

УДК 621.373.8

PACS: 85.40.-e, 85.90.+h

## Влияние разработанных базовых методов резки приборных пластин сапфира и карбида кремния на выход годных нитридных СВЧ монолитных интегральных схем

С. А. Гамкрелидзе, В. С. Кондратенко, В. В. Стыран, А. А. Трофимов, Н. В. Щаврук

*Материалами подложки приборных пластин в современной сверхвысокочастотной (СВЧ) электронике на основе GaN/AlGaN выступают сапфир и карбид кремния, которые обладают высокой твердостью и одновременно являются хрупкими. Методы разделения таких приборных пластин на отдельные кристаллы недостаточно изучены в совокупности свойств материала подложки и особенностей изготовления современных монолитных интегральных схем (МИС). В настоящей работе рассматривается разработка базовых производственных маршрутов, повышающих эффективность существующих методов резки приборных пластин сапфира и карбида кремния применительно к приборным пластинам с изготовленными на них современными СВЧ МИС на нитридных гетероструктурах, а также изучение влияния резки на технико-эксплуатационные параметры МИС.*

*Ключевые слова:* нитридные гетероструктуры, монолитные интегральные схемы, шлифование, полирование, лазерное управляемое термораскалывание, дисковая резка, критерии отбраковки МИС, выход годных.

### Введение

В настоящее время сверхвысокочастотная (СВЧ) электроника на основе нитридгаллиевых (GaN) гетероструктур в области рабочих частот выше 4–5 ГГц быстро вытесняет приборы, изготов-

товленные на основе кремниевой и классической GaAs-технологии. Структуры на основе GaN/AlGaN являются перспективными материалами для электронной техники. Высокая удельная мощность GaN-транзисторов позволяет существенно упростить топологию интегральных схем усилителя мощности, повысить эффективность, уменьшить массу и улучшить габаритные параметры [1–4]. Схемы на основе GaN с индивидуальными встроенными антеннами для передающего и приемного трактов, реализуемые в виде одной монолитной интегральной схемы (МИС), обеспечивают малые потери в тракте между малощумящим усилителем (МШУ) и антенной, что снижает коэффициент шума приемного тракта, а также повышают передаваемую мощность усилителя мощности (УМ) в антенну [5].

Методы разделения приборных пластин на отдельные кристаллы достаточно хорошо изучены в России и за рубежом применительно к кремниевым и GaAs-материалам [6–8]. В СВЧ-электронике на основе нитридных гетероструктур в качестве подложек выступают такие материалы, как сапфир и карбид кремния, которые обладают высокой твердостью и хрупкостью.

Кроме того, наличие на данных пластинах большого количества СВЧ МИС с присущими им

Гамкрелидзе Сергей Анатольевич<sup>1</sup>, директор, д.т.н., профессор.

Кондратенко Владимир Степанович<sup>2</sup>, директор, д.т.н., профессор.

Стыран Вячеслав Вячеславович<sup>1</sup>, лаборант.

Трофимов Александр Александрович<sup>2</sup>, младший научный сотрудник.

Щаврук Николай Васильевич<sup>1</sup>, научный сотрудник, к.т.н.

<sup>1</sup>Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ РАН).

Россия, 117105, Москва, Нагорный пр-д, д. 7, стр. 5.

Тел. +7 (499) 123-44-64.

E-mail: iuhfseras2010@yandex.ru, st-slava@bk.ru,

kolq\_@mail.ru

<sup>2</sup>Физико-технологический институт

Московского технологического университета.

Россия, 107996, Москва, ул. Стромьинка, 20.

Тел. +7 (499) 681-33-56.

E-mail: vsk1950@mail.ru, aa-trofimov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2016 г.

© Гамкрелидзе С. А., Кондратенко В. С., Стыран В. В., Трофимов А. А., Щаврук Н. В., 2017

характерными особенностями вынуждает учитывать данный факт при использовании известных на сегодняшний день методов разделения сапфира и карбида кремния. Данное обстоятельство связано с малым распространением технологии обработки таких пластин в совокупности с готовыми СВЧ МИС на них ввиду относительной новизны задачи.

В основном разделение твердых и хрупких материалов, таких как сапфир и карбид кремния, представлено методами на основе применения лазеров или дисков с алмазной режущей кромкой [9–13]. Известен также способ резки пластин из хрупких материалов, заключающийся в применении метода лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ) [14].

Цель данной работы заключалась в разработке и оптимизации производственных маршрутов резки в интересах повышения эффективности существующих методов резки сапфира и карбида кремния применительно к приборным пластинам с изготовленными на них современными СВЧ МИС на нитридных гетероструктурах, а также в изучении влияния резки на технико-эксплуатационные параметры МИС.

### Подготовка приборных пластин к операции резки

Перед операцией резки приборных пластин карбида кремния с изготовленными на них МИС [15, 16] проводилась дополнительная подготовка пластин, заключающаяся в последовательном проведении операций шлифования и полирования. Данные операции выполнялись в целях уменьшения толщины подложки, так как вследствие этого улучшается теплоотвод в изготовленных МИС.

Перед шлифованием и полированием пласти-

на под давлением около 2 бар приклеивается на специальную оснастку – диск-носитель, чтобы защитить «лицевую» сторону приборной пластины с изготовленными МИС. При этом требуется учитывать особенности технологии изготовления МИС, например, «воздушные» мосты в схемах, применяемые при формировании межэлектрических соединений. Высота и толщина таких мостов составляют 2–3 мкм и 3–4 мкм соответственно.

При этом для формирования межэлектрических соединений, обеспечивающих общий заземляющий контакт, в ИСВЧПЭ РАН используется конструкторско-технологическое решение, заключающееся в создании «заземляющей плоскости» над лицевой поверхностью пластины с уже изготовленными активными и пассивными СВЧ-элементами поверх слоя полимерного диэлектрика толщиной 10–15 мкм (специального полиимидного фотолака, разработанного ИВС РАН). Заземление соответствующих элементов производится через отверстия в слое фотолака, одновременно выполняющего роль защитной пассивации [17].

Высота такой МИС с «воздушными мостами» и полиимидным фотولاком может достигать на приборной пластине 15–20 мкм.

Во избежание деформации слоя фотолака и «воздушных мостов» перед приклеиванием приборной пластины на поверхность центрифугированием наносился полимерный планаризирующий клей CR-200 от Brewer Science Inc., который после нанесения и сушки, достигнув толщины 20 мкм, планаризировал поверхность пластины (см. рис. 1). Эта операция позволила защитить лицевую поверхность пластины с «воздушными мостами» и полиимидным фотولاком от механических воздействий и предотвратить их деформацию при приклейке пластины.

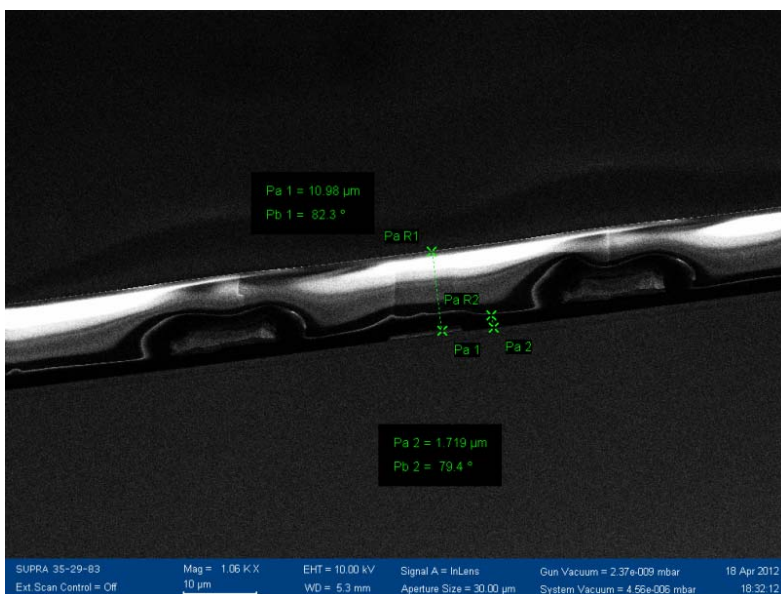
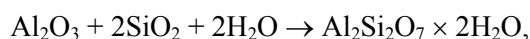


Рис. 1. Поперечный вид воздушных мостов, планаризованных клеем CR-200.

Для шлифования и полирования приборных пластин применялась установка РМ-5 компании Logitech, Ltd (Великобритания). Шлифование производилось свободным абразивом на стальной плите с формой поверхности в виде выпуклой линзы (+4 мкм) последовательно суспензиями, состоящими из абразива В<sub>4</sub>С с размерностью зерен 50 мкм и 15 мкм, приготовленными с использованием деионизованной воды и этиленгликоля для предотвращения осаждения абразива в воде. Скорость вращения плиты 70 об/мин, нагрузка на пластину – 100 г/см<sup>2</sup>.

Полирование, преследуя цель снятия нарушенного слоя на подложке, неизбежно возникающего в процессе шлифования, выполнялось на нейлоновом полировальном сукне марки Chemcloth при помощи суспензии SF1. Данная суспензия предназначена для полировки сапфира. В ее состав входит мелкодисперсный аморфный оксид кремния, который при высыхании суспензии образует кристаллы, работающие как абразивный материал при полировке. При полировке сапфира он способен химически взаимодействовать с материалом подложки, образуя алюмосиликаты по формуле:



что делает полировку сапфира фактически химико-механическим процессом и позволяет добиться лучшего качества поверхности.

Однако карбид кремния химически не взаимодействует с полировальной жидкостью SF1, и процесс полировки его идет крайне медленно. Для увеличения скорости полировки в полирующую суспензию SF1 был добавлен алмазный порошок фракции 1/0. Применение мелкодисперсной алмазной суспензии снижает повреждения поверхностного слоя, а качество поверхности улучшается.

По итогам операций шлифования и полирования толщина приборных пластин сапфира и карбида

кремния составила 120 мкм и 130 мкм соответственно, а шероховатость поверхности обратной стороны R<sub>a</sub>, измеренная в центре пластины на длине 45 мкм, – 1,9 нм и 2,04 нм соответственно.

### Резка приборных пластин сапфира на МИС с помощью ЛУТ

Для высокотвердых пластин сапфира метод дисковой резки является экономически невыгодным из-за низкой скорости резки, которая составляет всего 1 мм/с, вследствие чего увеличивается износ режущего инструмента, неизбежно влекущего за собой повышение стоимости расходных материалов [18]. Резка приборных пластин сапфира с помощью ЛУТ представляет повышенный интерес, так как в результате уже известного применения данного метода в производстве светоизлучающих диодов были выявлены его бесспорные преимущества и перспективность при резке хрупких материалов, а именно, обеспечивается высокая производительность и бездефектная кромка, повышающая прочность изделия в несколько раз [14, 20, 21].

Резка приборных пластин сапфира на МИС методом ЛУТ осуществлялась на первой российской промышленной установке МЛП1–1060/355 установке путем локального нагрева материала лазерным пучком, вследствие чего образуются напряжения сжатия. Далее, вслед за лазерным пучком, подается хладагент (воздушно-водяная смесь). Напряжения сжатия меняют знак на противоположный, образуются напряжения растяжения, что приводит к образованию трещины. Для зарождения трещины в первом направлении наносится первоначальный дефект («надрез») длиной от 150 мкм, во втором направлении для обеспечения качества и стабильности дефект наносится по всей длине реза с помощью твердотельного лазера с длиной волны 355 нм (см. рис. 2). Скорость резки пластины методом ЛУТ составила до 450 мм/с.

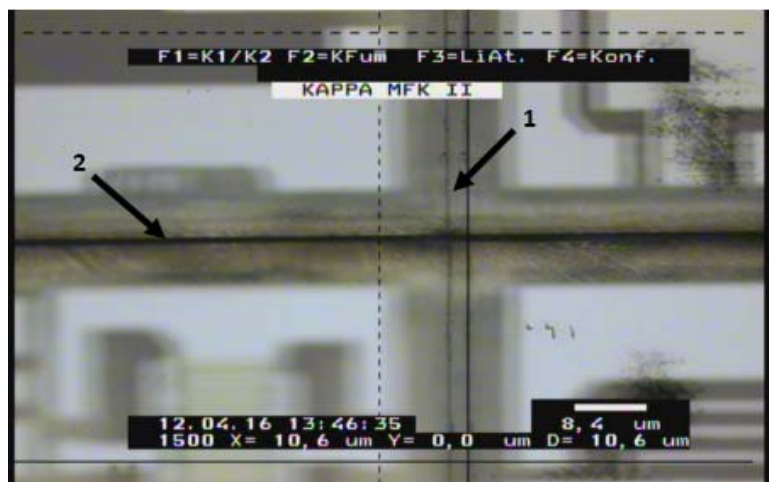


Рис. 2. Линии реза пластины в первом направлении (1) с помощью ЛУТ CO<sub>2</sub>-лазером и линии реза во втором направлении (2) с предварительным надрезом УФ-лазером.

### Резка приборных пластин карбида кремния на МИС с помощью дисковой резки

Как уже было сказано, традиционно для резки пластин на кристаллы используются алмазные диски с внешней режущей кромкой. Каждое алмазное зерно представляет собой микрорезец, который снимает мельчайшие стружки с обрабатываемой поверхности. Резка производится на высоких скоростях (до 40000 об/мин), с одновременным участием в резании большого количества алмазных зёрен, в результате чего достигается высокая производительность обработки. При резке выделяется большое количество тепла, поэтому при резке данным методом необходимо охлаждение водой или специальной охлаждающей жидкостью. Метод резки алмазными дисками универсален к материалам подложек, вследствие чего

получил широкое распространение в микроэлектронной промышленности.

Работы по подбору режимов резки приборных пластин карбида кремния с изготовленными на них МИС проводились на установке ADT 7100. Непосредственно перед началом разделения пластины на кристаллы лицевая сторона пластины покрывалась защитным слоем фоторезиста S1818, а затем приклеивалась с обратной стороны на ленту-спутник ADWILL D-628 которая крепилась на стальную рамку.

Для резки карбида кремния был выбран диск 00777-1030-003-QUP и подобраны следующие режимы резки: обороты шпинделя – 25000 об/мин, скорость подачи диска 0,5 мм/с. Данные режим резки обеспечил разделение пластины практически без сколов с шириной реза около 90 мкм (см. рис. 3).

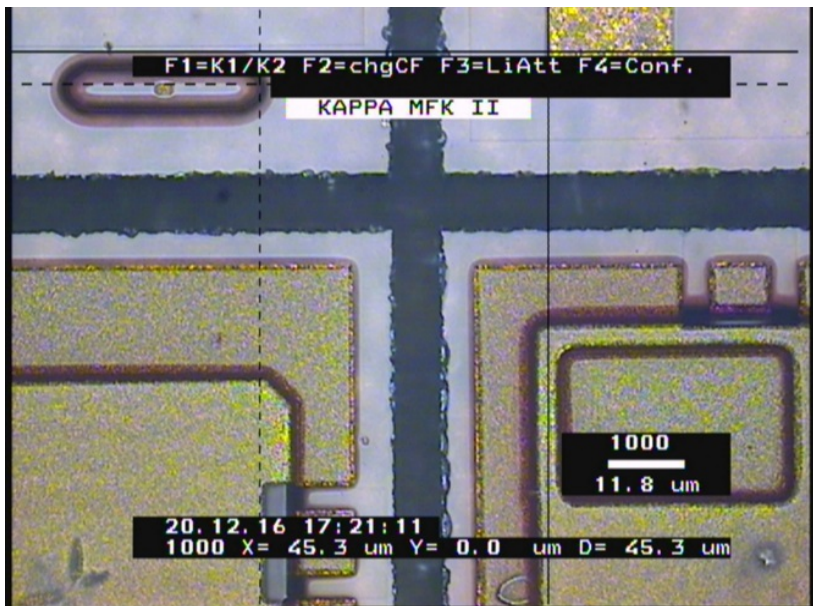


Рис. 3. Дорожки реза на приборной пластине карбида кремния.

### Изучение влияния резки на технико-эксплуатационные параметры МИС

После завершения комплекса операций разработанных маршрутов резки приборных пластин сапфира и карбида кремния на МИС, включающих в себя приклеивание пластины к диску-носителю, шлифование, полирование и непосредственно резку пластин, проводилось специальное изучение влияния конкретного маршрута по двум направлениям:

1. выход годных кристаллов по геометрическим параметрам;
2. выход годных МИС по электрофизическим параметрам.

В первом случае кристаллы после резки отбраковывались визуально исключительно на несо-

ответствие геометрическим размерам кристаллов МИС, заданным топологией. К таковым относились:

- сколы, доходящие до контактных площадок;
- трещины на краю кристалла, направленные к металлизации или активной области микросхемы;
- трещины в активной области микросхемы или под контактной площадкой и металлизацией;
- превышение размера кристалла более чем на 200 мкм (хотя бы с одной стороны) по чертежу в конструкторской документации.

Брак МИС, возникший в ходе изготовления приборной пластины до осуществления маршрута резки, в статистику по первому направлению не включался. К таким случаям относятся:

- дефекты металлических покрытий в виде:

а) разрывы металлизированных проводников;  
 б) царапины, пересекающие металлизированные проводники более чем на 1/2 ширины;

в) сквозные царапины, вырывы, уменьшающие ширину металлизированного проводника в месте перехода в контактную площадку более чем на 1/3 ширины;

г) сквозные царапины в металлизированной дорожке, контактной площадке, уменьшающие ширину дорожки более чем на 1/2 ее ширины;

д) пустота или царапина в металлизированной дорожке над контактным окном, которая изолирует более 1/2 площади контактного окна;

е) отсутствие металлизации более чем на 1/5 площади контактной площадки;

- любые признаки коррозии и отслаивания металлических покрытий;

- нестравленные участки металлических покрытий, уменьшающие более чем на 1/3 следующие расстояния:

а) между двумя контактными площадками;

б) между двумя любыми металлизированными дорожками;

в) между контактной площадкой и металлизированной дорожкой;

- смещение металлизированной разводки в виде:

а) покрытие металлом 1/2 или менее площади контактного окна;

б) расстояние между металлизацией и соседним контактным окном менее 1/2 ширины установленного конструкторской документацией зазора;

- дефекты диэлектрических ФЛТП покрытий (фотолак термостойкий прозрачный, ТУ 2378-001-02698594-2013) в виде:

а) остатки диэлектрической пленки на контактных площадках во вскрытой области не более чем на 1/5 площади контактной площадки;

б) отслоение покрытия ФЛТП;

- дефекты чистоты поверхности – пятна, подтеки, наличие неудаляемых частиц на контактных площадках.

Согласно приведенным критериям, выход годных кристаллов по геометрическим параметрам составил:

- для резки приборных пластин сапфира на МИС лазерным управляемым термораскалыванием (ЛУТ) – до 93 %;

- для резки приборных пластин карбида кремния на МИС диском с алмазной режущей кромкой – до 98 %.

Во втором случае, а именно, оценки выхода годных МИС по электрофизическим параметрам

после резки, отбраковка осуществлялась по результатам измерений следующих параметров МИС МШУ:

- коэффициента усиления;
- коэффициента стоячей волны по входу;
- коэффициента стоячей волны по выходу.

При передаче приборной пластины на конкретный маршрут резки, в качестве исходных 100%-годных МИС по электрофизическим параметрам принималось установленное предварительными измерениями на пластине количество МИС, удовлетворяющих заданным параметрам, согласно техническому заданию на изготовление. В дальнейшем выход годных МИС по электрофизическим параметрам уже после резки определялся выраженном в процентном соотношении количеством кристаллов МИС, измеренные параметры которых после резки соответствовали заданным, согласно техническому заданию.

Итак, выход годных кристаллов МИС по электрофизическим параметрам после проведения комплекса операций разработанного технологического маршрута резки приборных пластин сапфира и карбида кремния составил:

- для резки приборных пластин сапфира на МИС лазерным управляемым термораскалыванием (ЛУТ) – до 90 %;

- для резки приборных пластин карбида кремния на МИС диском с алмазной режущей кромкой – до 90 %.

Потерянное количество кристаллов МИС (~10 %) отчасти было связано с тем, что некоторое количество рабочих кристаллов подвергается отбраковке на этапе сортировки по геометрическим размерам, вследствие подпадания под описанные выше критерии (в первом случае). В целом же было установлено, что сравниваемые маршруты резки приборных пластин сапфира и карбида кремния не оказывают существенного влияния на электрофизические параметры МИС. При этом наблюдалось незначительное (в пределах 5–7 %) рассогласование предварительно измеренных параметров МИС на пластине с аналогичными параметрами, измеренными на уже порезанном (по выбранному маршруту) кристалле МИС, что объясняется изменением импеданса микрополосковых линий вследствие уменьшения толщины подложки при ее утонении. Конечная толщина подложки МИС закладывается при проектировании с учетом рекомендаций выбранного маршрута резки, вследствие чего измерения параметров МИС до и после резки могут отличаться.

### Заключение

В ходе проведенной работы разработаны и оптимизированы производственные маршруты резки приборных пластин сапфира и карбида кремния на нитридгаллиевых МИС, а именно, методом лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ) и с помощью алмазных дисков с внешней режущей кромкой. Изучение влияния разработанных маршрутов на технико-эксплуатационные параметры МИС позволило установить, что выход годных кристаллов по геометрическим параметрам составил в среднем до 95 %. При этом выход годных кристаллов по электрофизическим параметрам способен составить до 100 %, однако часть рабочих кристаллов МИС теряется вследствие несоответствия геометрическим параметрам и отбраковки на первом этапе.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0011, уникальный идентификатор проекта RFMEF160714X0011).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Балакирев А., Туркин А. // Современная электроника. 2015. № 4. С. 28.
2. Raymond S. Pengelly, Simon M. Wood, James W. Milligan, Scott T. Sheppard, William L. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2012. Vol. 60. No. 6.
3. Федоров Ю. В., Михайлович С. В. // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18. № 4. С. 217.

4. Галиев Р. Р., Гнатюк Д. Л., Зуев А. В., Крапухин Д. В., Майтама М. В., Матвеев О. С., Михайлович С. В., Федоров Ю. В., Шербакова М. Ю. // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 2. С. 21.
5. Федоров Ю., Мальцев П., Матвеев О., Гнатюк Д., Крапухин Д., Путинцев Б., Павлов А., Зуев А. // Наноиндустрия. 2015. № 3. С. 44.
6. Иванов В. И. // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. № 4. С. 23 <http://naukovedenie.ru/PDF/87TVN414.pdf>
7. Парфенов В. А. Лазерная микрообработка материалов – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 2011.
8. Fitzgerald A. M., Huigens B. M. // Chip Scale Review. Nov/Dec 2011. P. 34.
9. Хаит О., Алексеев А., Крыжановский В., Артамонова Е., Руссов Д. // Фотоника. 2012. № 6. С. 16.
10. Попов В. В., Вьюгинов В. Н., Травин Н. К. // Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век, 2014. Т. 6. № 2. С. 22.
11. Алексеев А. // Печатный монтаж. 2010. № 2. С. 14.
12. Баица П. // Электроника: наука, технология, бизнес. 2010. № 3. С. 2.
13. Albelo J. // Chip Scale Review. Nov/Dec 2011. P. 38.
14. Кондратенко В. С., Наумов А. С. Патент РФ № 2404931, МКИ5 С03 В 33/09. Оpubл. 27.11.2010. Бюл. № 33.
15. Федоров Ю. В., Майтама М. В. Топология ИМС «Интегральный малошумящий усилитель для диапазона частот 8–12 ГГц» Свидетельство о государственной регистрации № 2016630103 от 19.08.2016 г.
16. Федоров Ю. В., Майтама М. В. Топология ИМС «Интегральный усилитель мощности для диапазона частот 8–12 ГГц» Свидетельство о государственной регистрации № 2016630104 от 19.08.2016 г.
17. Крапухин Д. В., Мальцев П. П. // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4. № 4. С. 42.
18. Шаврук Н. В., Мальцев П. П., Трофимов А. А., Кондратенко В. С., Зобов А. К. / Сборник трудов 6-ой Международной Научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Моковские чтения», 2015 г. (Москва – НИЯУ МИФИ, 2015). С. 54–55.
19. Кондратенко В. С., Голубятников И. В., Жималов А. Б. // Приборы. 2009. № 12. С. 1.
20. Кондратенко В., Зобов А., Наумов А., Лу Хунг-Ту // Фотоника. 2015. № 2. С. 42.

PACS: 85.40.-e, 85.90.+h

## Effect of cutting methods designed instrument plates sapphire and silicon carbide yields nitridgallievych Microwave monolithic integrated circuits

S. A. Gamkrelidze<sup>1</sup>, V. S. Kondratenko<sup>2</sup>, V. V. Styran<sup>1</sup>, A. A. Trofimov<sup>2</sup>, and N. V. Shchavruk<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Ultra-High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences  
Bld. 5, 7 Nagorny passage, Moscow 117105, Russia  
E-mail: iuhfseras2010@yandex.ru, st-slava@bk.ru, kolq\_@mail.ru

<sup>2</sup>Physical-Technological Institute of the Moscow Technological University  
20 Stromynka str., Moscow, 107996, Russia  
E-mail: vsk1950@mail.ru, aa-trofimov@yandex.ru

Received December 22, 2016

***Substrate materials in a modern instrument ultra-high frequency semiconductor electronics wick based on GaN/AlGaN structures are sapphire and silicon carbide. This materials are high hardness and brittle. Separation methods of wafers such as into individual chips not enough been studied in combination properties of the substrate material and the characteristics of modern manufacturing monolithic integrated circuits (MMIC). This paper deals with the development of basic technological routes to improve the efficiency of existing methods of cutting wafers of sapphire and silicon carbide in relation to the modern MMIC on nitride heterostructures, and also study the effect of cutting on the technical and operational parameters of the MMIC.***

**Keywords:** nitride heterostructures, monolithic integrated circuits, lapping and polishing, laser controlled thermosplitting, dicing, chip yield.

## REFERENCES

1. A. Balakirev and A. Turkin, Sovr. Elektron., No. 4, 28 (2015).
2. Raymond S. Pengelly, Simon M. Wood, James W. Milligan, Scott T. Sheppard, and L. William, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques **60** (6) (2012).
3. Yu. V. Fedorov and S. V. Mikhailovich, Nano- i Mikrosistem, Tekhnika **18**, 217 (2016).
4. R. R. Galiev, D. L. Gnatyuk, A. V. Zuev, et al., Nano- i Mikrosistem, Tekhnika, No. 2, 21 (2015).
5. Yu. Fedorov, P. Mal'tsev, O. Matveenko, et al., Nanoindustriya, No. 3, 44 (2015).
6. V. I. Ivanov, Internet-Magazine "Naukovedenie", No. 4, 23 (2014); <http://naukovedenie.ru/PDF/87TVN414.pdf>
7. V. A. Parfenov, *Laser Microtreatment of Materials* (SPb, LETI, 2011) [in Russian].
8. A. M. Fitzgerald and B. M. Huigens, Chip Scale Review, No. Nov/Dec, 34 (2011).
9. O. Khatt, A. Alekseev, V. Lryzhanovskii, et al., Fotonika, No. 6, 16 (2012).
10. V. V. Popov, V. N. V'yuganov, and N. K. Travin, Nanotekhnologii – XXI Vek **6** (2), 22 (2014).
11. A. Alekseev, Pechatn. Monyazh, No. 2, 14 (2010).
12. P. Bashta, Elektronika, No. 3, 2 (2010).
13. J. Albelo, Chip Scale Review, No. Nov/Dec, 38 (2011).
14. V. S. Kondratenko and A. S. Naumov, RF Patent No. 2404931, November 27, 2010.
15. Yu. V. Fedorov and M. V. Maitama, *Integrated Noiseless 8-12 GHz Amplifier* (Patent Application No. 2016630103 of August 19, 2016).
16. Yu. V. Fedorov and M. V. Maitama, *Integrated Amplifier of 8-12 GHz Power* (Patent Application No. 2016630104 of August 19, 2016).
17. D. V. Krapukhin and P. P. Mal'tsev, Russ. Tekhnol. Zhurn. **4** (4), 42 (2016).
18. N. V. Shchavruk, P. P. Mal'tsev, A. A. Trofimov, V. S. Kondratenko, and A. K. Zobov, in *Proc. VI Intern. Conf. Microwave Electronics, 2015* (MIPhI, Moscow, 2015). P. 54–55.
19. V. S. Kondratenko, I. V. Golubyatnikov, and A. B. Zhimalov, Pribory, No. 12, 1 (2009).
20. V. Kondratenko, A. Zobov, A. Naumov, and Lu Khung-Tu, Fotonika, No. 2, 42 (2015).