

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.



[12] 发明专利申请公开说明书

H03H 9/02 (2006.01)

H03H 3/08 (2006.01)

H03H 9/25 (2006.01)

[21] 申请号 200510010409.2

[43] 公开日 2006 年 3 月 22 日

[11] 公开号 CN 1750392A

[22] 申请日 2005.9.30

[21] 申请号 200510010409.2

[71] 申请人 哈尔滨工业大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西大直街 92 号

[72] 发明人 朱嘉琦 韩杰才 韩 潇 程 坤
杨 瑾

[74] 专利代理机构 哈尔滨市松花江专利商标事务所
代理人 王吉东

权利要求书 2 页 说明书 8 页 附图 1 页

[54] 发明名称

薄膜声表面波器件的非晶金刚石增频衬底及其制备方法

[57] 摘要

薄膜声表面波器件的非晶金刚石增频衬底及其制备方法，它涉及一种具有多层结构薄膜声表面波器件的增频衬底及增频方法的领域，它是为了解决在现有的工艺水平下，叉指线条不能无限制的微细化而导致无法提高声波的传播速度，及现有的工艺沉积类金刚石薄膜应力大且无法达到增频效果和金刚石薄膜难以实际应用的问题。本发明的非晶金刚石增频衬底是利用过滤阴极真空电弧沉积系统在抛光单晶硅片上沉积有非晶金刚石薄膜，所述非晶金刚石薄膜的厚度为 50nm ~ 3000nm。本发明方法的步骤是：一、增频设计；二、预处理；三、离子刻蚀；四、薄膜沉积；五、退火处理。本发明能制备出性能稳定的超高频薄膜声表面波器件，且具有沉积面积大、沉积速度快、结合强度高优点。

1、薄膜声表面波器件的非晶金刚石增频衬底，其特征在于它是利用过滤阴极真空电弧沉积系统在抛光单晶硅片上沉积有非晶金刚石薄膜，所述非晶金刚石薄膜的厚度为 50 nm~3000 nm。

2、薄膜声表面波器件的非晶金刚石增频衬底的制备方法，其特征在于它按以下步骤进行：一、增频设计：解析层状结构声表面波传播状态方程，建立膜层参数与声速之间的函数关系，然后根据需要增频的幅度来预测非晶金刚石增频衬底的厚度；二、预处理：用丙酮将单面抛光单晶硅片在超声波清洗机中清洗，然后取出硅片用电风吹干；三、离子刻蚀：将步骤二处理后的硅片装卡于过滤阴极真空电弧系统的衬底卡盘上，并将所述硅片的抛光面面向真空仓刻蚀工作区，然后抽真空，再用考夫曼离子枪刻蚀所述硅片的抛光面，刻蚀后将所述衬底卡盘转至沉积工作区；四、薄膜沉积：在沉积工作区内，施加衬底负偏压在所述硅片的刻蚀表面沉积碳离子，逐渐形成符合步骤一设计厚度的非晶金刚石增频衬底；五、退火处理：在真空条件下，对沉积有非晶金刚石增频衬底的硅片进行低温退火处理，保温后缓冷至室温，然后放气并取出所述沉积有非晶金刚石增频衬底的硅片。

3、根据权利要求 2 所述的薄膜声表面波器件的非晶金刚石增频衬底的制备方法，其特征在于在步骤二中用超声波清洗机清洗的时间为 10~20 min；在步骤五中退火处理温度为 300~350℃，保温时间为 15~60 min。

4、根据权利要求 2 所述的薄膜声表面波器件的非晶金刚石增频衬底的制备方法，其特征在于在步骤四中，每沉积 100~300 s，间歇 5~15 min；在步骤四中衬底负偏压采用直流脉冲的形式，当增频衬底厚度小于 500 nm 时，采用固定 80 V 衬底负偏压或从 3000 V 至 80 V 范围内的任意下降变化的衬底负偏压；当增频衬底厚度大于 500 nm 且小于 3000 nm 时，采用从 3000 V 至 80 V 范围内的任意下降变化的衬底负偏压，脉冲频率为 100~1500 Hz，脉冲宽度为 5~35 μ s，对应的电弧电流为 50~70A。

5、根据权利要求 2 所述的薄膜声表面波器件的非晶金刚石增频衬底的制备方法，其特征在于在步骤三中离子刻蚀的过程是：在本底真空度为 $1.5\sim 2.5\times 10^{-6}$ Torr 时，注入纯度为 99.99%的氩气，使真空度升至 $1.0\sim 4.0\times 10^{-4}$ Torr；所述考夫曼离子枪的工作氩气流量为 8 ml/min、刻蚀氩离子能量为 800~1300eV；用考夫曼离子枪刻蚀的时间为 8~12 min，刻蚀后间歇的时间为 5~15 min。

6、根据权利要求2或4所述的薄膜声表面波器件的非晶金刚石增频衬底的制备方法，其特征在于步骤四薄膜沉积中采用电压为80V、脉冲频率为1500Hz、脉冲宽度为20 μ s的直流脉冲衬底负偏压沉积碳离子，逐渐形成非晶金刚石增频衬底，电弧电流为60A，沉积过程为：(1)先沉积200s，间歇10min；(2)然后沉积150s，间歇10min；(3)最后沉积150s。

7、根据权利要求2或4所述的薄膜声表面波器件的非晶金刚石增频衬底的制备方法，其特征在于步骤四薄膜沉积中采用80V衬底负偏压沉积100s。

8、根据权利要求2或4所述的薄膜声表面波器件的非晶金刚石增频衬底的制备方法，其特征在于步骤四薄膜沉积中采用3000V至80V的呈下降变化的衬底负偏压沉积碳离子，逐渐形成非晶金刚石增频衬底，沉积的过程为：(1)先用3000V的衬底负偏压沉积100s，然后间歇10min；(2)用2700V的衬底负偏压沉积200s，然后间歇10min；(3)用2100V的衬底负偏压沉积300s，间歇15min；(4)用300V的衬底负偏压沉积100s，间歇10min；(5)最后，用80V的衬底负偏压沉积100s。

9、根据权利要求2或4所述的薄膜声表面波器件的非晶金刚石增频衬底的制备方法，其特征在于步骤四薄膜沉积中采用3000V至80V的呈下降变化的衬底负偏压沉积碳离子，逐渐形成非晶金刚石增频衬底，沉积的过程为：(1)先用3000V的衬底负偏压沉积150s后间歇10min，再沉积150s，然后间歇10min；(2)用2700V的衬底负偏压沉积150s后间歇10min，再沉积150s，然后间歇10min；(3)用2400V的衬底负偏压沉积1000s，每沉积200s间歇10min；(4)用480V的衬底负偏压沉积200s后间歇10min；(5)最后，用80V的衬底负偏压沉积100s。

10、根据权利要求2或4所述的薄膜声表面波器件的非晶金刚石增频衬底的制备方法，其特征在于步骤四薄膜沉积中采用3000V至80V的呈下降变化的衬底负偏压沉积碳离子，逐渐形成非晶金刚石增频衬底，沉积的过程为：(1)先用3000V的衬底负偏压沉积200s后间歇10min，再沉积200s，然后间歇10min；(2)用2700V的衬底负偏压沉积200s后间歇10min，再沉积200s，然后间歇10min；(3)用2400V的衬底负偏压沉积1800s，每沉积300s间歇15min；(4)最后，用480V的衬底负偏压沉积300s。

薄膜声表面波器件的非晶金刚石增频衬底及其制备方法

技术领域

本发明涉及一种具有多层结构薄膜声表面波器件的增频衬底及增频方法的领域，特别涉及一种非晶金刚石增频衬底及其制备方法。

背景技术

声表面波（SAW）器件是二十世纪中后期出现的新型电子器件，经过多年发展，已经研制出滤波器、振荡器、放大器、延迟线、卷积器以及存贮器等不同形式的声表面波器件，并广泛应用于广播、电视、通讯、雷达、声纳、传感、无线电遥控及电子对抗等不同领域。声表面波器件的工作原理是：在叉指换能器（IDT）的输入端，利用逆压电效应将输入电信号转换成声信号，然后声信号沿基片表面传播，最终在输出端通过压电效应将声信号再转换成电信号输出。

近年来，随着信息和通讯技术的高速发展，对声表面波器件的要求越来越高，使声表面波器件逐步向高频化、小型化、轻质化方向发展，为了适应这种形式的需要，人们提出了薄膜声表面波器件的概念。在薄膜声表面波器件中，压电薄膜和非压电衬底形成多层结构，声表面波传播特性由压电薄膜和衬底共同决定。即使采用相同厚度的同种压电薄膜材料，由于衬底材料的不同，声表面波的传播速度也会明显不同。一般来说，声表面波器件的频率正比于材料的声传播速度，反比于叉指换能器的周期。在工艺水平一定的前提下，叉指线条不能无限制的微细化，否则将导致器件承受功率能力急剧下降，而且制作工艺难度太大。因此，提高器件工作频率，增强功率承受能力的唯一途径就是提高声波的传播速度。采用新型增频衬底就是制备高频薄膜声表面波器件的最有效方法之一。

金刚石的弹性模量最大，对弹性波的传播速度也最快，是薄膜声表面波器件最理想的增频衬底材料。但是 CVD 法沉积的多晶金刚石薄膜制备温度高（界面温度一般在 800℃ 以上）、先驱体分解后对衬底腐蚀性强，另外现有技术条件难以制备大面积厚度均匀的金金刚石薄膜（目前多晶金刚石薄膜的最大尺寸不超过 $\Phi 4''$ ），而且粗糙表面难以磨削抛光，所以金刚石薄膜难以实际应用。另外，

如非晶碳 (a-C), 氢化非晶碳 (a-C:H) 等一般的类金刚石薄膜, 其硬度和弹性模量低, 增频效果不明显, 而且热稳定性较差。只有非晶金刚石 (a-D, sp^3 杂化含量超过 50% 以上的无氢类金刚石碳) 的性质更接近金刚石晶体, 而且可以在室温下大面积制备, 并具有光滑的表面, 能够满足薄膜声表面波器件增频衬底的需要。但是采用一般工艺沉积的非晶金刚石薄膜应力大, 难以制备大厚度增频衬底, 如果采用掺杂 (如掺 N) 降低应力, 同时也降低了 sp^3 杂化的含量, 限制了增频作用的发挥。

发明内容

本发明的目的是为了解决在现有的工艺水平下, 叉指线条不能无限制的微细化而导致无法提高声波的传播速度, 及现有的工艺沉积类金刚石薄膜应力大且无法达到增频效果和金刚石薄膜难以实际应用的问题, 从而提供了一种薄膜声表面波器件的非晶金刚石增频衬底及其制备方法, 它采用 IDT/ZnO/a-D//Si 这种薄膜复合结构来代替传统的声表面波器件结构 (即, IDT/体压电材料), 并采用过滤阴极真空电弧系统沉积非晶金刚石 (a-D) 薄膜来代替 CVD 法沉积的多晶金刚石薄膜和磁控溅射等方法沉积的非晶碳 (a-C) 或氢化非晶碳 (a-C:H) 薄膜。

本发明的薄膜声表面波器件的非晶金刚石增频衬底是利用过滤阴极真空电弧沉积系统在抛光单晶硅片上沉积有非晶金刚石薄膜, 所述非晶金刚石薄膜的厚度为 50 nm~3000 nm (纳米)。

本发明的薄膜声表面波器件的非晶金刚石增频衬底的制备方法按以下步骤进行: 一、增频设计: 解析层状结构声表面波传播状态方程, 建立膜层参数 (如膜厚) 与声速之间的函数关系, 然后根据需要增频的幅度来预测非晶金刚石增频衬底的厚度; 二、预处理: 用丙酮将单面抛光单晶硅片在超声波清洗机中清洗, 然后取出硅片用电风吹干; 三、离子刻蚀: 将步骤二处理后的硅片装卡于过滤阴极真空电弧系统的衬底卡盘上, 并将所述硅片的抛光面面向真空仓刻蚀工作区, 然后抽真空, 再用考夫曼离子枪刻蚀所述硅片的抛光面, 刻蚀后将所述衬底卡盘转至沉积工作区; 四、薄膜沉积: 在沉积工作区内, 施加衬底负偏压在所述硅片的刻蚀表面沉积碳离子, 逐渐形成符合步骤一设计厚度的非晶金刚石增频衬底; 五、退火处理: 在真空条件下, 对沉积有非晶金刚石增频衬底的硅片进行低温退火处理, 保温后缓冷至室温, 然后放气并取出所述沉

积有非晶金刚石增频衬底的硅片。

在步骤二中用超声波清洗机清洗的时间为 10~20min(分)。在步骤三中离子刻蚀的过程是：在本底真空度为 $1.5\sim 2.5\times 10^{-6}$ Torr 时，注入纯度为 99.99% 的氩气，使真空度升至 $1.0\sim 4.0\times 10^{-4}$ Torr (1 Torr 是 1 个大气压的 1/760)；所述考夫曼离子枪的工作氩气流量为 8 ml/min (毫升每分)、刻蚀氩离子能量为 800~1300 eV (电子伏)；用考夫曼离子枪刻蚀的时间为 8~12 min，刻蚀后间歇的时间为 5~15 min。在步骤四中，每沉积 100~300 s(秒)，间歇 5~15 min。在步骤四中衬底负偏压采用直流脉冲的形式，当增频衬底厚度小于 500 nm 时，采用固定 80 V (伏) 衬底负偏压或从 3000 V 至 80 V 范围内的任意下降变化的衬底负偏压；当增频衬底厚度大于 500 nm 且小于 3000 nm 时，采用从 3000V 至 80 V 范围内的任意下降变化的衬底负偏压，脉冲频率为 100~1500 Hz (赫兹)，脉冲宽度为 5~35 μ s (微秒)，对应的电弧电流为 50~70A (安)。在步骤五中退火处理温度为 300~350℃，保温时间为 15~60 min。

非晶金刚石 (a-D) 具有极高的硬度、弹性模量以及光滑的表面，而且能够在室温下进行大面积沉积，所以更适于声表面波器件增频的需要；与其他类金刚石相比，非晶金刚石是指 sp^3 杂化的含量超过 50% 以上的无氢类金刚石碳，是上个世纪九十年代一种新兴的功能薄膜材料，它还具有更好的光热稳定性和更高的力学、光学和电学等性能指标。如图 1 所示，在压电薄膜 ZnO 和单晶硅基片之间沉积有 350 nm 厚的非晶金刚石薄膜时，对薄膜声表面波器件起到了明显的增频作用。可见本发明的非晶金刚石增频衬底能够有助于具有多层结构薄膜声表面波器件在现有光刻条件下实现高频化，从而制备出性能稳定的超高频薄膜声表面波器件，以满足不同领域的应用需要。本发明的制备方法与质量筛选离子束、离子束辅助沉积以及脉冲激光熔敷等沉积方法相比，采用过滤阴极真空电弧系统沉积非晶金刚石薄膜，具有沉积面积大、沉积速度快、结合强度高、沉积温度低、表面纯净等一系列优点，而且工艺简单、易操作。

附图说明

图 1 为传统结构 IDT/ZnO//Si 和本发明制备了非晶金刚石增频衬底的 IDT/ZnO/a-D//Si 的薄膜声表面波滤波器的频率响应特征及增频效果条形框图；图 2 为薄膜声表面波器件 ($KH_{ZnO}=1$, H_{ZnO} 为氧化锌薄膜的厚度) 以一次谐波和基波工作时计算的 KH_{a-D} 随相速度的变化关系示意图，其中 $K=2\pi/\lambda$ ，为波

数， H_{a-D} 为非晶金刚石增频衬底的厚度。

具体实施方式

具体实施方式一：本具体实施方式的薄膜声表面波器件的非晶金刚石增频衬底是利用过滤阴极真空电弧沉积系统在抛光单晶硅片上沉积有非晶金刚石薄膜，所述非晶金刚石薄膜的厚度为 50 nm~3000 nm。本发明制备的非晶金刚石增频衬底的厚度根据增频设计的要求和沉积工艺的实际条件进行确定。

具体实施方式二：本具体实施方式的薄膜声表面波器件的非晶金刚石增频衬底的制备方法按以下步骤进行：一、增频设计：解析层状结构声表面波传播状态方程，建立膜层参数（如膜厚）与声速之间的函数关系，然后根据需要增频的幅度来预测非晶金刚石增频衬底的厚度；二、预处理：用丙酮将单面抛光单晶硅片在超声波清洗机中清洗，然后取出硅片用电风吹干；三、离子刻蚀：将步骤二处理后的硅片装卡于过滤阴极真空电弧系统的衬底卡盘上，并将所述硅片的抛光面面向真空仓刻蚀工作区，然后抽真空，再用考夫曼离子枪刻蚀所述硅片的抛光面，刻蚀后将所述衬底卡盘转至沉积工作区；四、薄膜沉积：在沉积工作区内，施加衬底负偏压在所述硅片的刻蚀表面沉积碳离子，逐渐形成符合步骤一设计厚度的非晶金刚石增频衬底；五、退火处理：在真空条件下，对沉积有非晶金刚石增频衬底的硅片进行低温退火处理，保温后缓冷至室温，然后放气并取出所述沉积有非晶金刚石增频衬底的硅片。

在步骤二中用超声波清洗机清洗的时间为 10~20 min。在步骤三中离子刻蚀的过程是：在本底真空度为 $1.5\sim 2.5\times 10^{-6}$ Torr 时，注入纯度为 99.99% 的氩气，使真空度升至 $1.0\sim 4.0\times 10^{-4}$ Torr；所述考夫曼离子枪的工作氩气流量为 8ml/min、刻蚀氩离子能量为 800~1300 eV；用考夫曼离子枪刻蚀的时间为 8~12 min，刻蚀后间歇的时间为 5~15 min。在步骤四中，每沉积 100~300 s，间歇 5~15 min。在步骤四中衬底负偏压采用直流脉冲的形式，当增频衬底厚度小于 500 nm 时，采用固定 80 V 衬底负偏压或从 3000 V 至 80 V 范围内的任意下降变化的衬底负偏压；当增频衬底厚度大于 500 nm 且小于 3000 nm 时，采用从 3000 V 至 80 V 范围内的任意下降变化的衬底负偏压，脉冲频率为 100~1500 Hz，脉冲宽度为 5~35 μ s，对应的电弧电流为 50~70A。在步骤五中退火处理温度为 300~350℃，保温时间为 15~60 min。

步骤一对本发明的薄膜沉积过程起指导作用，它的量化设计有利于使产生

的非晶金刚石薄膜更好地发挥增频作用；而步骤五低温退火，有利于将低应力，增强结合。步骤一具体的设计原理是：根据三层薄膜（ZnO/a-D//Si）介质中声表面波传播状态方程，对单晶硅基片而言，声表面波传播状态方程如以下(1)和(2)式所示：

$$U_i^{Si} = \sum_{n=1}^3 C_n^{Si} \alpha_i^{Si(n)} \exp\{j[\omega t - \beta(l_1 x_1 + l_2 x_2 + l_3^{(n)} x_3)]\} \quad (1)$$

$$\Phi^{Si} = \sum_{n=1}^3 C_n^{Si} \alpha_4^{Si(n)} \exp\{j[\omega t - \beta(l_1 x_1 + l_2 x_2 + l_3^{(n)} x_3)]\} \quad (2)$$

其中 U 为电势， Φ 为位移， C 为弹性刚度常数， ω 为角频率， β 为波数， α 为波的振幅， $l_{1,2,3}$ 为波传播的方向余弦，其他参量均为通常含义。

对非晶金刚石增频衬底而言，声表面波传播状态方程如以下(3)和(4)式所示：

$$U_i^{a-D} = \sum_{n=1}^6 C_n^{a-D} \alpha_i^{a-D(n)} \exp\{j[\omega t - \beta(l_1 x_1 + l_2 x_2 + l_3^{(n)} x_3)]\} \quad (3)$$

$$\Phi^{a-D} = \sum_{n=1}^6 C_n^{a-D} \alpha_4^{a-D(n)} \exp\{j[\omega t - \beta(l_1 x_1 + l_2 x_2 + l_3^{(n)} x_3)]\} \quad (4)$$

对 ZnO 等压电薄膜而言，声表面波传播状态方程如以下(5)和(6)式所示：

$$U_i^{ZnO} = \sum_{n=1}^5 C_n^{ZnO} \alpha_i^{ZnO(n)} \exp\{j[\omega t - \beta(l_1 x_1 + l_2 x_2 + l_3^{(n)} x_3)]\} \quad (5)$$

$$\Phi^{ZnO} = \sum_{n=1}^5 C_n^{ZnO} \alpha_4^{ZnO(n)} \exp\{j[\omega t - \beta(l_1 x_1 + l_2 x_2 + l_3^{(n)} x_3)]\} \quad (6)$$

根据上述三层结构的机械和电学边界条件，代入弹性常数、压电常数、介电常数等材料常数，解析方程，从而获得声表面波传播速度与膜层参数（如膜厚）的关系（如图 2 所示）。IDT 的中心频率由等式 $f_0 = v_s / \lambda_0$ 确定，其中， f_0 、 v_s 、 λ_0 分别代表中心频率、相速度和波长，波长 λ_0 是由 IDT 的指宽与间隔所决定的， $\lambda_0 = 2(a+b)$ ， a 、 b 分别为叉指和间隔的宽度。先假设波长 λ_0 的值并保持波长不变，再假设 ZnO 薄膜的厚度，然后根据附图 2 和一次谐波或基波工作时声表面波器件的增频幅度预测非晶金刚石增频衬底的最优厚度。

具体实施方式三：本具体实施方式与具体实施方式二的不同点在于步骤二中在超声波清洗机中清洗的时间为 15min。其他步骤与具体实施方式二相同。

具体实施方式四：本具体实施方式与具体实施方式二的不同点在于步骤三中离子刻蚀的过程是：在本底真空度为 2.0×10^{-6} Torr 时，注入纯度为 99.99% 的氩气，使真空度升至 2.0×10^{-4} Torr；所述考夫曼离子枪的工作氩气流量为 8ml/min、刻蚀氩离子能量为 1100 eV；用考夫曼离子枪刻蚀的时间为 10 min，刻蚀后间歇的时间为 10 min。其他步骤与具体实施方式二相同。

具体实施方式五：本具体实施方式与具体实施方式二的不同点在于步骤四薄膜沉积中采用电压为 80 V、脉冲频率为 1500 Hz、脉冲宽度为 $20 \mu s$ 的直流脉冲衬底负偏压沉积碳离子，逐渐形成非晶金刚石增频衬底，电弧电流为 60 A，沉积过程为：（1）先沉积 200 s，间歇 10 min；（2）然后沉积 150 s，间歇 10 min；（3）最后沉积 150 s。其他步骤与具体实施方式二相同。采用本具体实施方式制备的非晶金刚石增频衬底的厚度为 350 nm，IDT/ZnO/a-D//Si 薄膜声表面波器件的频率为 617.51 MHz，没有增频衬底的 IDT/ZnO//Si 薄膜声表面器件的频率为 574.00 MHz，约增频 8%（如图 1 所示）。本具体实施方式的增频设计中，先假设波长 $\lambda_0 = 4 \mu m$ ，且保持波长不变，再设 $KH_{ZnO} = 1$ ，若一次谐波工作的声表面波器件增频 8%，那么相速度也应提高 8%，然后根据附图 2 预测得到非晶金刚石增频衬底的厚度约为 300 nm，这与实际值比较接近。

本具体实施方式中参数取值的原理是：采用本发明所用的过滤阴极真空电弧系统沉积具有最高 sp^3 杂化含量非晶金刚石薄膜的衬底负偏压为 80 V， sp^3 杂化含量越高，薄膜的弹性模量就越高，对声表面波的增频作用就越显著。随着偏压升高或降低， sp^3 杂化含量都将减少。另外，非晶金刚石薄膜的沉积速率约为 0.7 nm/s，忽略偏压对沉积速率的影响，根据沉积时间可以估算薄膜的厚度；沉积速率由离子束的扫描波形确定，扫描波形基本不变，那么沉积速率就基本不变。

具体实施方式六：本具体实施方式与具体实施方式二的不同点在于步骤四薄膜沉积中采用 80 V 衬底负偏压沉积 100 s，形成非晶金刚石增频衬底为 70nm，IDT/ZnO/a-D//Si 薄膜声表面波器件的频率为 596.00 MHz。本具体实施方式中的衬底负偏压也采用直流脉冲形式，脉冲频率为 1500Hz，脉冲宽度为 $20 \mu s$ ，对应的电弧电流为 60A。其他步骤与具体实施方式二相同。由本实施方式可见，即使非晶金刚石薄膜很薄也能起到很好的增频效果，但是过薄不利于均匀成膜。

具体实施方式七：本具体实施方式与具体实施方式二的不同点在于步骤四薄膜沉积中采用 3000 V 至 80 V 的呈下降变化的衬底负偏压沉积碳离子，逐渐形成非晶金刚石增频衬底，沉积的过程为：（1）先用 3000 V 的衬底负偏压沉积 100 s，然后间歇 10 min；（2）用 2700 V 的衬底负偏压沉积 200 s，然后间歇 10 min；（3）用 2100 V 的衬底负偏压沉积 300 s，间歇 15 min；（4）用 300 V 的衬底负偏压沉积 100 s，间歇 10 min；（5）最后，用 80 V 的衬底负偏压沉积 100 s。本具体实施方式中的衬底负偏压也采用直流脉冲形式，脉冲频率为 1500Hz，脉冲宽度为 20 μ s，对应的电弧电流为 60A。其他步骤与具体实施方式二相同。采用本具体实施方式制备的非晶金刚石增频衬底厚度为 550 nm，IDT/ZnO/a-D//Si 薄膜声表面波器件的频率为 605.06 MHz。由本实施方式可见，虽然非晶金刚石增频衬底较厚，但是最高 sp^3 杂化含量的非晶金刚石膜层厚度低于具体实施方式五，所以增频作用弱于实施方式五，可见 sp^3 杂化含量对增频作用有显著的影响。采用下降变化的能量梯度来沉积薄膜，有利于降低应力，增强结合。

本具体实施方式中参数取值的原理是：以根据浅注入生长机制解释薄膜的生长过程，具有一定入射能量的碳离子突破衬底表面原子的束缚，植入亚表层，随着碳离子的持续注入，形成极高的压应力场，具备了 sp^3 杂化产生的条件，表现为浅注入生长，从而在室温下获得性能与金刚石十分接近的非晶金刚石薄膜，并保留了光滑的表面和极高的内应力。研究表明，在富 sp^3 杂化入射碳离子能量条件下制备的非晶金刚石薄膜残余压应力可达 10 GPa（吉帕）以上，能量增加或降低，残余应力都有所减少，并且富 sp^3 杂化入射碳离子能量条件是在衬底负偏压为 80 V 时获得的。如果碳离子的入射能量较低，将不足以突破表面原子的束缚，表现为表面生长，与衬底的结合力差。如果碳离子的能量较高，多余的能量将促使压应力场松弛，同时注入衬底形成碳原子的梯度层，与衬底的结合力强。因此，采用能量梯度法沉积非晶金刚石增频衬底，有助于降低应力，增强结合，并保持良好的增频作用。

具体实施方式八：本具体实施方式与具体实施方式二的不同点在于步骤四薄膜沉积中采用 3000 V 至 80 V 的呈下降变化的衬底负偏压沉积碳离子，逐渐形成非晶金刚石增频衬底，沉积的过程为：（1）先用 3000 V 的衬底负偏压沉积 150 s 后间歇 10 min，再沉积 150 s，然后间歇 10 min；（2）用 2700 V 的衬

底负偏压沉积 150 s 后间歇 10 min, 再沉积 150 s, 然后间歇 10 min; (3) 用 2400 V 的衬底负偏压沉积 1000 s, 每沉积 200 s 间歇 10 min; (4) 用 480 V 的衬底负偏压沉积 200 s 后间歇 10 min; (5) 最后, 用 80 V 的衬底负偏压沉积 100s。本具体实施方式中的衬底负偏压也采用直流脉冲形式, 脉冲频率为 1500Hz, 脉冲宽度为 20 μ s, 对应的电弧电流为 60 A。其他步骤与具体实施方式二相同。采用本具体实施方式制备的非晶金刚石增频衬底厚度为 1330 nm。

具体实施方式九: 本具体实施方式与具体实施方式二的不同点在于步骤四薄膜沉积中采用 3000 V 至 80 V 的呈下降变化的衬底负偏压沉积碳离子, 逐渐形成非晶金刚石增频衬底, 沉积的过程为: (1) 先用 3000 V 的衬底负偏压沉积 200 s 后间歇 10 min, 再沉积 200 s, 然后间歇 10 min; (2) 用 2700 V 的衬底负偏压沉积 200 s 后间歇 10 min, 再沉积 200 s, 然后间歇 10 min; (3) 用 2400 V 的衬底负偏压沉积 1800 s, 每沉积 300 s 间歇 15 min; (4) 最后, 用 480V 的衬底负偏压沉积 300 s。本具体实施方式中的衬底负偏压采用直流脉冲形式, 脉冲频率为 1500 Hz, 脉冲宽度为 20 μ s, 对应的电弧电流为 60 A。其他步骤与具体实施方式二相同。采用本具体实施方式制备的非晶金刚石增频衬底厚度为 2000 nm。

具体实施方式十: 本具体实施方式与具体实施方式二的不同点在于步骤四退火处理的温度为 300 $^{\circ}$ C, 保温时间为 30 min。其他步骤与具体实施方式二相同。本实施方式的原理是退火保温有助于非晶金刚石膜与单晶硅基片界面之间充分扩散, 减少缺陷, 降低应力, 并形成良好结合。但是退火温度过高, 将导致非晶金刚石膜层结构的失稳。

凡是薄膜声表面波器件用的非晶金刚石增频衬底的制备方法中所提到的参数取值在上述所提到的范围内的非晶金刚石增频衬底的制备过程均在本发明的保护范围内。

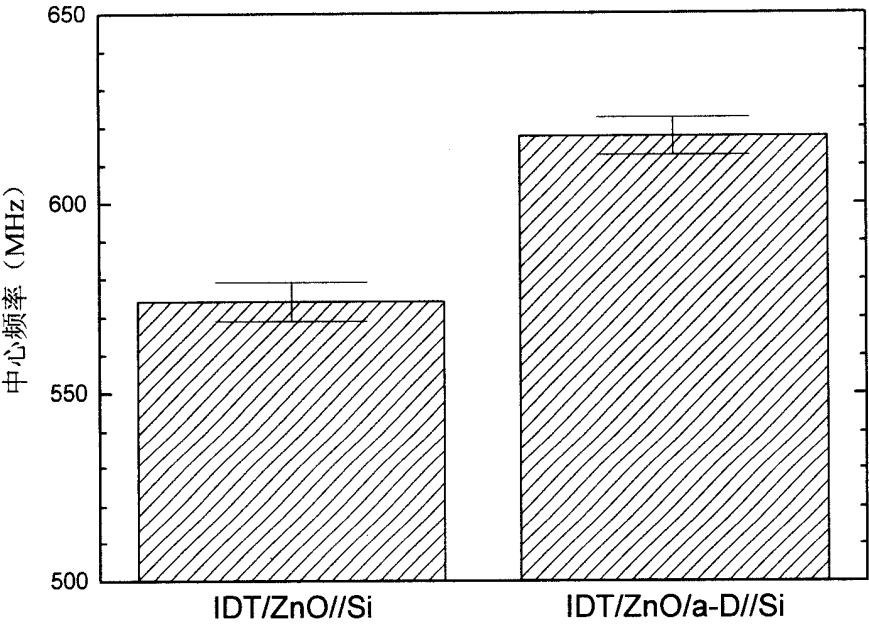


图 1

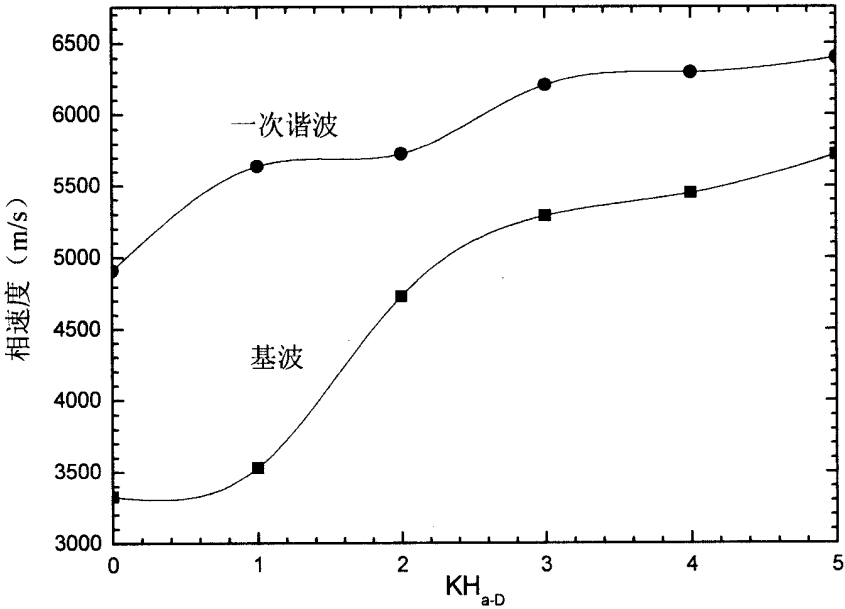


图 2