

关于歌手共振峰概念的由来及一些讨论

王士谦

(中国科学院声学研究所)

1986年9月8日收到

歌唱声学是五十多年来,特别是近一二十年来很活跃的一个主要由语言声学与音乐声学交接而生长出来的新研究分支。歌手共振峰(Singer's Formant),曾又称歌唱共振峰(Singing Formant),是歌唱声学的核心课题之一。对歌手共振峰的研究已引起声学界、声乐界、语音学界、嗓音医学界生理学及心理学界的一些专业工作者的广泛兴趣,这主要是由于它涉及到发声生理机制、听觉感受、语音产生和分析合成、嗓音训练和保护等许多方面,并对它们有着重要的意义。

在歌唱中,在一定的音阶(特别在高音)上,歌唱者持续地拖唱字腹元音是重要的表现歌曲内容手段之一。它可充分地表现出歌唱者声音的质量与色彩,而且对其发声技术的好坏极大地影响着歌唱者的嗓音健康。在研究中,这样的唱元音又可被近似地视为稳态元音而进行声谱分析,且也便于进行唱,说的对比和优、劣唱声对比,从而发现优质声音的声学特征(主要指发射声谱上的共振峰特征)。以前的歌手共振峰概念不仅是针对唱元音,而且主要是对重机制(Heavy Mechanism^[1])发声而言的,——本文作者曾指出^[2],一些文献关于歌唱共振峰的不一致的结论就是由于没有认识到轻(Light Mechanism^[1])、重机制差别而形成的。歌手共振峰又包括歌手高共振峰(Singer's High Formant)和歌手低共振峰(Singer's Low Formant)不同的两个概念,但现在在一般文献中所用的歌手共振峰都是指的歌手高共振峰。本文以下基本上都将按上述这些约定述评及讨论。

在说元音声谱分析中,通常在5000Hz截频以下所出现的五个共振峰(即 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、

F_5)和基频(F_0)可反映出该元音的音色(包括元音音色——Vowel Color和音乐音色——Music Timbre)。一般说来,其中较低的两个峰 F_1 、 F_2 基本上就规定了该声音的元音音色,而较高的三个峰 F_3 、 F_4 、 F_5 影响着该声音的个人特征^[3]及音乐音色^[2]。

Bartholomew^[4]是研究歌手共振峰的先驱。他在1934年首先发现的歌手高共振峰是指在西洋歌剧唱法[即“掩盖”唱法(Covered Voice)或“关闭”唱法(Closed Voice)]发声声谱上的一个异常突出的共振峰。对男声来说,它的频率在2800—2900Hz;对女声来说,在3200Hz。它认为,花腔女高音(Coloratura)“无歌手共振峰”。他又认为,喉腔是歌手共振峰的共振源且这是由于歌手在发声时降低喉位而形成的。Bartholomew并未曾给出歌手共振峰成因的详细声学解释,但其后西方国家的有关声乐,声学文献中大都沿用他的歌手共振峰概念且标志为约在2800Hz的高能共振峰[如Rzhevkin^[5], Vennard^[1], Sundberg^[6]等等]。关于女高音的歌手共振峰,由于基频高,有个前提问题:一般对于基频很高的元音发声,由于源声的各谐波分量之间的频率差大,因而在发射声谱上很难测得共振峰,有些人把发射谱上的包络峰当作共振峰,这在发基频很高的元音时,除了在一些特殊情况下,一般地说,并不正确。

与此相关联的对发声的另一方面研究是生理机制。长期以来,不少嗓音研究者及声乐教师都把发声时喉结竖向运动位置变化作为重要

* 本文曾于1986年10月在中国声学学会语言、听觉和音乐分科学会学术讨论会(成都)报告。

的发声生理现象之一来观察研究,并试图发现发声喉结位置与音质、音色及用嗓健康的关系。从声学上来说,喉结位置的高低极大地影响着声道的长度及截面积函数,从而决定着共振峰的变化,这就引起声学研究者的兴趣。在发声喉结位置方面有些人做了研究,例如:Fromhold和Hoppe^[7]用X光检查对专业歌唱者与学生进行对比后认为:声音质量的高低与唱音发声时喉结位置高低相反关联。Shipp和Izdebski^[8]经摄影测量八名专业和业余歌唱者的发声喉位后得出结论:随音阶升高,经训练的专业歌唱者的喉位在发声中降低,且在整个声区内保持在喉结休息位置之下(以下简称低喉)而未经训练的歌唱者的喉位则恰反而升高,且保持在喉结休息位之上(以下简称高喉)。这些结果与传统上总的观点是一致的,即高喉发声导致劣质倒嗓,例如Soninen^[9],Ruth^[10],Vennard^[11],Sundberg^[6],和Norström^[11]等等。

在七十年代,瑞典皇家理工学院语言通讯和音乐声学系Sundberg^[12-13]根据他在几个男低音唱元音声谱上所发现的一个新的额外共振峰(Extra Formant),对原Bartholomew的歌手共振峰提出了新的见解和概念。他并循用传统的低喉观点结合他的独立喉腔模型,对这个额外共振峰进行了声学和生理解释。Sundberg称此额外峰为歌唱共振峰,以取代Bartholomew的歌手共振峰。Sundberg^[11-13]在1974年和1977年所定义的歌唱共振峰是指西洋歌剧音乐会专业歌唱技术(以下简称歌剧唱法或“掩盖”唱法)的男声唱元音声谱中所发现的一个介于对应说元音声谱中的 F_3 和 F_4 之间,频率约在2800Hz的一个额外高能包络峰。(Sundberg在此前后对歌唱共振峰的涵义有过几次改变,且以后在名称上又改回用歌手共振峰,以下我们常用“额外峰”,且用记号 f_e 来专指他的这个涵义。)Sundberg^[12]对其歌唱共振峰的降喉解释是:在歌唱中,唱者降低喉位,从而可致扩张咽腔。当咽腔被扩张到使咽、喉二腔接口处两腔截面积之比大于六比一而失配时^[14],喉室(Laryngeal Ventricle)就变成一个与声道其余

应用声学

部分相独立的共鸣腔,其共振频率从而给声道传递函数增加一个额外的共振峰。Sundberg又根据Fant^[15]的双管系统共振峰所满足的方程式及Ingard^[14]的上端喉管长度的误差近似式,估计这个额外峰的频率约在2500—3000Hz之间。它不受声道其余部分的发声器官运动影响,而且这个额外峰加给声音以明亮的音色。Sundberg^[12-13,16]还解释说,喉位的降低使得声道变长从而导致唱元音的各共振峰比对应的说元音的共振峰都低。他又认为,额外峰的存在与音高、元音、及动态声级都无关,它是所有男声专业嗓音的典型声学特征,且是衡量优质声音的标准。此外,他还扩大了Bartholomew观点的外延,认为女高音的声音没有歌唱共振峰。Sundberg的歌唱共振峰定义及其降喉解释,和上述这些有关结论,在七十年代后期及八十年代早期,曾广被接受而引用于音乐声学及声乐教育的文献之中。

本文作者^[17-18,21]等在八十年代初曾对几种不同风格(包括一些中国民族风格^[9]、西方早期音乐风格^[3]及西方歌剧风格)的一些男高音的唱元音发声,进行了声谱分析(用LPC及DFT方法提取共振峰,用Cepstrum方法提取基频),并测量了唱者发声喉位及进行了专业听音评价实验。本文作者对于歌手共振峰及其有关的一些方面得到一些与前述观点不全相同的结论。这当中主要有:**1.**有一些训练有素、职业成功且嗓音优良健康的男高音也采用高喉发声,且其声音具有歌手共振峰,甚至“额外峰”。此即,并非所有专业歌手都采用低喉发声,且并非所有高喉发声都是劣质倒嗓,其中应有优劣之分。**2.**在声谱上,各种、各人的歌手共振峰是一组峰群(并非特定的某一峰,或“额外峰”),其峰群组成模式既有共同特征,又是多种多样的。歌手共振峰群中的峰数、各峰名、各峰频、各峰幅,及峰群结构可随发声法(例如高、低喉的各方法,圆、展唇等),嗓源振动模式,元音,甚至基频的不同而变化。本文作者所建议的歌手共振峰(群)的新概念是,对于重机制发声的歌手共振峰是由在大约1800—3800Hz频带(亮频带

• 11 •

BFR)内出现的相对较高振幅或较密集的2—4个共振峰群所组成。这个峰群一般是 F_2 、 F_3 、 fe 、 F_4 中几个峰(或缺峰)的某些组合。其中有时出现的额外峰 fe 位于 F_3 、 F_4 的附近(不仅限于其间);当 fe 出现时,可形成 $F_3 fe F_4$ 的组合密集且增强振幅。一般 F_3 (尤其当 fe 不大于 F_4 时),不能形成与 F_3 、 F_4 的密集。本文作者且指出,并非所有优质唱声中都有额外峰 fe ,因而它不能概括歌手共振峰的外延,也不宜以此作为判别优质声音的标准。3.关于唱元音,相对说元音的共振峰频率的偏移,对高共振峰来说,主要由受喉位,唇形所影响的声道长度变化而决定;而对 F_1 、 F_2 来说,则主要由元音声变(Umlaut)或修饰(Modification)所相应的声道截面积以及长度的变化而定。随基频升向很高时,具有好的共鸣发声的歌手又善于调节唱元音的各个共振峰频率(可以不同程度)使它们愈来愈趋近或重合于其相邻的有关谐波分量。(在这样的情况下,共振峰也就能酌情近似可测。)4.在不同的机制(不同喉位,或同喉位不同用嗓)的发声中,声源及声源与声门上下系统的交互作用是不同的,且这是形成女高音与其它音部发声,高、低喉发声,优、劣高喉发声各声音之间的声学特征的区别的重要原因之一;也正因此,歌手共振峰的模式是多种多样的。基于这些结果,就对 Sundberg 的歌唱共振峰(“额外峰”)的定义及其降喉解释提出了问题,由此也涉及到 Sundberg 关于咽、喉二腔失配条件,以及在几种情况下唱声的各共振峰(相对对应的说元音各共振峰)偏移方向和数值等方面的问题。

Seidner 等人^[19]、Troup 和 Luke^[20] 近来发表的研究结果也直接或间接地表明,歌手共振峰(包括 fe)不仅依赖于音高、而且应随元音而变化。Seidner 等人的结果还表明,高音部的歌手共振峰频率高于低音部唱者的歌手共振峰频率。他们还发现女声(包括女高音)的歌手共振峰是由双峰组成;其第一峰位于 2500—3000Hz,另一峰位于 3000—4000Hz。此(女)歌手共振峰的双峰所在频带与前述本文作者关

于(男)歌手共振峰概念中的亮频带 1800—3800Hz 基本一致。其中女声歌手共振峰(群)所在频带高于男声歌手共振峰(群)所在频带,看来这是由于他(她)们音部、音域所在频带不同所致,此结果及推断也与其它一些关于音部与共振峰关系的研究结果一致(如 Cleveland^[21])。

Sundberg^[22](并和 Johnson^[23])后来由于观察到了某些成功的女高音也使用高喉发声,从而改变了他原先所持的高喉发声劣质倒嗓观点。但对男声,他仍持低喉解释^[24—25,22]。

Shipp^[26]最近(1986)修订其(1975)结论为:歌剧唱法为低喉,而未经训练的噪音为高喉发声。

关于歌唱共振峰的含义,Sundberg^[6,12—13,7]在近十多年来曾有过几次改变。其中三次明显不同的定义是,1.第四元音共振峰 F_4 (1970);2.如前所介绍的“额外峰” fe (1974,1977);3. F_3 、 F_4 、 F_5 的聚集峰(1984),(且他改回重称为歌手共振峰)。他写道^[22]“歌唱共振峰,或如我现在更愿称之为歌手共振峰,是由聚集的 F_3 、 F_4 和 F_5 所构成……而且这个聚集峰可被解释成一个与喉室关联的额外峰”——由此可见,Sundberg 的歌手共振峰概念在内涵、外延及术语上的变化。

面对前曾所述的几位以及其他研究者(例如 Hollien^[28], Bloothoof^[29]等)的新结果和对于 Sundberg 的歌唱共振峰所提出的问题,Sundberg^[24]曾还又扩大过其近期的歌手共振峰定义的外延,而认为:男女唱与说元音声谱上的高共振峰(他且均称为歌手共振峰)的振幅无明显区别,因此必须由标准化单位来设定临界振幅加以区分。Rossing、Sundberg 和 Ternström^[22]最近(1985)又重申并补充修订 Sundberg 的歌手共振峰的概念。他们认为,歌手共振峰与说元音的高共振峰的区别只在于:对男唱声来说,是 F_3 、 F_4 、 F_5 的密集;而对女唱声来说,是 F_3 、 F_4 的密集;他们且把歌手共振峰所在频带改定义在 2000—4000Hz,他们认为,女声(至少一些职业女高音)可使用高喉发声,这也是女声与男声发声生理特征区别之一。这里,在

Sundberg 的歌手共振峰的解释上, 就又出现了新的问题: 何以男声降喉能使 F_3 、 F_4 、 F_5 密集, 而(一些)女声升喉能使 F_3 、 F_4 密集? 何以 F_3 、 F_4 、 F_5 三个峰频率能由一个独立喉室产生? 从很多的实验结果上 (如 Wang^[17,2], Seidner et al^[19] 甚至也包括 Sundberg^[12] 及 Rossing et al^[29] 等人的图示数据), F_3 、 F_4 、 F_5 并不能聚集成一个峰. 这是因 F_3 与 F_5 的频距很大, 甚至可大至 2000—2500Hz. 而且有时一些唱声谱上所出现的较密集的几个高共振峰, 那也只是插入 f_e 后与其它几个高共振峰的某些组合 (例如 F_3 、 f_e 、 F_4), 而并非能定为 F_3 、 F_4 、 F_5 的聚集峰^[2].

关于男女歌手共振峰的差别, 包括“女高音无歌唱共振峰”的问题, 本文作者^[2]曾解释为, 由于发声轻、重机制不同所致. 女高音(尤其在高音阶上)发声是类似男声发一种假声的轻机制, 其声带振动模式与一般男声重机制发声时的声带振动模式不同(表现在例如声门面积、声带接触面积、和声门体积流的变化不同); 这在声源频谱上就反映在包络的特征(斜率及截距)不同. 在女高音发声声源谱上, 谐波振幅很快的减弱^[30]及谐波之间较大的频距, 就使对应的发射谱上的高共振峰比男声重机制发声的歌手共振峰弱得多(见图 1、3), 男假声(轻机制)也有类似情况(见图 2). 近年来 Bloothoof 和 Plomp^[29] 的结果也部份地说明这一点. 由此可见, 如不分清轻、重不同的发声机制, 而只比较发射谱上高共振峰的强弱疏密是难以弄清唱声的声学特征及歌手共振峰的概念. 再有, 在有的音域内, 同一唱者, 或不同(即使不同音部)的唱者也可随意志与技巧而采用相同或不同的机制发声. 好的歌手都善于根据其声部的发声规律及所唱音的音高、音量和音色需要而能有机地调节声道截面面积函数(声道形状)、声道长短(如喉位及唇形)、声道的吸收反射系数(如肌肉松紧)、口鼻腔出口发射系数(如出口形状面积)、以及气流动力, 使之与声源匹配, 相互适应. 近些年来, 愈来愈多的研究结果表明, 声源、及声源与声门上、下系统交互作用对所发出

应用声学

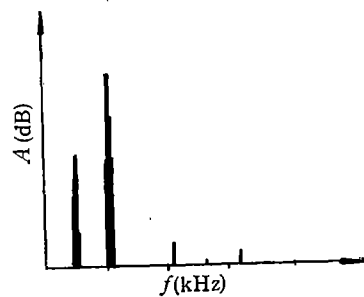


图 1 女高音唱 /A/, 基频 263Hz, 提升 6dB/oct.

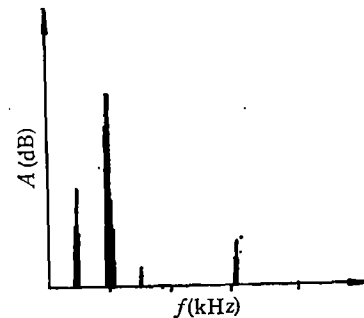


图 2 男用假声唱 /A/, 基频 263Hz, 提升 6dB/oct.

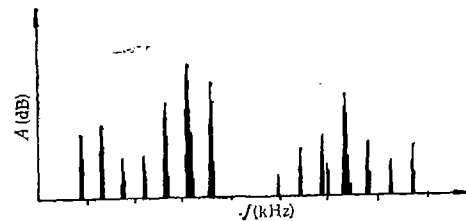


图 3 男用重机制唱 /A/, 基频 263Hz, 提升 6dB/oct.

声音的重要影响, 而单一特征的浊声源限制了人工合成声音音质的提高也说明了这一点. 作为优质的唱声更是一定的喉头机制(声源振动模式)与口、咽和喉腔适当的调节(匹配声道共鸣和发射)及相应的呼吸支持(匹配的声门下的动力和共鸣)互相作用的结果. 由此又可见, 单从发射声谱上高共振峰的频率及振幅大小来刻划衡量唱元音的声学特征是不够的. 例如, 某些声门闭得过紧, 音色“挤”的发声, 甚至某种大音量的说话也可能含有较强的高共振峰; 相反, 一些优质抒情女高音发声、男假声、轻声却未必会有很强的高共振峰. 目前的歌手共振峰概念系针对重机制发声而言, 还是一种狭义的

概念。在进行唱声声谱分析时，不仅要注意不同声部轻、重发声机制对歌手共振峰的影响，而且应考虑到低共振峰 (F_1 、 F_2)，甚至声谱上一些其它因素。清晰圆润的唱元音的频谱上各谐波的频谱线之间图案就比较干净而无或较少噪声成份(不和谐分量)；否则，粗糙刺耳的声音的频谱上，谐波分量往往不分明且噪声成份充在其间。

歌手低共振峰是由 Kazanski 和 Rzhhevskina^[9]在 1927 年和 Bartholomew 在 1934 年先后发现的 [Kazanski 和 Rzhhevskina 称歌手低共振峰为歌手共振峰 (Singer's Formant) 且称歌手高共振峰为第二歌手共振峰 (Second Singer's Formant)，但西方文献中不大人沿用他们的名称。]

Bartholomew 对歌手低共振峰的描述和解释是：好的男声显示加强 500Hz 或其以下的谐波分量，这完全是由于降喉所致的扩大和坚固咽腔并且拉直会厌和喉壁所形成的结果。

由于在声谱上，各说元音在 1000Hz 以下都有 1—2 个强共振峰 (F_1 、 F_2)，且其振幅是相对高度，而在唱声中，因有了较强的歌手共振峰后就难以比较出低共振峰的加强。在低中音域，一般声乐教学中都要求发声近于说，唱说之间喉位置变化不大，语音修饰也较小，这样，唱与说的低共振峰区别就不太大。历来，对唱声的低共振峰研究论述也较少。可是，在较高音阶上唱元音声谱上的低共振峰就表现出不同的特征。

Sundberg^{[12][13]} 曾发现女高音在唱高音时，尤其当音阶高于相应的说元音的 F_1 时，歌手就会调节升高 F_1 使之与 F_0 相合从而加强其峰振幅。

Rossing, Sundberg 和 Ternström^[25] 近来还认为：男声则不然，其低共振峰的频率与音阶的高低无关，而仅与元音有关。其实男声，尤其是男高音唱元音的各共振峰，包括低共振峰的频率偏移及振幅变化，也是与元音及音阶都有关的^{[17][2]}。这特别表现在唱很高的音时具有优良共鸣声音的歌手往往调节声道、使其各共

振峰的频率按不同程度趋近或重合于有关相邻的谐波分量，从而带权地增强各共振峰。例如，对于男高音在 $\#C_4$ (277Hz) 唱元音 /i/，那么 F_1 就或者保持在其说元音的 F_1 原频率附近，或者偏移第二谐波分量频率 (554Hz) 附近，(也是由唱者唱/i/的“变体”及其发声共鸣强弱而决定的)，从而得到加强，形成歌手低共振峰；对于 F_2 ，则可能被调节到约在 1800—2500Hz 之间的某一高谐波分量附近 (这也是由唱者唱/i/的“变体”、声道长度变化及高频共鸣强弱而定的)，且与 F_3 、(f_c)、 F_4 形成歌手高共振峰群。又如对于男高音在 A_4 (440Hz) 唱元音 /A/ 则 F_1 较容易被调节在第二谐波分量 880Hz、 F_2 则在第三谐波分量 1320Hz 附近被加强从而表现出歌手低共振峰。当然，歌手为了适应音部及声区的要求，保持各元音及在各音阶上声音的匀称，一般都只适当调节控制共鸣强弱及“音位变体”，并不孤立追求共鸣，而要注意使有关共振峰频率按需地移近相配的谐波分量。由此可见，歌手低共振峰频率并不总在 500Hz 附近，而是随元音、“变体”、频率、共鸣强弱等因素有所变化。这在本文作者^[2]，甚至 Rzhhevskina^[9] 的声谱图上都可看到各元音 F_1 的差别。由于歌手低共振峰在声谱上位置相对相应的说元音共振峰有偏移，所以其元音音色发生变化 (可视为“变体”)。这尤其是在唱高音阶时，各元音的元音音色差别渐小，有点类似语音的央化 (Neutralization) 现象。不过这里的“央”并非中心，而是元音特征的调合而已。由前述我们可看到歌手低共振峰的频移及增幅并且加上歌手高共振峰群的增幅就使得唱元音比说元音一般要响亮，而且元音音色也随音阶升高而改变。这在男女、声来说，基本方面都是一样的。

从 Bartholomew 等首先发现歌手高、低共振峰迄今五十多年以来，人们对唱声的声学特征及歌唱共振峰的认识随着愈来愈多的实验、研究及讨论而加深和发展。对它的进一步研究结果将必会对职业嗓音的训练、保健和对语言通讯的研究及发展大有裨益。

参 考 文 献

- [1] Vennard, W., *Singing: The Mechanism and the Technique*, New York: Carl-Fisher, 1967.
- [2] Wang, S., *The J. Acous. Soc. Japan (E)*, 7-6(1986), 303—314.
- [3] Ladefoged, P., *Elements of Acoustic Phonetics*, Chicago: University of Chicago Press, 1962.
- [4] Bartholomew, W., *J. Acous. Soc. Am.*, 6(1934), 25—33.
- [5] Rehevkin, S. N., *Soviet Physics-Acoustics*, 2 (1956), 215—220.
- [6] Sundberg, J., *Folia Phoniatrica*, 22-1 (1970), 28—48.
- [7] Frumhold, W. and G. Hopper, *Folia Phonoarica*, 17 (1965), 83—91; 18(1966), 81—90.
- [8] Shipp, T. and K. Izdebski, *J. Acous. Soc. Am.*, 58-4(1975), 1104—1106.
- [9] Soninen, A., *Proc. of 4th ICPS*, Mouton: The Hague, 1962.
- [10] Ruth, W., *NATS Bull.*, May (1963), 2—5.
- [11] Sundberg, J. and P. E. Norström, *STL-QPSR*, 2-3 (1976), 35—39.
- [12] Sundberg, J., *J. Acous. Soc. Am.*, 55-4 (1974), 838—841.
- [13] Sundberg, J., *Scient. Am.*, 3 (1977), 82—91.
- [14] Ingrad, U., *J. Acous. Soc. Am.*, 25(1953), 1037—1067.
- [15] Fant, G., *Acoustic Theory of Speech Production*, Mouton: The Hague 1970, 2nd..
- [16] Sundberg, J., *Acoustica*, 32 (1975), 89—96.
- [17] Wang, S., *The 105th Meeting of ASA (1983, Cincinnati)* and *NATS, Bull. Jap/Feb.*, 1985.
- [18] Wang, S., *Proc. of 12th ICA (1986, Toronto)*, K1-3.
- [19] Seidner, H. K., et al., *Proc. of SMAC* 83, 46-1 (1985), 261—268.
- [20] Troup, G. and H. Luke., *Proc. of SMAC* 83, 46-1 (1985), 305—311.
- [21] Cleveland, T. *J. Acous. Soc. Am.*, 61 (1977), 1622—1629.
- [22] Sundberg, J. letter to Wang S. 1984, Sundberg also noticed Wang that he realized recently "that singing with a high larynx occurs in professional and does not have to be harmful to the voice function."
- [23] Johansson, A., Sundberg, J. and Wilbrend H., *Proc. of SMAC* 83, 46-1 (1985), 203—218.
- [24] Sundberg, J., A lecture (Trans. of 12th symposium: CPV 1985).
- [25] Rossing, T. D., Sundberg J. and Ternstrom S., *STL-QPSR*, 4(1985), 43—58.
- [26] Shipp, T., Vertical laryngeal position: Research findings and application areas for singing, 15th symposium: CPV. 1986
- [27] Sundberg, J., The voice as a sound generator, Research aspects on Singing Publication issued by RSAM, No. 33, 1983.
- [28] Hollien, H., The puzzle of the singer's formant, *Vocal Fold Physiology* 1982, (ed by Bless, D. M. and Abbs, J. H.), San Diego, College- Hill Press, 1983.
- [29] Bloothoof, G. and Plomp, R., *J. Acous. Soc. Am.*, 77-4(1985), 1580—1588.
- [30] Monsen, R. B. and Engebretson, M., *J. Acous. Soc. Am.*, 62- 4(1977), 981—993.

国外声学简讯

R. J. von Gutfeld 等人报道, 以 7.5MHz 的聚焦声通过喷射器中心对基片镀金或铜, 与单独的喷镀技术比较, 在声场作用下, 改善了金和铜镀层的电积结构。对两种方式喷镀的样品做扫描电子显微检查发现, 有声场作用时, 镀层具有较为致密的电积, 有更为密集的柱状晶生长结构。而没有加声的镀层, 其镀层结构较疏松, 有枝蔓状晶生长。经测量, 声-喷注镀铜线与不加声的喷镀铜线比较, 其电阻率降低 10—50%, 最低的电阻率约为 $1.7\mu\Omega$, 等于铜的体积电阻。

声-喷注镀金属装置如图所示。电解液从直径为 0.5—1mm 的喷口射出, 其速度约为 350—1000m/s。提供水压的泵与电解溶液的容器相连, 溶液在密封的系统中循环。阳极与阴极(被镀样品)之间由一个恒流源保持一电位差。样品连接到由计算机控制的活动臂上, 使在喷射器与阴极之间作指定的相对运动。声换能器是一个 PZT 薄球面壳, 其曲率半径为 2.5cm。射频功率放大器供给换能器的连续电功率可达 12W; 射

7.5MHz 声-喷注镀金和铜

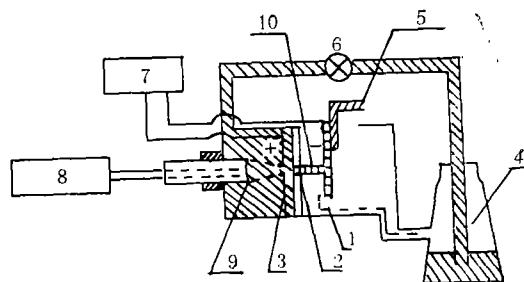


图 声-喷注镀金属实验装置示意图

1. 阴极; 2. 喷口; 3. 阳极; 4. 电解液槽; 5. 至计算机控制; 6. 泵; 7. 电流源; 8. 射频发生器; 9. PZT 换能器; 10. 喷射器。

到样品的声通量估计最大为 $30\text{W}/\text{cm}^2$ 。

(刘献铎)