

## Об использовании нанотехнологий в производстве изделий пьезотехники

Павел МИЛЕНИН  
niitp@bk.ru

**Будущие успехи теории и производства изделий пьезоэлектроники в значительной мере определяются возможностью адаптации современных достижений в создании нанотехнологий. Это единственный путь многократного уменьшения размеров и веса пьезоэлектрических устройств и компонентов, снижения их себестоимости, совершенствования параметров и эксплуатационных характеристик.**

Достижения последних лет в области наноэлектроники позволили не только сократить размеры и вес вновь разработанных компонентов и комплексов, но и значительно повысить их надежность, устойчивость к внешним воздействиям, увеличить объемы и рентабельность производства.

Развитие нанотехнологий носит межотраслевой характер и является основным инструментом многих достижений электронной промышленности, в том числе пьезоэлектроники.

Обмен информацией о достижениях и перспективных направлениях развития нанотехники, наноматериалов, наноэлектроники, нанометрологии чрезвычайно важен, так как обеспечивает сбалансированное развитие исследований и производства.

В производстве изделий пьезотехники (рис. 1–3) (резонаторы, микрогенераторы, фильтры и генераторы на объемных акустических волнах, датчики различных физических воздействий и химических процессов и т. д.) использование нанотехнологий, по прогнозам специалистов, позволит не только мно-

гократно уменьшить габариты и вес приборов, но и значительно улучшить их основные параметры и стойкость к внешним воздействиям.

При этом за счет использования современного nanoоборудования, разработанного и выпускаемого в России, сократится время технологических циклов, повысится качество и надежность изделий пьезотехники, повысится их конкурентоспособность, увеличится объем выпускаемой продукции, в том числе для нужд оборонной техники, телевидения, связи, приборов автомобильной и медицинской электроники, измерительной техники, криптографии, средств вычислительной техники, приборов контроля экологического назначения и для многих других областей.

Наноматериалы и нанотехнологии в ближайшие годы будут широко использоваться в производстве многих видов изделий пьезотехники. Особо востребованы уже сегодня наноматериалы и нанотехнологии в технологических процессах выращивания высокочистых модификаций пьезоэлектрических монокристаллов кварца, лангасита,

лангата, танталата лития, ниобата лития и др. (рис. 4–6).

Высокая добротность, низкая концентрация примесей, механическая прочность, отсутствие включений и другие важные физические и химические свойства обеспечиваются современными способами подготовки высокочистой шихты, прецизионных режимов выращивания кристаллов и приготовления ростовых растворов. Повышение требований к режимам, оборудованию, химической чистоте используемых материалов серьезно удорожает получаемые монокристаллы. Однако их высокое качество с лихвой компенсирует эти затраты: изготовленные из этих высокочистых материалов пьезоэлектрические устройства обладают значительно более высокой конкурентоспособностью по соотношению цена/качество.

Нанотехнологии создания и обработки кристаллических деталей для микроминиатюрных изделий пьезоэлектроники на объемных акустических волнах (ОАВ) разрабатываются и совершенствуются на базе созданных отечественных образцов электронного оборудования.



Рис. 1. Резонаторы для объемного монтажа

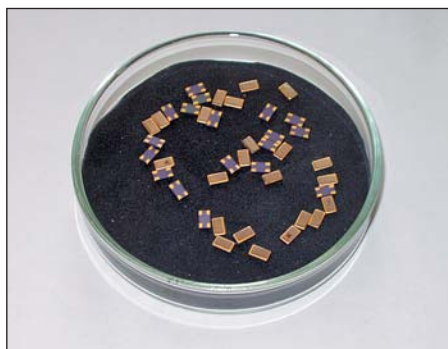


Рис. 2. Резонаторы для поверхностного монтажа



Рис. 3. Резонаторы для объемного монтажа без кожууха



Рис. 4. Кристаллы кварца, выращенные гидротермальным методом



Рис. 5. Кристалл лангасита, выращенный методом Чохральского



Рис. 6. Кристалл танталата лития, выращенный методом Чохральского

Перспективным направлением применения нанотехнологий в пьезотехнике следует считать технологию лазерной обработки контура кристаллических элементов. Особо это касается низкочастотных резонаторов, работающих, например, на продольной моде колебаний. В этом случае резонансная частота колебательной системы определяется геометрическими размерами кристаллической пластины. Используемые в настоящее время методы формирования контура пластин путем его шлифовки позволяют изготавливать пластины с точностью порядка  $\pm 20$  мкм. Лазерный метод обработки контура позволит существенно повысить точностью изготовления кристаллических элементов и, следовательно, снизит трудоемкость операции настройки резонаторов.

Также следует отметить, что лазерный метод обработки контура дает возможность создавать изделия сложной геометрической формы, что открывает перспективы в разработке новых конструкций пьезоэлектрических изделий.

Для достижения требуемой точности геометрических размеров элемента необходимо обеспечить незначительную ширину реза и минимальную зону разрушения в результате термического воздействия. Наиболее адекватным для этих целей является режим прямой абляционной лазерной резки. В этом режиме вынос материала из зоны реза осуществляется в результате лазерной абляции поверхности обрабатываемого материала под влиянием излучения лазера.

При изготовлении кристаллических элементов в форме обратной меза-структуры (ОМС) на частоту 300 МГц (основная частота) их толщина формируется с точностью не хуже 100 нм, а толщина напыляемых серебряных электродов ( $\sim 1000$  нм) — с точностью не хуже  $\pm 1$  нм. Обеспечивается такая точность при использовании установок ионно-плазменного травления и магнитронного напыления.

Формирование кристаллического элемента проводится с применением нанополіровки (ионно-плазменная либо жидкостная химполіровка).

Формирование электродов проводится путем нанесения эпитаксиальных структур на кристаллические элементы. Для оценки влияния технологий нанесения электродных покрытий на кристаллические элементы следует тщательно изучать взаимодействие наночастиц, образующих кластеры. Существуют различные типы этих взаимодействий: массообмен, спекание, электростатические, магнитные и др. Эти процессы оказывают влияние на стабильность частоты пьезоэлектрического устройства (резонатора, генератора, фильтра, сенсора и т. д.), вызывая ее изменение во времени. Для исключения этого эффекта необходимо проводить искусственное старение (стабилизацию частоты) путем подбора режимов теплового воздействия на устройство.

Высокая плотность и проводимость металлической пленки достигается при скоростях ее напыления более  $500 \text{ \AA}$  в минуту. Отмечено, что при малых значениях времени формирования электродных покрытий частицы металла располагаются на подложке равномерно. При использовании широко применяемого в нанотехнологиях метода лазерного электродиспергирования (ЛЭД) частицы металла также образуют равномерный слой. Проводимость пленки металла зависит от плотности упаковки наночастиц и их размеров.

Пьезотехника, будучи частью электронной промышленности, имеет совпадающие с ней периоды технологического развития и рево-

люционных преобразований в конструкциях и параметрах изделий, а также используемых для этого новых технологиях и оборудовании. Применяемое до настоящего времени в электронной промышленности оборудование и технологии формирования элементов микронных и субмикронных размеров позволило в 1970–80-е годы многократно уменьшить габаритные размеры пьезоэлектрических резонаторов, генераторов, фильтров, датчиков и поднять воспроизводимость их параметров и характеристик.

Новым этапом в развитии микроэлектроники (1990-е годы) стало внедрение нанотехнологий и организация производства изделий нанoeлектроники. Эти достижения востребованы и для совершенствования изделий пьезотехники.

Применяемое в нанотехнологиях оборудование позволяет значительно увеличить локальность и сложность воздействий, при этом происходит переход (на отдельных операциях) от групповых методов обработки кристаллических элементов, пьезоэлементов, блоков резонаторов к индивидуальным.

Использование нанотехнологий предусматривает значительное повышение требований к конструктивным и технологическим материалам и веществам, применяемым при производстве пьезоэлектрических изделий.

Основными задачами исследователей и разработчиков пьезоэлектронных устройств с использованием ОАВ продолжают оставаться:

- миниатюризация;
- повышение стабильности частоты (долговременной, температурной, кратковременной);
- повышение устойчивости частоты и основных параметров к внешним радиационным, механическим и климатическим воздействиям;
- повышение быстродействия (снижение времени выхода на заданный режим), уменьшение энергопотребления и т. д.

Уменьшение размеров пьезоэлектрических резонаторов, генераторов, фильтров, чувствительных элементов датчиков различного назначения и одновременное решение перечисленных задач вызывает появление значительных качественных изменений не только конструктивного характера, но и коренного изменения требований к используемым материалам и технологическим процессам, связанного с появлением физических явлений, не учитывающихся в традиционных технологиях формообразования кристаллического элемента и пьезоэлемента, которые являются основой любого пьезоэлектрического устройства.

Для достижения высокой температурной и долговременной стабильности частоты необходимо использовать синтетический кварц, соответствующий самым высоким требованиям международного стандарта: добротность  $Q_r$  должна быть менее  $(3-3,8) \times 10^6$ . В рабочей

(подэлектродной) зоне кристаллического элемента должны отсутствовать включения и дислокации (каналы травления), границы зон роста и другие дефекты [1].

Вторым важнейшим требованием, обеспечивающим получение высокой добротности кварцевого резонатора и низкого уровня шумов генератора, является высококачественная обработка поверхности кристаллического элемента, которая должна быть максимально гладкой (геометрически гладкая, атомно-гладкая в идеале). Для получения гладких оптических поверхностей в нанотехнологиях используются методы ионного сглаживания, электрохимическая полировка. Наилучшие результаты по качеству полировки кварцевых высокочастотных элементов были получены при использовании вакуумной трибоэлектрической полировки. Полученная гладкость поверхности кварцевых кристаллических элементов была на уровне нескольких десятков нанометров. Для обеспечения высокой стабильности частоты за длительный период времени, высокой добротности, низкого уровня шумов, динамического сопротивления и других параметров и характеристик СВЧ-резонаторов применяется специальная очистка поверхности кристаллического элемента после механической и химической обработки. Выполнение всех перечисленных операций должно обеспечить высокие требования (на нанометрическом уровне) по минимизации клинообразности кристаллического эле-

мента, то есть плоскопараллельность его основных граней [2].

При исследовании причин изменения частоты высокостабильных кварцевых резонаторов было обнаружено явление [3] холодной эмиссии атомов серебра, даже при +23 °С, сопровождающееся повышением частоты резонатора (явление акустической эмиссии Ag). Установление этого факта маскопереноса позволило разработать рекомендации по токовому режимам эксплуатации резонаторов.

Использование на ОАО «Пьезо» описанных технологий способствует выполнению НИР и ОКР, направленных на обеспечение эксплуатации ряда перспективных приборов и оборудования, применяемых при создании новейших систем военного и гражданского назначения. ■

### Литература

1. Международный стандарт IEC 758-2004. Синтетические кварцевые кристаллы.
2. Aseev P. I., Grouzinenko V. B. Influence of surface catalytic reactions on crystal unit ageing. 45 AFCS, 1991, USA.
3. Aseev P. I., Grouzinenko V. B. Investigation of electrode — quartz interface. 46 AFCS, 1992, USA.
4. Коновалов Н. И., Пашков С. С., Новоселов В. П. Возобновление производства однородного пьезокварца / Сб-к трудов научно-техн. конф. «Пьезо-2008», г. Москва, 2008.