

Разработка унифицированного ряда тонкопленочных пьезоэлектрических СВЧ резонаторов на объемных акустических волнах в диапазоне частот 3-12 ГГц

Представлены результаты разработки пьезоэлектрических СВЧ резонаторов на объемных акустических волнах

Ключевые слова: резонатор, отражатель Брэгга, объемная акустическая волна

В настоящее время большое внимание во всем мире уделяется исследованиям в области физики волновых процессов в многослойных тонкопленочных пьезокристаллических структурах, служащих основой для создания акустоэлектронных устройств нового поколения, работающих в сверхвысокочастотном диапазоне частот от 2 до 30 ГГц.

SMR-BAW (SMR-BAW – solidly mounted resonator- bulk acoustic wave) резонатор, работающий на продольных объемных акустических волнах, состоит из тонкой пьезопленки (например, (0001) *AlN*), на верхней и нижней поверхностях которой расположены металлические электроды. Акустическая изоляция резонатора от подложки осуществляется за счет Брэгговского отражателя, служащий для предотвращения акустического взаимодействия активной зоны резонатора с подложкой. Конструкция типичного SMR-BAW резонатора показана на рис.1 [1].

В первом приближении центральная рабочая частота такого резонатора оценивается как $f = V/(2h)$, где V – скорость продольной ОАВ вдоль направления, перпендикулярного поверхности пьезоактивного слоя, h – толщина слоя. В общем случае центральная частота резонатора f определяется не только толщиной слоя *AlN*, но и толщиной и материалом верхнего и нижнего электродов [1]. Это позволяет производить корректировку частоты резонатора.

При изготовлении SMR-BAW резонатора, возникают существенные трудности, связанные, прежде всего, с толщиной пьезопленки и возбуждающих электродов. К примеру, толщина пьезопленки *AlN* резонатора с рабочей частотой в 4,75 ГГц составляет порядка 0,59 мкм, а толщины возбуждающих электродов – 0,08-0,1 мкм, при этом согласно расчетам, небольшая погрешность в толщинах (на 0,001 мкм) существенно (на десятки МГц) сдвигает частоту резонатора. Кроме того, с ростом частоты существенно снижается добротность резонатора, а из-за омических потерь в тонких электродах можно добиться высокой добротности только на *параллельном* резонансе [1].

В 2014 г. предприятием ОАО «Завод »Метеор» совместно с предприятиями ЗАО «Светлана-Рост» и ОАО «КБ «Икар» успешно проведена ОКР, в результате которой были разработаны и освоены в производстве резонаторы РА562 КЖДГ.433514.001ТУ, категории качества ВП.

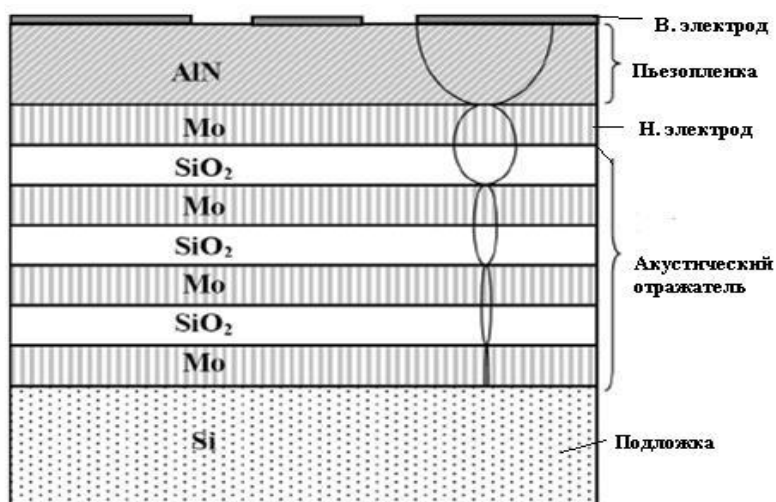


Рисунок 1. Конструкция SMR-BAW

Этапы производства резонаторов:

1. Расчет структур для заданного набора частот с нужными прогнозируемыми параметрами;
2. Выращивание слоя AlN и формирование Брэгговского отражателя;
3. Формирование топологии и разрезка пластины со структурами на отдельные чипы;
4. Настройка чипов на номинальную частоту, корпусирование, контроль выходных электрических параметров готовых изделий.

Для увеличения величины добротности была разработана структура чипа, состоящая из двух последовательно включенных резонаторов. Топология верхних электродов приведена на рис.2.

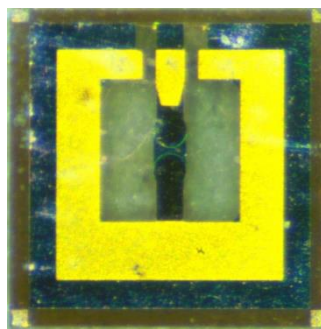


Рисунок 2. Топология верхних электродов

Размер чип-резонатора $1 \times 1 \times 0,4$ мм. Электроды над пьезоэлектриком выполнены из никеля, $ground$ -шина и выводящие контакты покрыты золотом. При этом покрытие не очень стойкое и при измерениях параметров чипов на зондовой станции (например, SPS-2800) необходимо соблюдать меры предосторожности.

Структуры на пластине имеют значительный разброс по резонансной частоте, вследствие погрешностей, возникающих при производстве тонких пленок. Например, для диапазона 4,5-7,5 ГГц удалось добиться точности 30000 ppm, что не может удовлетворить потребителей готовой продукции.

Одна из основных задач при разработке резонаторов состояла в создании технологии точной настройки резонансной частоты каждого резонатора.

Для более точной настройки частоты резонатора (увеличение частоты) было использовано ионное травление верхнего никелевого электрода в вакууме с рабочим газом аргон на установке SFE-B03. Травление производится через маску, поэтому становится тоньше не только верхний электрод, но и покрытие ground-шины. Этим способом удается повысить частоту резонатора (за счет уменьшения толщины никелевого электрода). Максимальный сдвиг частоты составляет 30000-40000 ppm на частоте 4,75 ГГц, при этом уменьшается добротность (максимум на 100 единиц), поэтому при выборе стратегии подстройки частоты необходимо учитывать изменение величины добротности. На этапе входного контроля параметров чип-резонаторов можно оценить возможную величину перестройки частоты с сохранением величины добротности на необходимом уровне.

Изменение резонансной частоты в сторону уменьшения выполнялось путем напыления вещества на верхний электрод. Для этих целей был выбран SiO_2 и установка магнетронного типа «Орион-5» для его напыления.

Напыление необходимо проводить очень малыми толщинами, т.к. данная процедура нагружает электрод над пьезоэлектриком, а это приводит к уменьшению величины добротности. Установлено, что напыление от 30 до 60 нм SiO_2 не приводит к значительному падению величины добротности (для большинства чип-резонаторов добротность теряет до 10% величины). При 30 нм SiO_2 резонансная частота уменьшается на 4000 ppm для чипов 4,75 ГГц. Однако напыление 100 нм и более приводит к сильному падению величины добротности – в 3-4 раза, что является неприемлемым.

Комбинируя методы травления и напыления, без значительного ухудшения добротности удалось достигнуть точности настройки на номинальную частоту (4,75 ГГц):

- ± 20 ppm для 5% образцов;
- ± 50 ppm для 15% образцов;
- ± 100 ppm для 60% образцов (оставшиеся были забракованы по механическим или электрическим параметрам).

Для защиты от воздействия внешних факторов был выбран металлокерамический корпус размером 3x3x1,26 мм. Монтаж чип-резонатора в корпус осуществляется разваркой алюминиевой микропроволокой (рис.3). Для диапазона частот до 4,75 ГГц такой способ монтажа приводит к уменьшению величины добротности (на 20-30 единиц).

Достоинством данного корпуса является то, что он позволяет настраивать резонансную частоту после монтажа чип-резонатора в корпусе, что существенно упрощает производство.

Применение стандартной металлической крышки (входит в комплект поставки) оказалось неприемлемым, т.к. она является паразитной емкостью и сильно влияет на резонансную частоту образца. Поэтому было принято решение заменить металлическую крышку на кварцевую. С такой крышкой корпус позволяет упаковывать резонаторы в диапазоне 0,5-4,75 ГГц без существенных ухудшений параметров. На частотах свыше 4,75 ГГц корпус вносит большие искажения (ухудшается добротность резонатора) и его применение невозможно.

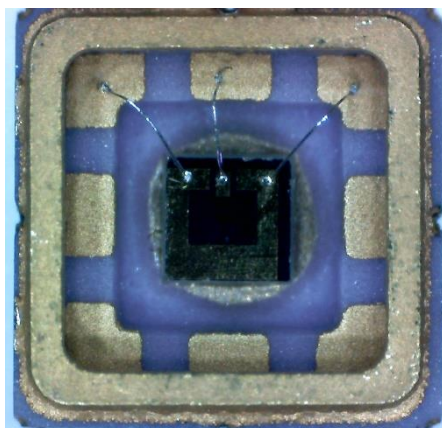


Рисунок 3. Чип в корпусе (РА562-МК)

Для решения этой проблемы была разработана конструкция (рис. 4), представляющая собой залитый герметиком чип-резонатор, смонтированный на кварцевое основание с нанесенной контактной группой. Данная конструкция отличается миниатюрностью, подходит для всего диапазона частот, при сборке величина добротности практически не меняется. Но эту конструкцию нельзя герметизировать в атмосфере азота, а в виду малых размеров контактных площадок и особенности конструкции установка в схему потребителя возможно только с помощью разварки микропровода.

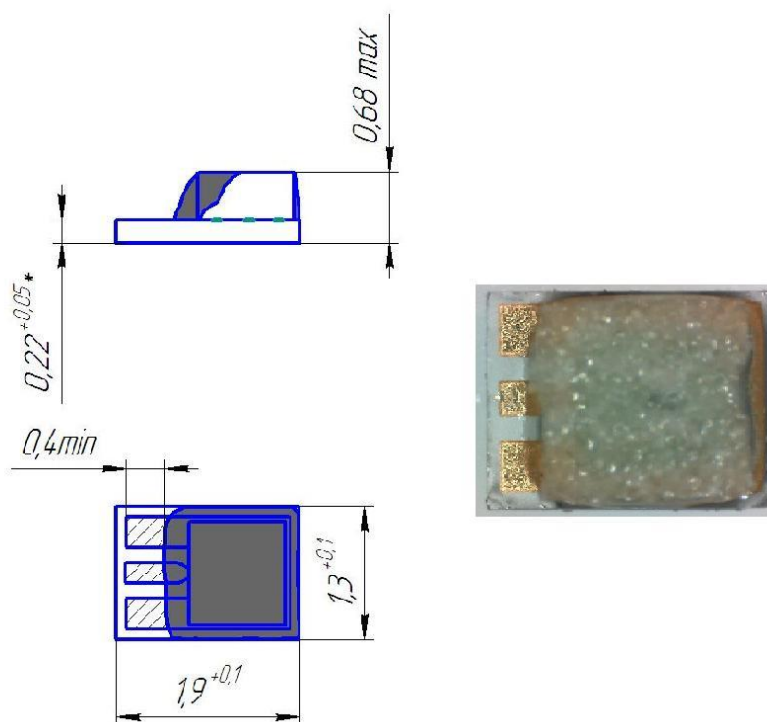


Рисунок 4. Резонатор в кварцевом корпусе (РА562-К)

В ходе ОКР резонаторы РА562 были испытаны на стойкость к воздействию механических, климатических, биологических и специальных факторов. Стойкость резонаторов к ВВФ соответствует группе исполнения 2У ГОСТ РВ 20.39.414.1.

Значения электрических параметров разработанных резонаторов РА562 соответствуют приведенным в таблице 1.

Таблица 1

Наименование параметра, единица измерения	Норма (условное обозначение по ГОСТ 21712)
1 Номинальная частота, f_N , ГГц - РА562-МК - РА562-К	От 3 до 4,75 включ. От 3 до 12 включ.
2 Температура настройки, °С	25±1
3 Точность настройки при температуре настройки, $\Delta f/f_N$, $\times 10^{-6}$, не более - для частот св. 3 до 4,75 ГГц - для частот от 3 до 12,0 ГГц	±20 (7) ±50 (9) ±100 (11) ±200 (12)* ±500 (15)*
4 Интервал температур при эксплуатации, °С	-60 ... 85 (Д)
5 Относительное изменение рабочей частоты в интервале температур при эксплуатации, $\Delta f/f_p$, $\times 10^{-4}$, не более	±30
6 Добротность Q , не менее: - для частот св. 3,0 до 4,0 ГГц - для частот св. 4,0 до 7,5 ГГц - для частот св. 7,5 до 12,0 ГГц	400 200 150
7 Относительное изменение добротности в интервале температур при эксплуатации, $\Delta R/R_l$, %, не более	-20
* Обозначения, не предусмотренные ГОСТ 21712	

Предприятием ОАО “Завод ”Метеор” проведен ряд исследований нацеленных на качественное улучшение массо-габаритных и тактико-технических характеристик резонаторов, в результате чего в настоящее время проводится модернизация и разработка новых исполнений конструкций резонаторов РА562, обладающих малыми размерами, удобной системой сборки и унифицированными контактными площадками. Прорабатывается возможность создания СВЧ генераторов, управляемых напряжением (ГУН) с использованием разработанных резонаторов, что позволит значительно улучшить характеристики по уровню фазового шума при минимальных размерах конструкции.

Библиографический список

1. Двошерстов М.Ю., Чередник В.И., Босов С.И. SMR BAW резонатор на 10 ГГц // Труды научно-технической конференции “Пассивные электронные компоненты - 2013”, г. Н.Новгород, 2013, с. 322.