

**А.П. Сидорин, А.В. Беляев, М.Ю. Двоешерстов,
С.Е. Коршунов**

ОАО «Конструкторское Бюро «Икар»

Лабораторная технология изготовления акустоэлектронных SMR-BAW резонаторов в диапазоне до 6.5 ГГц на основе гетероэпитаксиальных структур AlN/GaN/Si(111)

В работе представлены технологические цепочки и операции, изготовления СВЧ тонкопленочных акустоэлектронных одночастотных резонаторов Брэгговского типа (SMR-BAW резонатор) в диапазоне частот от 2 до 6.5 ГГц на основе гетероэпитаксиальных структур AlN/GaN/Si(111).

Ключевые слова: акустоэлектроника, СВЧ – измерения

Акустоэлектронные устройства – это базовые элементы всех систем мобильной и сотовой связи, навигации, радиолокации, мониторинга, робототехники, сенсорики. Акустоэлектронные резонаторы, фильтры позволяют обеспечить обработку сложных сигналов в реальном масштабе времени при высокой чувствительности, широком динамическом диапазоне и высокой помехозащищенности. Акустоэлектронные устройства нового поколения позволяют осваивать более высокочастотные диапазоны, отличаются уникально малыми массогабаритными характеристиками.

Гетероэпитаксиальные структуры AlN/GaN/Si(111), выращиваемые методом молекулярно лучевой эпитаксии (МЛЭ), являются перспективными для изготовления акустоэлектронных приборов на их основе. К таким приборам прежде всего относятся одночастотные акустоэлектронные резонаторы Брэгговского типа (SMR-BAW резонатор) на основе ориентированных тонкопленочных гетероэпитаксиальных структур из нитрида алюминия (0001)AlN на кремнии Si(111). В настоящее время технологии выращивания таких гетероструктур были существенно оптимизированы, что позволило получить достаточно качественные многослойные пленочные структуры, обладающие малыми акустическими потерями [1].

Технологическая цепочка изготовления SMR-BAW резонаторов (рис.1) состоит из следующих операций: 1 – выращивание гетероэпитаксиальной структуры AlN/GaN/Si(111) методом МЛЭ; 2 – формирование нижнего электрода из Al (Ni, Mo) и Брэгговского отражателя Ti/Mo (Mo/SiO₂) методом магнетронного распыления; 3 – приклеивание полученной структуры к подложкодержателю кремниевой подложкой вверх; 4 – механическая сошлифовка кремниевой подложки до 100 мкм; 5 – плазмохимическое травление кремниевой подложки до полного удаления; 6 – термическое (или магнетронное) напыление верхнего электрода из Al (Ni) на поверхность слоя GaN; 7 – формирование топологии верхнего электрода в виде компланарной линии передачи методом фотолитографии [2].

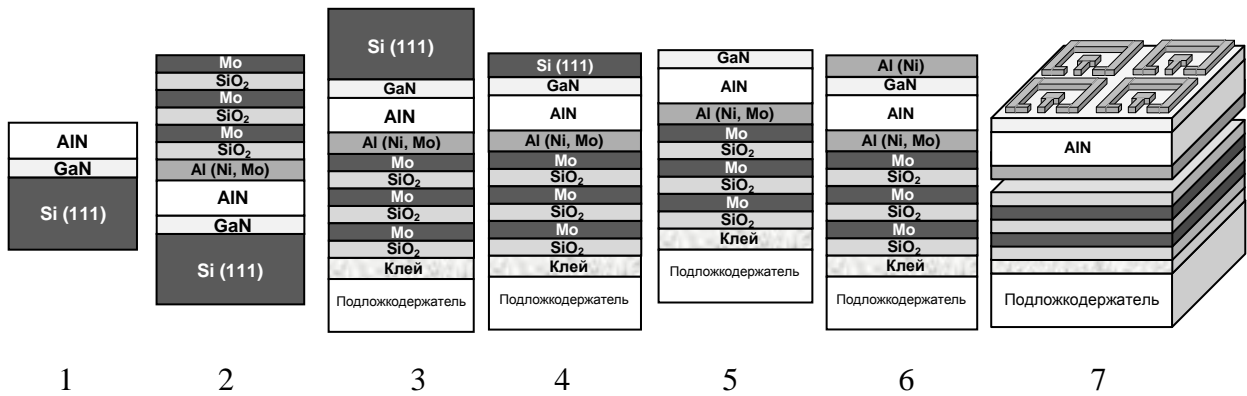


Рис. 1.

Гетероэпитаксиальные структуры AlN/GaN/Si(111) были выращены на двухдюймовых пластинах Si(111) методом МЛЭ с использованием аммиака в качестве источника азота (в ЗАО «Светлана-Рост», г.С.Петербург). Толщина подложек Si составляла 400 мкм, буферного слоя GaN 0,05 - 0,5 мкм и толщина активного пьезослоя AlN(0001) 0,36 - 1 мкм. Полученная структура подвергалась входному контролю: рентгеновская дифракция и морфология поверхности. Рентгеновская дифракция показала что пленки AlN имеют кристаллографическую ориентацию (0002) с углом разориентации порядка $0,5^\circ$, измерения морфологии поверхности показали среднеквадратичную шероховатость в квадрате $0,9 \times 0,9 \text{ мм}^2$ порядка 15 нм, полученные результаты говорят о хорошем качестве гетероэпитаксиальных структур [3, 4].

Формирование нижнего электрода и Брэгговского отражателя осуществлялось методом ионно-плазменного магнетронного распыления на установке **UniCoaT 900** карусельного типа при использовании дуальных магнетронных распылительных систем. При этом полочка располагалась на вращающейся карусели. Поскольку в установке одновременно использовались два магнетрона (рис. 2), напыление нижнего электрода и Брэгговского отражателя производилось в едином технологическом цикле. На рис. 3 показана фотография профиля полученной структуры.

В результате полученную структуру приклеивали к подложкодержателю для дальнейшего удаления кремниевой подложки. В качестве подложкодержателя использовалась поликоровая керамика ЩеО.781.000 ТУ. Для приклеивания использовался клей марки ЭДП.

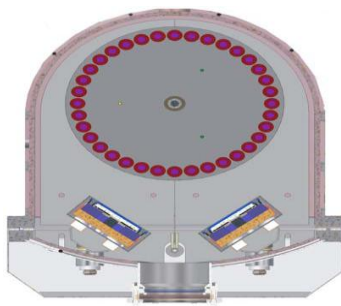


Рис. 2.

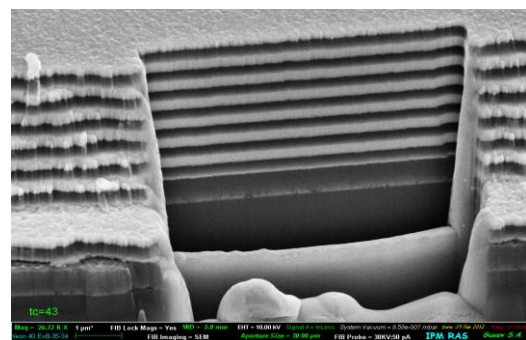


Рис. 3.

Удаление кремниевой подложки осуществлялось в два этапа. Первый этап заключался в механической сошлифовке кремния до толщин порядка 100 мкм., используя шлифовальный корундовый порошок с диаметром зерен порядка 10 мкм. На втором этапе удаления кремниевой подложки применяли технологию плазмохимического травления, используя, установку плазмохимического травления PlasmaLab 80Plus с источником индуктивно-связанной плазмы ICP-65. Время травления составляло порядка 10 - 15 мин.

В качестве верхнего электрода напыляли слои Al или Ni, используя, технологию термического испарения алюминия на вакуумной установке ВУП-4. Режим напыления слоев: остаточное давление в рабочей камере $3 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст., масса испаряемого вещества 25-60 мг в зависимости от толщины напыляемого слоя.

Заключительным этапом технологического процесса изготовления SMR-BAW резонаторов является формирование топологии верхнего электрода в виде компланарной линии передачи методом фотолитографии [5]. Процесс фотолитографии выполнялся на установках: автоматического нанесения фоторезиста марки 08ФН-75/4-001, инфракрасной конвейерной термообработки 02 СТ-170-005 МЗ.021.037, совмещения и экспонирования типа ЭМ-576А, с использованием фоторезиста марки ФП-РН-7С. На рис. 4 представлена фотография верхнего электрода в виде компланара.

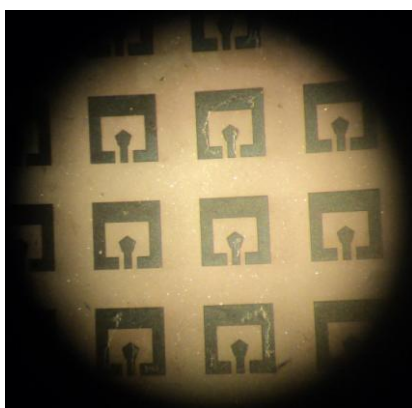


Рис. 4.

В таблице 1 показаны параметры изготовленных SMR-BAW резонаторов с СВЧ характеристиками представленные на рис. 5. СВЧ - характеристики измерялись на векторном анализаторе цепей ROHDE&SCHWARTZ ZVB-20 с использованием микрозондов Z Probes Cascade Microtech типа ACP40-GSG-100 [6].

Таблица 1

№ образца	Резонансная частота, ГГц	Толщина, мкм				
		AlN	GaN	Нижний электрод	Брегговский отражатель	Верхний электрод
1	6.5	0.5	0.03	Mo (0.06)	SiO ₂ /Mo (0.23/0.24)	Ni (0.06)
2	5.4	0.5	0.03	Mo (0.06)	SiO ₂ /Mo (0.27/0.28)	Ni (0.13)
3	2.7	1	0.5	Al (0.07)	Ti/Mo (0.39/0.4)	Ni (0.2)
4	2.8	1	0.5	Al (0.07)	Ti/Mo (0.39/0.4)	Ni (0.15)

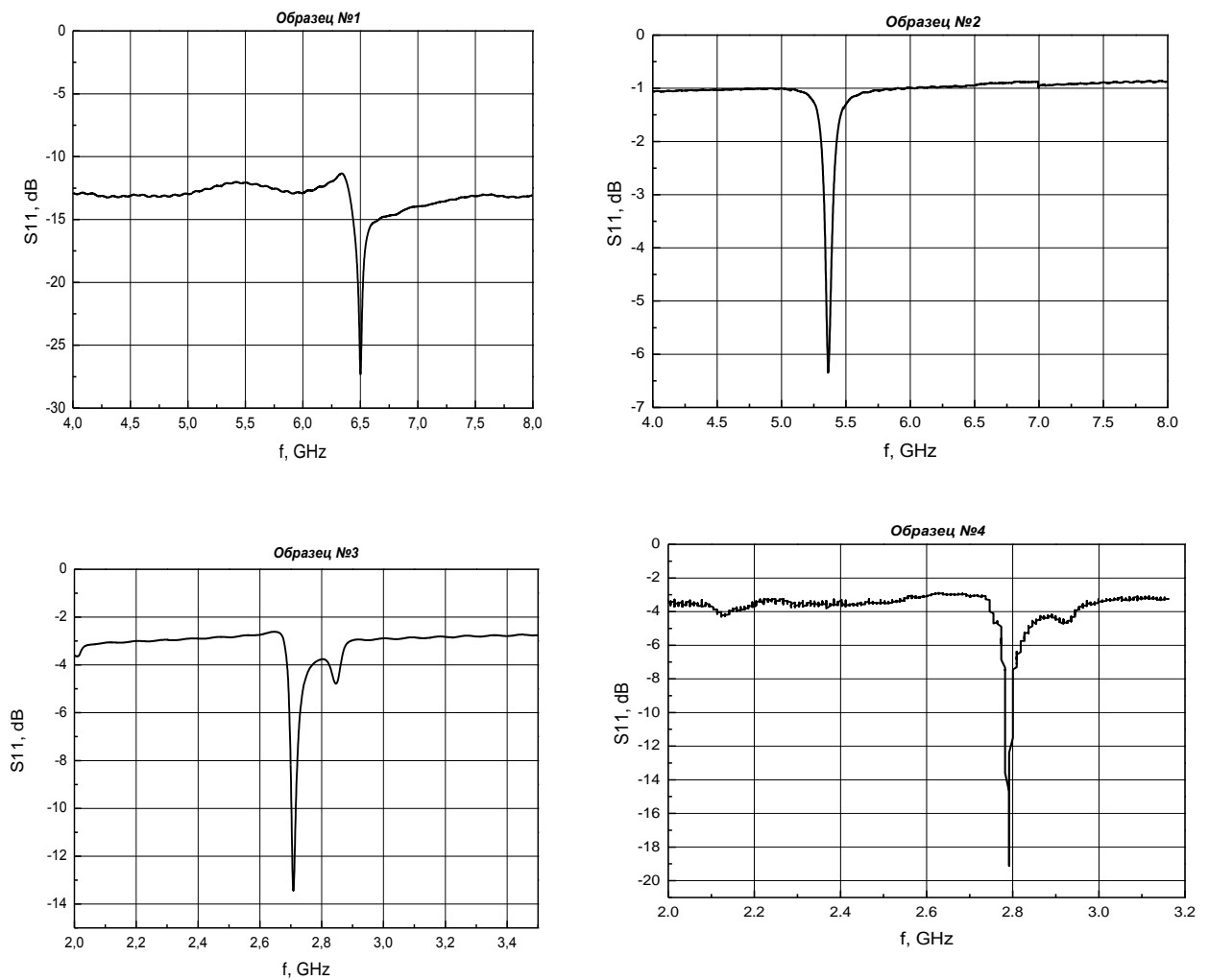


Рис. 5.

Таким образом по данной технологии, изготовлены SMR-BAW резонаторы в диапазоне частот от 2 до 6.5 ГГц.

Библиографический список

1. М.Ю. Двошерстов, В.И. Чередник. Перспективные направления развития акустоэлектронных устройств СВЧ диапазона // Материалы научно-технической конференции «Пассивные электронные компоненты-2011».
2. А.В. Беляев, С.И. Босов, Е.В. Борцова, А.В. Денисова, А.П. Сидорин, М.Ю. Двошерстов. Лабораторная технология изготовления макетов FBAR-резонаторов мембранного и Брэгговского типов на базе гетероэпитаксиальных структур AlN/GaN/Si(111) // Материалы научно-технической конференции «Пассивные электронные компоненты-2011».
3. М.Ю. Двошерстов, В.И. Чередник, А.В. Беляев, А.В. Денисова, А.П. Сидорин. Гетероэпитаксиальные структуры AlN/Al₂O₃ и GaN/Al₂O₃ для акустоэлектронных СВЧ устройств // Современные наукоемкие технологии. Физико-математические науки. №9, 2010, стр. 24-30.
4. А.В. Беляев, М.Ю. Двошерстов, В.И. Чередник, А.П. Сидорин, А.В. Денисова, Ю.Н. Дроздов, Д.В. Жуков. Оценка качества гетероэпитаксиальных структур AlN/Al₂O₃ и GaN/Al₂O₃ и AlN/GaN/Si(111) для акустоэлектронных СВЧ устройств // Материалы научно-технической конференции «Пассивные электронные компоненты-2011».
5. А.В. Денисова, Е.В. Борцова. Технология формирования СВЧ акустоэлектронного тонкопленочного резонатора на гетероэпитаксиальной структуре AlN/Si // Материалы научно-технической конференции «Пассивные электронные компоненты-2011».
6. С.Е. Коршунов, М.Ю. Двошерстов, Д.В. Жуков, С.И. Босов. Измерение S- параметров FBAR-резонаторов // Материалы научно-технической конференции «Пассивные электронные компоненты-2011».