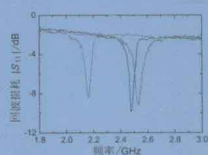
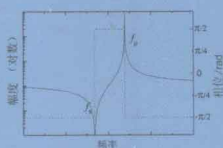
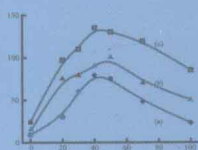
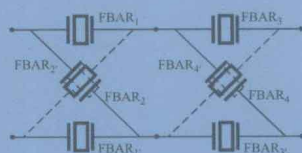
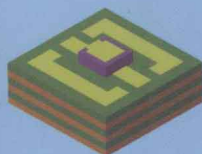
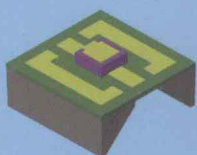




张亚非 陈 达◆著

薄膜体声波谐振器的 原理、设计与应用



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

国家科学技术学术著作出版基金资助项目

薄膜体声波谐振器的 原理、设计与应用

张亚非 陈 达 著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

随着薄膜与微纳制造技术的发展,电子器件正向微型化、高密度复用、高频率和低功耗的方向迅速发展。近年来发展起来的薄膜体声波谐振器(FBAR)的工作频率比传统声表面波(SAW)器件、石英晶体谐振器和陶瓷介质器件都要高(可达1~10 GHz),又具有体积小、Q值更高、损耗低、功率承载性好、换能效率高等优点。可以制成高性能滤波器、双工器、振荡器等多种射频集成微波器件和高灵敏传感器等,在新一代无线通信系统和超微量生化检测领域具有广阔的应用前景。本书系统地阐述了FBAR的基本原理、设计方法、关键技术及其材料体系的要求,并对FBAR的重要应用技术进行了总结概括与深入分析。本书可供从事谐振器理论和器件研究开发的专业技术人员阅读,也可供高等院校电子信息、通信系统、传感器检测、微电子学、微机电系统(MEMS)、自动化等领域的科技人员和相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

薄膜体声波谐振器的原理、设计与应用/张亚非,陈达
著. —上海:上海交通大学出版社,2011
ISBN 978-7-313-06516-2

I. 薄... II. ①张... ②陈... III. 薄膜—声
表面波谐振器 IV. TN62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 094618 号

薄膜体声波谐振器的原理、设计与应用

张亚非 陈 达 著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

常熟市文化印刷有限公司 印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×960mm 1/16 印张:11.5 字数:215 千字

2011 年 1 月第 1 版 2011 年 1 月第 1 次印刷

印数:1~2030

ISBN 978-7-313-06516-2/TN 定价:48.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

薄膜体声波谐振器(Film Bulk Acoustic Resonator, FBAR)是最近几年来研究和应用发展很快的一种采用薄膜和微纳加工技术制作的甚高频谐振器。FBAR 器件表现出如石英晶振一样的谐振特性,可以构成振荡器或滤波器应用于现代通信、传感和探测等系统中。FBAR 是主要由金属电极/压电薄膜/金属电极构成的一种基片上制作的器件,在某些特定的频率下,相对于传统用来构成带通滤波器及微波振荡源的 LC 振荡器、介质谐振器及声表面波(SAW)器件而言,除了具有小尺寸、低功耗、低插入损耗以及高工作频率(0.5~10 GHz)的优点之外,更重要的是它的制备工艺可以与 CMOS 工艺兼容,因此可与外围电路构成单芯片系统。

随着卫星、导航、蜂窝电话等无线通信需求的快速增长,现代无线通信技术推进了高频元件的相关发展,催生了更高频率的通信应用,带宽更大、数据更快的信号数据传输。微纳加工技术的迅速发展和新型功能材料的出现以及压电薄膜制备技术的日益成熟使高性能频率控制器件的微型化成为可能,FBAR 是利用薄膜体声波波长远小于电磁波波长的特性制作而成的谐振器,可以解决制作高性能前端射频滤波器的许多问题。由于 FBAR 可以达到轻、薄、短、小的要求,通过将多个 FBAR 级联就可以满足射频滤波器的技术要求,成为发展高频滤波器的一种全新的解决方案。FBAR 具有陶瓷介质谐振器无可比拟的体积优势和无可比拟的工作频率与功率容量的优势,以及作为目前唯一可以与 RFIC 或 MMIC 集成的射频滤波器,在无线通信系统方面具有十分广阔的发展和应用前景。

目前,越来越多的科研人员已经认识到 FBAR 器件的重要性,因为,FBAR 代表着一类性能最先进的声波谐振器件。由于 FBAR 工艺与现有 Si 半导体工艺兼容,因此 FBAR 器件和低噪声功率放大器、混频器等器件可以进行集成,制造更高性能和更小体积的射频系统。利用 FBAR 技术可实现滤波器、双工器及振荡器这样的高性能小体积微波器件。

FBAR 的另一个重要应用领域是高灵敏的微质量压电谐振传感器。压电晶体表面微小的压力变化会引起其振动谐振频率的改变。压电晶体谐振传感器是一种吸附传感器,依据这一原理,可以通过测量其谐振频率的变化来反映或测定出晶体表面的应力变化,应力变化反应出晶体表面附着质量的改变。依靠压电晶体表面吸附层的质量变化灵敏度可以达到单分子量级,可用来进行生物分子检测和极微量物质的探测,在质量传感器领域具有非常广阔的应用前景。

本书根据作者在此前沿领域的研究积累和对已有知识的理解撰写而成,详细介绍了 FBAR 谐振器模型所需的基本理论、设计原则、制备技术和应用方法等。本书在理论方面力求清晰易懂,在技术发展动向方面反映了 FBAR 技术的应用现状和前景,可作为高等院校电子器件、信息传感、通信系统、自动化、微机电系统 (MEMS)、微器件制造、国防等领域的科技研发人员和实验室检测人员指导用书,以及大专院校相关专业师生人员的教材或者阅读参考。

本书的主要研究工作得到了国家自然科学基金重点项目 (No. 50730008)、上海市科技项目 (No. 1052nm02000 和 No. 09JC1407400)、国家 973 计划项目 (No. 2006CB300406) 的支持,在此谨致谢意。同时,向长期鼓励、关心和支持本书研究、撰写和出版的各位专家、学者和工作人员表示衷心的感谢。

由于薄膜体声波谐振器的相关技术的迅速发展,加之作者研究领域所限,本书可能存在许多不足之处,恳请读者批评指正。

张亚非

于上海交通大学

2010 年 5 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 无线通信系统的发展对射频器件的要求	3
1.2 薄膜体声波谐振器的原理和特点	4
1.3 薄膜体声波谐振器的结构和材料	5
1.3.1 薄膜体声波谐振器的结构	5
1.3.2 薄膜体声波谐振器的材料	7
1.4 薄膜体声波谐振器的研究进展	8
参考文献	13
第 2 章 固体中的平面波	19
2.1 固体中平面声波方程	21
2.1.1 弹性形变的基本方程	21
2.1.2 弹性体中的平面声波	23
2.2 各向同性介质中的平面声波	24
2.3 各向异性介质中的平面声波	25
2.3.1 色散关系和倒速度面	25
2.3.2 波方程求解举例	26
2.4 压电介质中的平面声波	28
2.5 六方晶系介质中的声平面波	30
参考文献	33
第 3 章 薄膜体声波谐振器的理论模型	35
3.1 理想薄膜体声波谐振器的电学阻抗	37
3.1.1 理想谐振器阻抗的解析表达	37
3.1.2 薄膜体声波谐振器的谐振频率	39
3.2 复合结构薄膜体声波谐振器的电学阻抗	41
3.2.1 声阻抗的定义	41
3.2.2 复合模型的边界条件	41
3.3 薄膜体声波谐振器的损耗和性能参数	43

3.4 薄膜体声波谐振器的机电等效模型	44
3.4.1 各层材料的等效模型	44
3.4.2 普适机电等效模型	47
3.4.3 谐振点附近的近似等效电路	50
3.5 谐振器材料和结构对性能的影响	51
3.5.1 电极材料和厚度的影响	51
3.5.2 支撑层和残余背硅层的影响	52
参考文献	54
 第4章 压电薄膜的制备方法	55
4.1 真空蒸发淀积	57
4.1.1 真空蒸发淀积特点与蒸发过程	57
4.1.2 蒸发过程的重要参量	58
4.1.3 蒸发源的蒸气发射特性	59
4.1.4 加热源的类型	61
4.1.5 反应蒸发	62
4.1.6 分子束外延	62
4.2 溅射沉积	63
4.2.1 溅射的基本原理	63
4.2.2 溅射产额	65
4.2.3 反应溅射	65
4.2.4 射频溅射	67
4.2.5 磁控溅射	67
4.3 化学气相淀积	68
4.3.1 化学气相淀积的特点	68
4.3.2 化学气相淀积的基本过程和化学反应	68
4.3.3 金属有机气相化学淀积	69
4.3.4 CVD 的装置	70
4.4 脉冲激光沉积技术	71
4.4.1 脉冲激光沉积的原理和特点	71
4.4.2 激光光源	72
4.4.3 沉积系统	73
参考文献	73

第 5 章 AIN 薄膜的溅射沉积和刻蚀	77
5.1 射频磁控溅射制备 AIN 薄膜	79
5.1.1 AIN 薄膜的制备工艺	79
5.1.2 射频功率对薄膜结构的影响	79
5.1.3 气氛压强和比例对薄膜晶体结构的影响	81
5.1.4 衬底温度对薄膜晶体结构的影响	83
5.1.5 AIN 薄膜的微观形貌和成分	83
5.1.6 AIN 薄膜的生长机制	84
5.1.7 溅射 AIN 薄膜的应力	85
5.2 在不同电极上沉积的 AIN 薄膜的结构特性	88
5.3 氟基气体对 AIN 薄膜的反应离子刻蚀	89
5.3.1 AIN 薄膜的干法刻蚀方法	89
5.3.2 刻蚀速率	90
5.3.3 刻蚀图形形貌	92
5.3.4 氟基气体对 AIN 薄膜的刻蚀机理分析	93
5.4 AIN 薄膜的湿法刻蚀	94
5.4.1 实验过程	94
5.4.2 薄膜织构和晶体质量对湿法刻蚀速率的影响	94
5.4.3 刻蚀反应的激活能	96
5.4.4 刻蚀图形形貌	96
参考文献	99
第 6 章 横膈膜型薄膜体声波谐振器	101
6.1 横膈膜型谐振器的结构和测试方法	103
6.1.1 横膈膜型谐振器的结构	103
6.1.2 测试器件的电极形状和测试方法	103
6.2 横膈膜型谐振器的制作过程	104
6.3 PZT 压电薄膜的制备和性质	106
6.3.1 溶胶凝胶法制备 PZT	106
6.3.2 PZT 薄膜的结构和性质	108
6.4 横膈膜型谐振器的工艺过程	109
6.4.1 光刻工艺	109
6.4.2 PZT 膜的刻蚀	111
6.4.3 二氧化硅的刻蚀	111

6.4.4 硅的刻蚀	112
6.5 PZT 横膈膜型谐振器的性能测试	112
6.5.1 谐振器的测试结果	112
6.5.2 器件性能分析	114
参考文献	114
第7章 固体装配型体声波谐振器	115
7.1 固体装配型谐振器的设计	117
7.1.1 固体装配型谐振器的结构	117
7.1.2 固体装配型谐振器的理论模型	118
7.1.3 固体装配型谐振器频率响应的模拟	120
7.2 AlN 固体装配型谐振器的制备	122
7.2.1 布拉格反射层	122
7.2.2 固体装配型谐振器的制备工艺	123
7.2.3 AlN 薄膜的结构和形貌	124
7.2.4 多层薄膜的应力	126
7.3 固体装配型谐振器的性能测试	127
7.3.1 固体装配型谐振器的 S_{11} 参数	127
7.3.2 固体装配型谐振器的阻抗特性	129
7.3.3 固体装配型谐振器的性能参数	130
参考文献	131
第8章 薄膜体声波谐振器在射频滤波器中的应用	133
8.1 薄膜体声波滤波器的基本拓扑结构	135
8.2 梯形拓扑结构的薄膜体声波滤波器	136
8.2.1 薄膜体声波滤波器的工作原理	136
8.2.2 梯形拓扑薄膜体声波滤波器的设计	137
8.2.3 声学耦合的薄膜体声波滤波器	138
8.3 PCS CDMA 接收滤波器的设计实例	139
8.4 基于 FBAR 的双工器与振荡器	141
8.4.1 基于薄膜体声波谐振器的双工器	141
8.4.2 基于薄膜体声波谐振器的振荡器	142
8.4.3 FBAR 的片上集成	142
参考文献	144

第 9 章 基于薄膜体声波谐振器的高灵敏传感器	147
9.1 压电石英晶体微天平传感器	149
9.1.1 石英晶体微天平	149
9.1.2 压电晶体的传感原理	149
9.1.3 压电晶体谐振传感器的测量方法	151
9.2 压电晶体传感器的敏感材料	152
9.2.1 吸附敏感材料的要求与作用机理	152
9.2.2 敏感材料的涂覆方法	153
9.2.3 压电晶体传感器的应用	153
9.3 碳纳米管敏感材料	156
9.3.1 碳纳米管的吸附性能	156
9.3.2 碳纳米管作为吸附层的应用	157
9.4 基于薄膜体声波谐振器的传感器	158
9.4.1 薄膜体声波谐振器的传感原理	158
9.4.2 传感器的 MBVD 电路	161
9.4.3 薄膜体声波谐振器的物质检测	161
9.4.4 基于薄膜体声波谐振器的其他检测	164
9.5 基于碳纳米管敏感材料的 FBAR 传感器	165
9.5.1 碳纳米管敏感层的形成方法	165
9.5.2 FBAR 传感器的实例	165
9.5.3 传感器频率的质量敏感性	166
9.5.4 传感器对碳纳米管层沉积的频率响应	166
9.5.5 传感器对碳纳米管层吸附的频率响应	168
参考文献	168
索引	173

第 1 章 绪论

电子频率控制器件在许多电子应用系统发展中至关重要。例如,随着各种形式的无线通信系统迅速发展,通信系统的一些频率控制组件已经运用集成电路技术实现了微型化,接收机中的低噪声放大器、发射机中的固态功率放大器、用于基带信号解调的合成锁相环电路、混频器和低频数字电路都可以集成到一个芯片中。整个收发机的尺寸主要是由大量分离的无源元件决定(如谐振器、滤波器、耦合器等),而不是由晶体管构成的有源元件决定^[1~5]。目前小带宽信道的大量增加和频段的日益拥挤,使通信系统对高品质和高频率控制器件的需求越来越大。

在电子频率控制器件的诸多种类之中,射频谐振器和由其构成的滤波器占有十分重要的地位。前端滤波器用于保护接收机免受临近频段的干扰,输出滤波器则限制传输噪声的带宽。要使这些通信系统在信道选择时,接收端具有尽可能高的信噪比,在发送端对临近频段产生尽可能少的干扰,就需要使用高性能的谐振器和滤波器^[6]。而这些频率控制无源组件的大尺寸就意味着高功耗和低的信号传输效率,成为无线通信系统实现微型化和系统集成、降低功率和节约成本的瓶颈。另一方面,越来越多的功能模块被要求挤入到原本已不堪拥挤的无线终端中,这迫使在印刷电路板中占据大面积的射频收发机向微型化、集成化方向发展^[6,7]。同时,微型化的电子频率控制器件也应用到了高灵敏传感等新的领域。

1.1 无线通信系统的发展对射频器件的要求

目前无线通信系统中应用的滤波器主要有三种^[4,5,8]:

(1) 以 CMOS 工艺为基础的有源滤波器。这种滤波器速度慢,噪声较大,还不能应用于微波频段,特别是系统前端滤波器。

(2) 介质滤波器。介质滤波器的表面覆盖着切向电场为零的金属层,电磁波被限制在介质内,形成驻波振荡,其几何尺寸约为波导波长的一半。材料一般采用相对介电常数为 60~80 之间的陶瓷材料,实际应用于无线通信中的介质陶瓷滤波器其尺寸约在厘米量级。介质滤波器的主要优点是功率容量大,插入损耗低,但存在两大缺点:第一,体积较大,在厘米量级,与集成电路相比占用了系统很大的体积;第二,介质滤波器一般是分立器件,无法与信号处理电路进行集成,而且由滤波器到信号处理芯片需要经过一条不可忽略的传输线,必须进行阻抗匹配,不但结构复杂而且造成一定的信号衰减。

(3) 表面波(SAW)滤波器。SAW 的基本结构为:在压电基底的表面制作输入和输出叉指电极,输入端施加交变电压,利用压电效应将电能转换成声能,激励起沿压电体表面传播的声表面波;在输出端利用逆压电效应将声能重新转换成电能输出。叉指电极的形状决定着谐振器的谐振频率,谐振频率 $f_0 = v_s / [2(a+b)]$, v_s

为材料声表面波的波速, a 和 b 分别为电极的宽度和间隔。因为相同频率下, 声波的波长比电磁波小 5 个量级左右, 所以与介质滤波器相比, SAW 滤波器的尺寸较小, 封装前一般在几百微米。目前表面波滤波器在 1 GHz 以下已相当成熟, 器件面积也不大, 主要应用于中频滤波。但 SAW 滤波器的频率与线条的宽度有关, 在运用到前端高频滤波时难以处理大功率信号, 且需要采用深亚微米的光刻和制造技术, 带来了很大的工艺复杂性^[1]。

无论是介质滤波器, 还是 SAW 滤波器, 它们共同的不足之处在于其制造工艺与目前成熟的 Si 半导体工艺不兼容, 无法满足射频前端进一步集成化的需要。

1.2 薄膜体声波谐振器的原理和特点

微机电系统(MEMS)促进了微细加工技术的发展, 使得构造新型半导体器件结构成为可能^[8]; 同时对压电和铁电材料的研究使人们能制备出高机电耦合系数、高品质因数的压电薄膜材料。这两者的结合产生了薄膜体声波谐振器(Film Bulk Acoustic Resonator, FBAR)技术^[9,10], 有望解决制作高性能前端射频滤波器的许多问题, 在无线通信系统中显示出了广阔的应用前景。

如图 1.1(a)所示, 薄膜体声波谐振器由压电薄膜夹于上下两层金属电极之间形成三明治状结构, 交变射频电压施加于两电极之间。

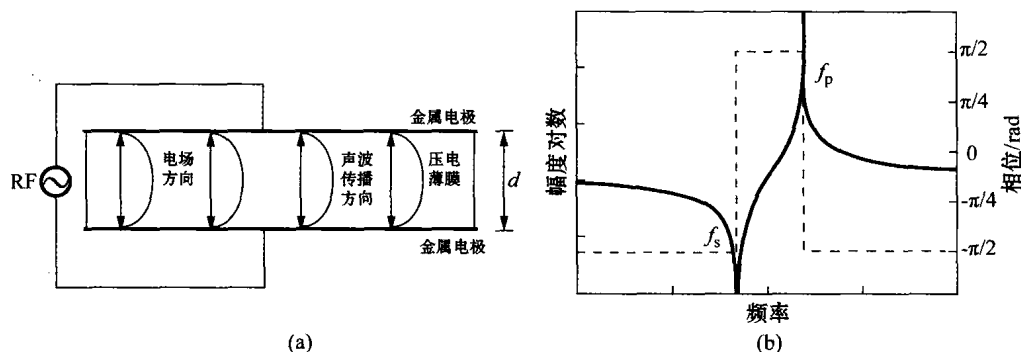


图 1.1 FBAR 的基本原理

(a) 声波的激发示意图; (b) 电学阻抗谐振特性

体声波谐振器的原理^[11,12]可简述为: 利用材料的压电性, 将电能转化为声能, 声波在介质与空气的界面上发生反射, 在两个界面间形成驻波振荡, 此时的声波损耗最小, 并由逆压电效应转化为电能。谐振器只能使特定频率的波通过, 谐振频率:

$$f = \frac{v_l}{2d} \quad (1.1)$$

其中: v_l 为谐振器中传输的纵声波速度, d 为薄膜厚度。

图 1.1(b)给出了典型的 FBAR 电学阻抗特性曲线, 曲线中有两个相隔很近的谐振频率: 串联谐振频率(f_s)和并联谐振频率(f_p)。利用这一阻抗特性, 将若干谐振器级联就可以设计出满足无线通信要求的射频滤波器和双工器^[13]。

与 SAW 类似, FBAR 也是利用压电体的电能与机械能转换, 由交变电场激励起声波谐振, 但与 SAW 基于声表面波所不同的是, FBAR 所激励起的声波为体声波, 其谐振频率取决于压电薄膜厚度, 而非 SAW 的平面叉指电极尺寸, 所以 FBAR 具有 SAW 不可比拟的功率容量和工作频率的优势。在高频应用中, FBAR 不需要 SAW 那样的亚微米级别的叉指电极, 因而 FBAR 的插入损耗要低于 SAW。另外, 由于声波传播的速度比电磁波的速度低 4~5 个数量级, 其波长要短得多, FBAR 也具有介质滤波器无法比拟的体积优势。表 1.1 比较了介质滤波器、SAW 和 FBAR 三种频率器件的优缺点^[14]。

表 1.1 介质滤波器、SAW 和 FBAR 三种频率器件的优缺点^[14]

	介质滤波器	SAW	FBAR
应用领域	双工器	中频、射频滤波器	双工器、射频滤波器
插入损耗	1~5 dB	2.5~4 dB	1~1.5 dB
带外抑制	<40 dB	<45 dB	<50 dB
温度系数	-10~+10 ppm/°C	-35~-95 ppm/°C	-25~-30 ppm/°C
Q 值	300~700	200~400	700~1000
尺寸	大	小	最小
抗静电冲击	优秀	一般	好
集成性	不能	不能	可以

注: ppm 为 10^{-6} (非法定单位)。

FBAR 为射频通信系统在很宽的频率范围内提供了微型化、高性能的谐振器, 成为一种能实现许多更先进的系统架构的可行技术^[15]。日本 Fujitsu 公司提出了 FBAR 的发展路线^[1], 他们认为 FBAR 会取代 SAW 成为第四代通信系统主要的频率器件。

1.3 薄膜体声波谐振器的结构和材料

1.3.1 薄膜体声波谐振器的结构

为了产生声波的谐振, 需将声波限制在如图 1.1(a)所示的由电极-压电薄

膜-电极组成的压电振荡堆中。根据传输线理论,当负载为零或无穷大时,入射波将产生全反射。压电振荡堆的上表面一般都与空气交界,空气的声阻抗近似等于零,能自然形成良好的声波限制边界,下表面因需置于硅等衬底材料之上而需要人为制造声波限制边界^[11]。

一种解决方案是将衬底掏空或引入空气间隙,使压电堆悬空,仍以空气作为反射层。另一种获得零值或无穷大声学阻抗的方法是采用类似于光学工程中所用的布拉格反射层。布拉格反射层由厚度均为四分之一波长的高声学阻抗层和低声学阻抗层交替叠加构成,若从高阻抗层向下看,布拉格反射层的等效负载阻抗为无穷大,而从低阻抗层向下看,布拉格反射层的等效负载阻抗则为零^[16]。

FBAR 的三种构造方式^[1,14,17]如图 1.2 所示。图 1.2(a)为横隔膜型谐振器。采用 MEMS 的体硅工艺从硅片反面刻蚀去除大部分的硅材料,以便在压电振荡堆的下表面形成空气交界面,从而将声波限制于压电振荡堆之内。由于大面积的硅衬底被去除,势必影响器件的机械牢度,并大幅降低成品率。为了改善器件的机械牢度,往往将压电振荡堆置于低应力的支撑层之上,如 Si_3N_4 等。这种结构由于固有的机械牢度问题不太可能实现商业化,目前仅限于实验室研究。

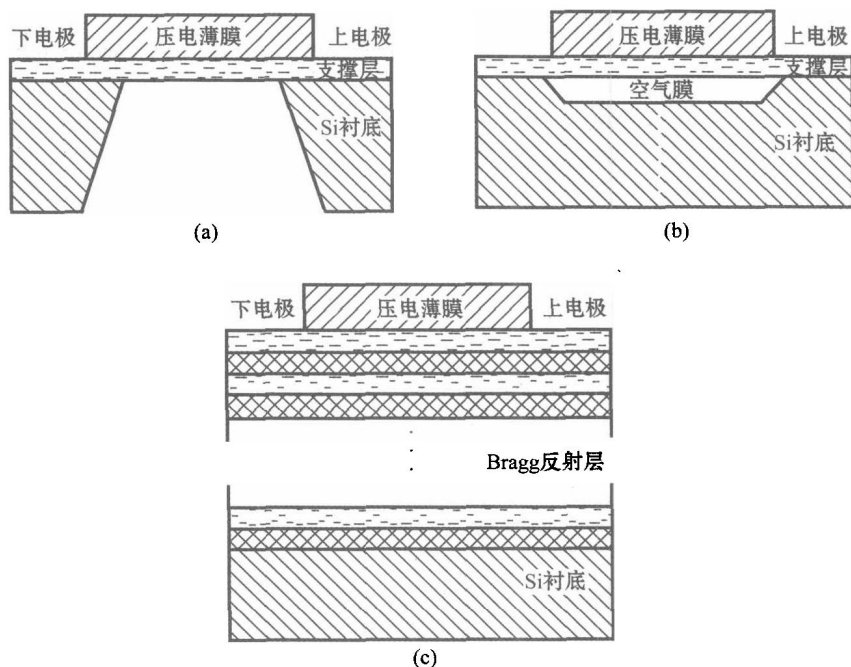


图 1.2 FBAR 的三种结构

(a) 横隔膜型谐振器; (b) 空气隙型谐振器; (c) 固体装配型(SMR)谐振器

图 1.2(b)为空气隙型谐振器。采用 MEMS 的硅表面工艺在硅片的上表面形成一个空气间隙以限制声波于压电振荡堆之内。压电振荡堆底下可以有支撑层,也可以没有支撑层。空气间隙可以采用去除部分硅片表面形成的下沉型,也可以是不去除硅,直接在硅表面之上形成的上凸型。这种结构不但能很好地将声波限制于压电振荡堆之内,获得很高的 Q 值,同时因为采用了硅表面工艺,与硅片背面刻蚀型相比,机械牢度改善很多。

图 1.2(c)为固体装配型(SMR)谐振器。这种器件采用布拉格反射层将声波限制在压电振荡堆之内,布拉格反射层采用高低阻抗交替的声学层。声波在反射层中两种不同阻抗的声学层界面上发生多次反射,形成驻波。与前两类器件相比,SMR 具有的优点有^[18]:

- (1) 器件的制作过程没有体加工或表面加工工艺,工序更加简单,性能更加稳定。
- (2) 器件直接沉积在衬底上,没有悬空结构,提高了谐振器的抗击强度。
- (3) 由于器件的多层薄膜结构,散热性较好,对大功率应用而言,可以明显降低对周围环境的热阻抗。
- (4) 布拉格反射层的选频作用可以有效抑制杂波和多次谐波的产生。

1.3.2 薄膜体声波谐振器的材料

体声波谐振器和滤波器最早采用 CdS 为压电材料,继而是 ZnO 和 PZT,近年来 AlN 成为研究热点。表 1.2 给出了 AlN、ZnO 和 PZT 三种材料的压电性质。

表 1.2 AlN、ZnO 和 PZT 三种材料的压电性质

	AlN	ZnO	PZT
机电耦合系数 $k_t^2/\%$	6.5	7.5	10~20
介电常数 ϵ_r	9.5	9.2	80~400
纵波声速 $v_l/(\text{m/s})$	10 400	6 350	4 000~6 000
1 GHz 衰减/(dB/m)	800	2 500	非常大
CMOS 工艺兼容	可以	不可	不可

从 FBAR 器件的性能出发,有几个材料参数必须考虑^[12]:

(1) 压电耦合系数。压电耦合系数决定了电能与机械能交换的程度,耦合系数太低的压电层将不能用来制作满足谐振要求的器件,从这个指标来看,PZT 最优。

(2) 介电常数。谐振器的阻抗水平由谐振器的尺寸、压电层厚度、介电常数共同决定。有较高的介电常数,则可减少谐振器的尺寸。在这个指标上 AlN 和 ZnO