石针直接耦合而对晶体管加压的结构^[6-8],由于它在结构上的不完整性和装配难度大,以致带来很多制造上的困难和应用上的缺陷,因而影响了它的实用性。

本文旨在探讨一种以组装方式制作的压敏晶体管送话器,以提高器件的稳定性和结构的完整性。

二、组装式压敏晶体管送话器的工作原理

晶体管换能器的换能原理是:晶体管结区的适当位置受到一个机械应力的作用,晶体管的跨导将受到调制而工作。但是,就压电结 ASE 效应本身的理论来说,尽管已经作了许多研究和提出了种种解释,这个效应的物理机理至今还不清楚^[9]。

压敏晶体管送话器的工作原理,就是依赖于在装配时预先通过和宝石针相连的振膜给晶体管本身施加一个预应力,使其灵敏化,然后再由振膜拾取(声波的)交变力,并“叠加”在这个预应力上,来调制晶体管。

压敏晶体管送话器和碳粒送话器一样,是一种有源调制换能器,具有低阻抗、自放大的特点,其放大类型与碳粒送话器有一定的相似之处。同时它也与碳粒送话器一样,是不可逆的,因为电流通过半导体结是不能在材料中产生机械应力的。

三、对压敏晶体管的实验分析

要使晶体管呈现压敏效应,必须对晶体管施加一个力。但影响晶体管压敏效应的因素是多方面的,诸如压点位置、压力大小、结深、表面氧化膜和铝引线层等。对此国外已有不少文献进行了理论分析,现就我们的实验结果对这些因素作点定性分析。

1. 压点位置与灵敏度的关系

实验样管为硅平面管,发射区直径为 200

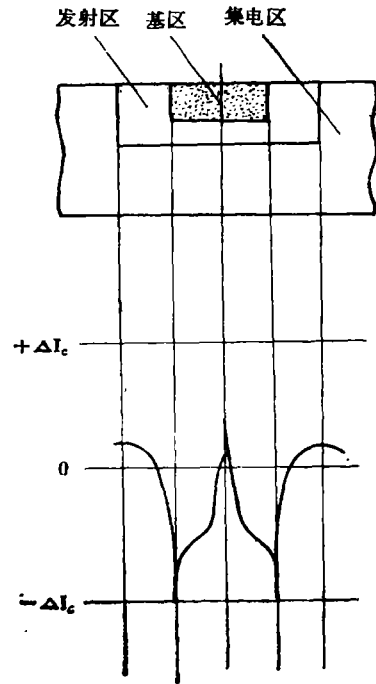


图2 压点位置与灵敏度关系示意图

μm , 基区直径为 $400\mu\text{m}$ 。用针尖曲率半径为 $25\mu\text{m}$ 的红宝石针以 10g 的静压力,自基极—集电极结边界起,通过圆心逐点加压时,得到如图 2 所示的压点位置与灵敏度的关系图。实验取得的结果与日本柴田慎一的结果相一致^[10]。

由图 2 可以看出,在发射极上加压时,只有在 $e-b$ 结靠发射区一边几微米范围内加压,其集电极电流 (I_c) 下降较大,但有一段可控范围。在基区和发射区靠中心处只呈现很小的集电极电流增加。由此可以定性地看出,施压位置在 $e-b$ 结处,虽有高的灵敏度,但是只要针尖稍有小的位移,器件就将出现不稳定性。显然,在 $e-b$ 结靠发射区一边几 μm 处是合适的。其它位置因灵敏度太低不足取。实验证明,较理想的位置约在离 $e-b$ 结 $5-10\mu\text{m}$ 范围内。

2. 压力大小与灵敏度的关系

本实验采用了图 3 和图 4 所示的两种管形,在实验中未发现明显的差别。但图 3 的尺寸较小,故出现位错的可能性小,成功率相对地要大些。

图 5 示出了在其它条件(如针尖半径、加压位置等)相同的情况下,施以不同的力时,基极

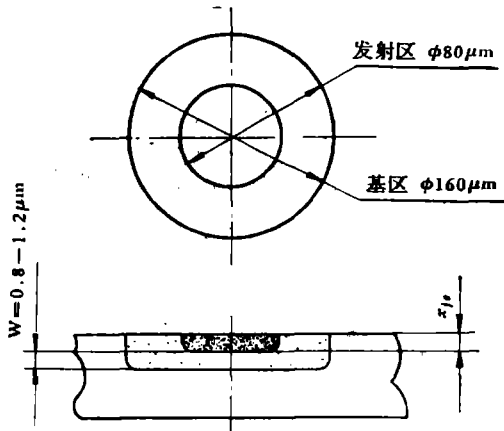


图3 圆形晶体管结构示意图

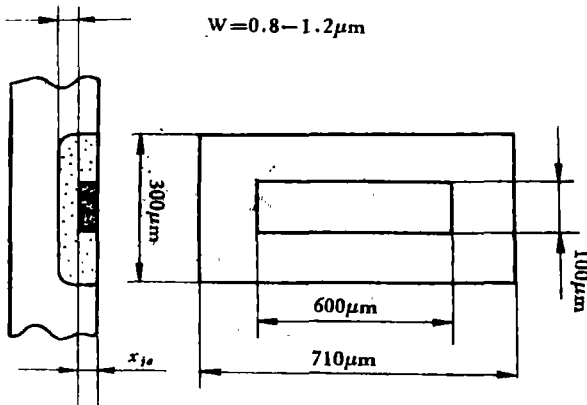


图4 矩形晶体管结构示意图

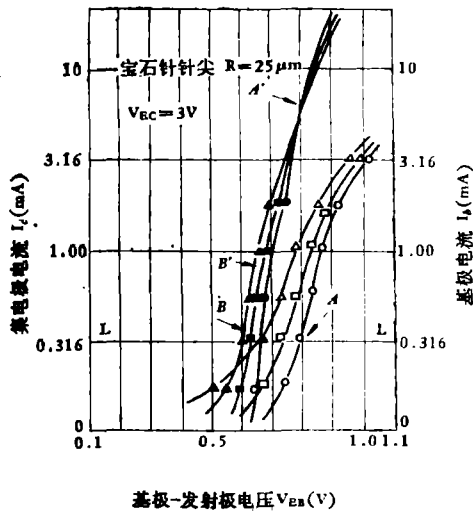


图5 发射结深为 $0.8\mu\text{m}$ 的压敏晶体管在不同压力情况下的特性变化

0g ○ } I_b (mA) 0g ● } I_c (mA)
 5g □ } I_b (mA) 5g ■ } I_c (mA)
 20g ▲ } I_b (mA) 20g ▲ } I_c (mA)

电流 (I_B) 将产生不同的位移, 而且施加的力越大则位移也越大. 在一定的基极电流下, 随着基极电流 (I_B) 的位移, 集电极电流 (I_C) 将出现明显的减小.

假定我们将基极电流 (I_B) 恒定在 0.316 mA , 通过该点作一条水平线 $L-L$, 取 0 g 时的 I_B 曲线与 $L-L$ 相交的点为 A ; 15 g 时相交的点为 B , 通过这两点投影至集电极电流曲线, 分别得 A' 、 B' . 可以看出 I_C 将降低近一个数量级左右. 而用同样的方法可以看到 5 g 力时, 集电极电流将要小得多. 这些值就是反映在电路负载上的灵敏度.

3. 发射结深与灵敏度的关系

图6和图7分别表示不同发射结深晶体管的实验曲线. 用上述方法对图6、图7作比较, 可以明显地看出, 浅发射结器件的灵敏度比深发射结器件的灵敏度要高得多, 同时浅结器件的工作电流也较小. 因此, 可以说浅结器件是获得高灵敏度的基本条件.

4. 氧化膜对施压灵敏度的影响

平面晶体管在制造过程中, 其硅片表面以及最后完成的管芯表面都覆盖有一层二氧化硅膜, 使 $P-N$ 结不直接裸露在外面, 以避免环境中的水汽、各种离子和气体分子对 $P-N$

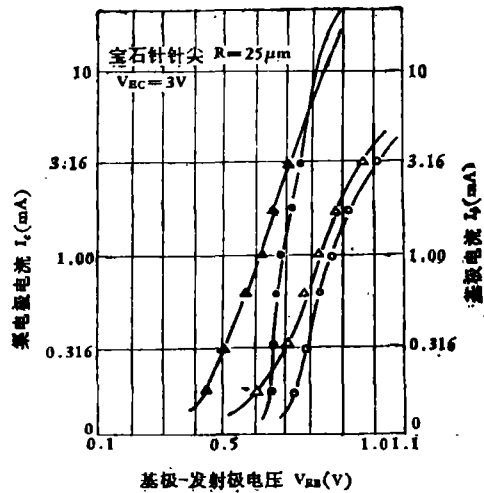


图6 发射结深为 $1.1\mu\text{m}$ 的压敏晶体管加压后的特性变化

0g ○ } I_b (mA) 0g ● } I_c (mA)
 20g ▲ } I_b (mA) 20g ▲ } I_c (mA)

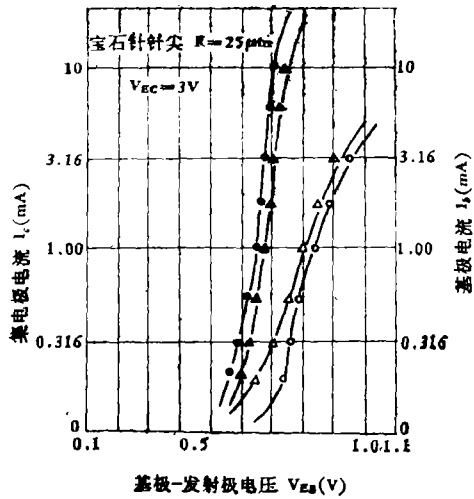


图7 发射结深为 $3\mu\text{m}$ 的压敏晶体管加压后的特性变化

0g ○ } I_B (mA) 0g ● } I_C (mA)
20g ▲ } I_B (mA) 20g ▲ } I_C (mA)

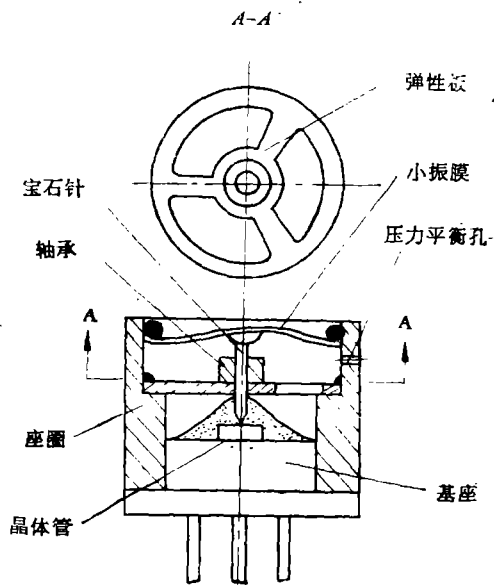


图8 压敏晶体管结构示意图

硅橡胶 环氧树脂

N 结的污染, 从而有效地提高了平面管的可靠性和稳定性。

尽管这层氧化膜仅有几千 Å 的厚度, 却还是增加了应力表面之间的距离, 使灵敏度有所损失。所以国外有的研究者把施压区部分的氧化膜去掉, 以提高其灵敏度。但对器件却产生了不良影响, 特别是腐蚀和污染后增大了噪声, 更是不足取的。所以我们认为施压区还是应该有氧化层保护, 至于灵敏度的问题, 可通过减小发射结深来弥补。

与氧化层相比, 作为连接引线用的铝蒸层却是不可忽视的, 它在施压区的存在, 大大地增加了应力表面之间的距离, 缓冲了施压应力, 使灵敏度有较大的降低。我们认为, 在设计管形时, 应不允许在施压区有蒸铝层存在。

四、实验型压敏晶体管换能器

本实验型压敏晶体管换能器如图8所示。采用了图3所示的管芯图形, 管芯与管座之间的连接采用普通的银浆还原法工艺, 但必须使管芯尽量在管座的中心位置上, 图3的结构参数 X_{jc} 取 $1\mu\text{m}$, 宝石针针尖半径为 $25\mu\text{m}$ 。考虑到湿度可能对器件造成的不良影响, 除振膜用

0.02mm 的不锈钢箔引伸成形外, 其余所有金属结构件均采用膨胀系数较小 ($4.7\sim 8.7 \times 10^{-4} \text{cm}/^\circ\text{C}$) 的 1J50 可伐合金制成。

在本实验管芯中我们除了采用小振膜与宝石针直接耦合对平面管进行加压外, 还设计了和弹性板构成一体的导向轴承(图8), 以保证针尖在发射区的加压位置不变, 保证灵敏度的相对稳定。针头和管芯相连部分的硅橡胶除了辅助固定针尖位置外, 主要用以固定电极引线, 防止受冲击或振动后造成断线或碰针。

用这种方法装成的管芯器件实际上是一只独立的压敏晶体管, 它可配上声学构件而组成送话器, 也可象普通晶体管一样方便地贮存起来备用, 或根据需要组成其它由机械力作用而

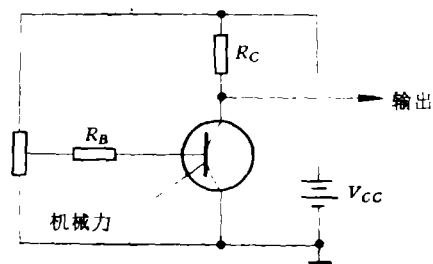


图9 压敏换能器偏置电路原理图

转换成电讯号的换能器件。

当将图 8 所示的压敏晶体管按图 9 所示的电路连接,并在振膜上施加一静压力时,在各种偏置条件下的灵敏度如表 1 所示。

表 1 各种偏置条件下的灵敏度

V_{cc} (V)	V_{ce} (V)	I_c (mA)	R_c (Ω)	I_B (mA)	R_B (Ω)	灵敏度 (mv/G)
6	3.0	1.0	3K	0.12	30K	7
9	4.5	1.5	3K	0.30	30K	18
15	4.0	3.7	3K	0.50	30K	20

由于这种换能器的尺寸小,机械谐振频率高,所以在频率特性显示器和真空管毫伏表上,可观察到施力时从 0—30kHz 范围内较平坦($\pm 1\text{dB}$ 以内)的频率响应曲线,其信噪比可达 40dB 以上。我们曾在小振膜的任意位置上用测克计施以 3g 的力,去掉力后仍能恢复到原有性能。同时器件在离地面 2m 距离作自由跌落试验,随后仍能维持其工作性能。

另外,我们还对器件的温度稳定性进行了试验。在 0—50℃ 的温度环境中,每隔 5℃ 测一次(每一温度梯度保持 20min.),发现,管壳旁没有气压平衡孔的器件,试验数值离散性大,而有平衡孔的器件则其集电极电流变化率在 20% 左右。

五、组装式压敏晶体管 实验送话器

为了实验组装式压敏晶体管换能器和大振膜连接的可行性和可靠性情况,我们用现成的 SC-300 型受话器的铍青铜振膜(有效受声面积为 8cm^2)和其它一些声学元件组装成了通信用实验送话器(图 10)。

本送话器在 V_{cc} 为 6V, I_c 为 2mA, I_b 为 0.2mA, 负载为 15k Ω , 频率为 1000Hz, 声压为 10 μbar , 距仿真嘴唇圈为 40mm 处等条件下进行测试,其平均灵敏度为 100mv/ μbar 左右。如果我们把负载 15k Ω 的灵敏度换算到 100 Ω 负载时的灵敏度,则为 8.2mv/ μbar 。

应用声学

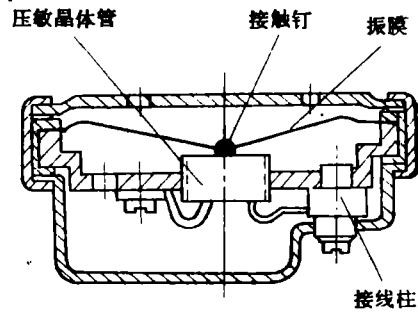


图 10 压敏晶体管实验型送话器示意图

由此可知,尽管我们采用的管芯是用现成晶体管改制的,在结构参数上不一定完全适合作晶体管送话器用,所用振膜也较一般通信用碳粒送话器的振膜要小,但是,其增益(若按一般碳粒送话器的增益来说约为 14dB)和灵敏度(若与上海电讯器材厂的 8700 型碳粒送话器相比)已接近和达到碳粒送话器的水平。

对压敏晶体管送话器的工作可靠性和稳定性,我们进行了如下两项试验:

1. 按碳粒送话器技术条件进行了振动和冲击试验,其试验结果(五只送话器的平均值)示于表 2。

表 2 振动和冲击对灵敏度的影响

试验前	振动后	冲击后
155mv/ μbar	122mv/ μbar	104mv/ μbar

2. 将实验送话器经八个多月的随意保存和使用,以及在无特殊包装的条件下经 3000 多 km 铁路和几百 km 公路运输后,送达四机部做现场通话试验,工作正常,性能良好。

试验结果表明,压敏晶体管实验送话器经振动、冲击后,其灵敏度虽有一定衰减,但还是能经受一定的恶劣环境考验的。如果对装配结构作完善设计,特别是大振膜与小振膜若采用弹性连接,则预料将会有很大的改善。

六、简要小结

通过对压敏晶体管实验送话器的一些实验和探索,基本上弄清了:

压敏晶体管几何参数的一般关系；宝石针在晶体管发射区的加压位置和压力范围；压敏晶体管在各种偏置条件下的灵敏度；发射结深与灵敏度的关系，浅发射结可望进一步提高器件的灵敏度。

通过对组装式压敏晶体管实验送话器的实践，简化了装配工艺，并克服了针尖定位困难等问题，基本消除了器件在外力作用下，压针易变形而造成的不稳定性。经过一系列性能试验证明，组装式压敏晶体管实验送话器的结构设计是可行的，为进一步研制实用的压敏晶体管送话器提供了可资参考的依据。

通过如上的一系列探索和实验，对有些问题还得到了十分有益的启发，如：

小振膜上是否要设计一压力平衡孔，以适应因温度变化而引起的压力不平衡性；设计与宝石针成更精密配合的红宝石轴承，以取代本实验所用的环氧树脂轴承，可能对进一步提高结构的稳定性有利。

另外，于实验中还发现，有的器件在规定的

压力下，噪声较大。即使去掉外力，噪声仍然很大，说明这种噪声并非压力引起晶格损坏所致。可能是一种与半导体材料本身及工艺条件有关的噪声。它的大小与晶体管的表面状态（如表面漏电、表面复合等）有关。这种噪声与晶体管的工作频率成反比，可见在低频段工作时，噪声主要由晶体管所决定，一般在500—2000Hz频段噪声影响显著，这对于送话器的应用是十分有害的。

参 考 文 献

- [1] *J. Appl. Phys.*, Vol. 33, No. 8 (1962), p. 2479.
- [2] *NHK 技研月报*, Vol. 7, No. 11 (1954), p676.
- [3] *J.A.E.S.*, Vol. 29, No. 2 (1957), p. 248.
- [4] *The Review of Scientific Instrumets*, Vol. 33, No. 10 (1962), 10.
- [5] Bell Laboratories Record, 1962,p418.
- [6] *Automatut Electric Technical*, Vol. 11, No. 3 (1968), p. 109.
- [7] U.S.P 3435157 1969.3.15
- [8] U.S.P 3389233 1968.6.18
- [9] [英] M. L. 盖福德著《电声学》科学出版社, 1981. p7.
- [10] 日本音响学会讲演论文集, 1967. 2—2—10.

国际标准化组织声学技术委员会建筑声学 分委员会第七届会议



国际标准化组织声学技术委员建筑声学分委员会 (ISO/TC43/SC2) 第七届会议于 1982 年 4 月 29 日在奥地利首都维也纳举行。会议前后 (4 月 26 日至 30 日) 各工作组召开了工作组会议。我国标准化协会派出由李沛滋 (中国科学院声学研究所)、车世光 (清华大学) 同志组成的代表团参加了会议。

该分委员会共有 26 个正式会员国 (P) 及 8 个观察会员国 (O)。参加这次会议的共有 18 个正式会员国，代表 37 人。我国第一次派代表参加会议。

会议选举了德意志联邦共和国 H. Schulze 为 主席。大会对所讨论的问题作出了三项决议：

1. 请秘书处用通信方法征求 ISO/TC43/SC2 会员国的意见，是否同意将建议草案 ISO/DP3822/4 (声

学——实验室检测供水系统设备与器具辐射的噪声——第四部分：特殊设备的安装和工作条件)送交中央秘书处作为国际标准草案 (DIS) 进行表决。

2. 决定撤消第五工作组 ISO/TC43/SC2/WG5 (建筑和建筑构件的隔声和评价)。

3. ISO/TC43/SC2 支持以下新的工作项目：

a. 小建筑构件的隔声的实验室测量； b. 声辐射效率； c. 用声管法测定声吸收系数和阻抗； d. 屏障声衰减的实验室测量。

要求秘书处采取适当的步骤将这些工作项目纳入 TC43 的工作计划。

(车世光、李沛滋)