



ОСОБЕННОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ НА КРИСТАЛЛЫ СВЧ МИС НА САПФИРОВЫХ ПОДЛОЖКАХ

FEATURES OF SAPPHIRE WAFERS SPLITTING ON MMIC CRYSTALS

УДК 621.382

ИВАНОВА НАТАЛЬЯ ЕВГЕНЬЕВНА^{1,2}

*Аспирант МИРЭА, инженер-исследователь
natalia.ivanova.mipt@gmail.com*

ЩАВРУК НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ¹

*К. т. н., старший научный сотрудник
kolq@mail.ru*

ТРОФИМОВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ¹

*Младший научный сотрудник
aa-trofimov@yandex.ru*

КОНДРАТЕНКО ВЛАДИМИР СТЕПАНОВИЧ²

*Д. т. н., профессор, советник ректората Московского технологического университета, заведующий кафедрой оптических и биотехнических систем и технологий
Тел.: +7 (499) 681-33-56
vsk1950@mail.ru*

IVANOVA NATALIA E.^{1,2}

*Postgraduate student, Engineer-researcher
natalia.ivanova.mipt@gmail.com*

SHCHAVRUK NIKOLAY V.¹

*Senior Researcher, PhD in Technical Science
kolq@mail.ru*

TROFIMOV ALEXANDER A.¹

*Junior Researcher
aa-trofimov@yandex.ru*

KONDRAHENKO VLADIMIR S.²

*Sc.D, professor
Тел.: +7 (499) 681-33-56
vsk1950@mail.ru*

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысокочастотной полупроводникововой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН)

² Московский технологический университет (МИРЭА)

¹ Institute of Ultrahigh Frequency Semiconductor Electronics
Russian Academy of Sciences Moscow, Russia

² Moscow Technological University (MIREA)

Статья посвящена исследованиям по разделению на кристаллы СВЧ МИС на основе гетероструктур AlGaN/GaN, изготовленных на подложках сапфира, а также имеющих развитый рельеф и обладающих сложными конструктивными особенностями. Приведена краткая характеристика метода защиты таких МИС, режимы утонения и резка на кристаллы с применением метода ЛУТ. Проведены электрофизические исследования СВЧ МИС на пластине и после разделения на отдельные кристаллы.

Ключевые слова: СВЧ МИС; AlGaN/GaN; разделение пластин; резка сапфира; лазерное управляемое термораскалывание (ЛУТ); полимерный диэлектрик; фотолак; защита СВЧ МИС; электрофизические параметры.

The article is devoted to studies on the separation of MMIC crystals based on AlGaN/GaN heterostructures on sapphire substrates with developed relief and possessing complex structural features. A brief description protection method of such MMIC, modes of thinning and splitting on crystals using the method of laser-controlled thermocracking has been given. Electrophysical studies of MMIS have been carried out on plate and after plate separation into crystals.

Keywords: UHF MIS; MMIS; AlGaN/GaN; plate separation; cutting sapphire; laser-controlled thermocracking; polymer dielectric; photolacquer; MMIS protection; electrophysical parameters.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России и за рубежом не вызывает сомнений перспективность сверхвысокочастотных (СВЧ) технологий и преимущества приборов на основе GaN [1–8]. Большая ширина запрещенной зоны и высокое значение энергии связи позволяют приборам на гетероструктурах AlGaN/GaN выдерживать радиационное облучение, стабильно работать при повышенных температурах и сопротивляться воздействию агрессивных сред, что в первую очередь важно для космической промышленности, атомной энергетики и военного применения.

Одним из основных материалов при изготовлении приборов на основе нитрида галлия является сапфир, поскольку его кристаллическая решетка позволяет наращивать epitаксиальный

слой GaN с хорошими рабочими характеристиками и соотношением цена/качество [9]. Из-за снижения паразитных емкостей повышается быстродействие элементов, а отсутствие необходимости в дополнительной изоляции элементов друг от друга позволяет увеличить степень интеграции элементов. Диэлектрическая подложка сапфира также позволяет значительно снизить токи утечки приборов и уменьшить энергопотребление [10].

Технология монолитных интегральных схем (МИС) на основе нитридных гетероструктур характеризуется в последнее время уменьшением размеров приборов при увеличении их количества на пластине. Использование современных возможностей при изготовлении МИС, в результате приводит к появлениюnanoструктурных полупроводниковых устройств

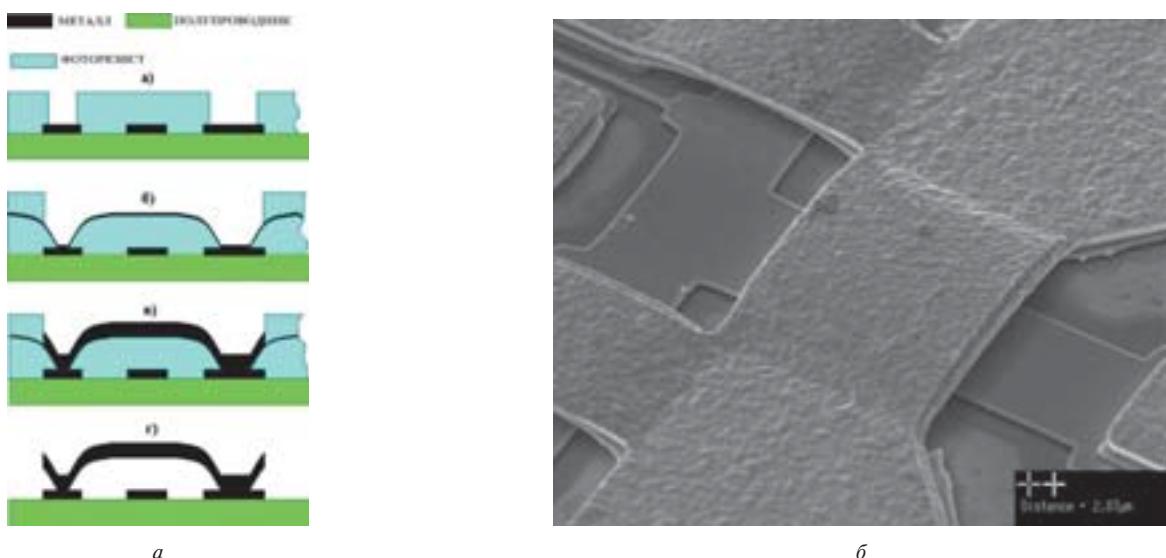


Рис. 1. Схема формирования гальванического «воздушного моста» (а) и изображение «воздушного моста», полученное с помощью растрового электронного микроскопа (б)

с типичными размерами отдельных элементов 1–100 нм в каждом направлении [11].

Также ограничения на предельные частоты СВЧ приборов имеют физический характер, связанный с конструкцией приборов [1, 12]. В результате в свете поиска новых решений СВЧ МИС приобретают новые конструктивные свойства, которые необходимо принимать во внимание на последующих этапах технологического цикла изготовления СВЧ МИС.

Разделение приборных пластин на отдельные кристаллы достаточно хорошо изучено в России и за рубежом применительно к кремниевым и GaAs материалам [13–15]. Сапфир в силу своих свойств труднее поддается обработке, кроме того, наличие на пластине сапфира большого количества уже готовых СВЧ МИС вынуждает учитывать данный факт при использовании известных на сегодняшний день технологий разделения на кристаллы.

Цель работы заключалась в разделении на кристаллы СВЧ МИС на гетероструктурах AlGaN/GaN со сложными конструктивными особенностями, изготовленных на подложках сапфира.

ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ СВЧ МИС НА НИТРИДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

Сегодня изготавливаемые по интегральной технологии на основе GaN схемы с индивидуальными встроенными антеннами для передающего или приемного трактов реализуются в виде одной МИС [16]. Такая конструкция обеспечивает малые потери в тракте между усилителем и антенной, что снижает коэффициент шума приемного тракта, а также повышают передаваемую мощность усилителя в antennу. Такие приборы позволяют работать в широкой полосе частот и обеспечивать скорость передачи данных до 5 ГГбит/с и выше; характеризуются высокой степенью поглощаемости в атмосфере, что позволяет создавать изолированные каналы связи; имеют малую длину волн, что делает возможной интеграцию антенн и целых антенных решеток на одном кристалле [2].

Одной из особенностей современных СВЧ МИС на основе нитридных гетероструктур является частое применение при формировании межэлектрических соединений технологии «воздушных мостов», которая схематически показана на рис. 1. Изоляция при таком решении осуществляется посредством воздушной среды.

Уникальным для отечественной СВЧ электроники этапом является создание «заземляющей плоскости» над «лицевой» поверхностью пластины с уже изготовленными СВЧ элементами поверх слоя полимерного диэлектрика толщиной 10–15 мкм [9]. Для заземления соответствующих элементов используются отверстия в слое полимерного диэлектрика, который одновременно выполняет роль защитной пассивации. Схематично данное решение представлено на рис. 2.

В качестве полимерного диэлектрика использовался фотолак, разработанный Институтом высокомолекулярных соединений (ИВС РАН), который представляет собой композицию, включающую прекурсор высокотермостойкого полимера (аналога полимида) и светочувствительную компоненту хинондиазидного типа, аналогичную светочувствительной компоненте, применяемой в обычных позитивных фоторезистах. Применение фотолака не требует специального оборудования. Работа с ним осуществляется на стандартных литографических установках. С учетом рекомендаций изготовителей фотолака был разработан маршрут дополнительного уровня межэлектрических соединений, обеспечивающего как защиту схемы, так и общую землю.

Таким образом, вследствие указанных особенностей современных СВЧ МИС, их общая высота относительно приборной пластины может достигать 20 мкм. Схематичное изображение отдельного чипа СВЧ МИС на сапфире с применением технологии «воздушных мостов» и общего заземляющего контакта на лицевой поверхности МИС и фотография кристалла СВЧ МИС представлены на рис. 3.

Такие МИС со сложными конструктивными особенностями требуют применения надежных способов защиты готовых

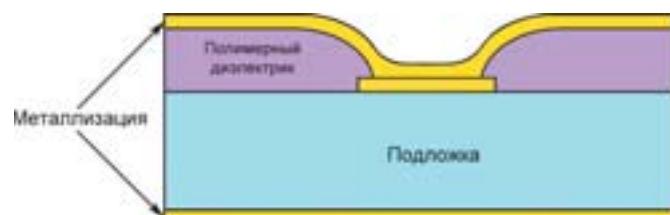


Рис. 2. «Заземляющая плоскость» поверх слоя полимерного диэлектрика

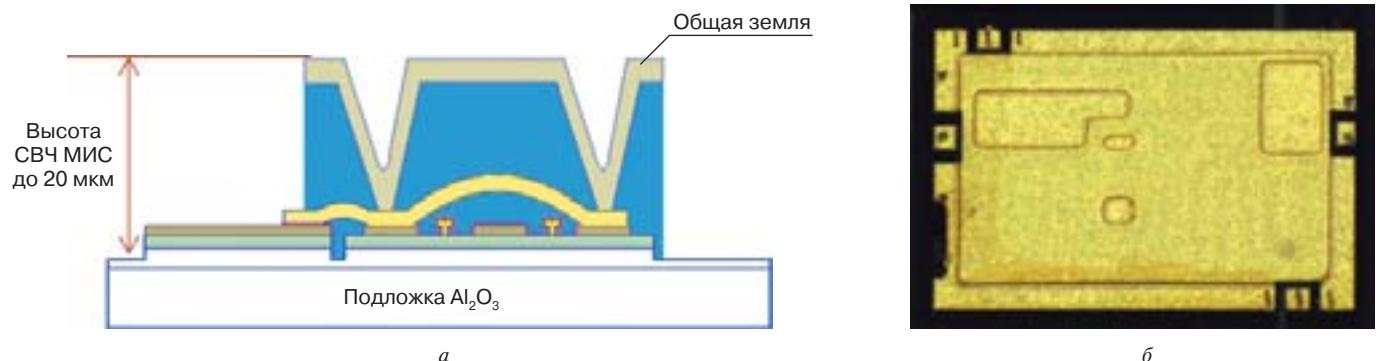


Рис. 3. Схематичное изображение СВЧ МИС с «воздушным мостом» и общим заземляющим контактом на лицевой поверхности (а) и фотография кристалла СВЧ МИС (б)

приборов в течение различных операций, которые включает в себя технология разделения на кристаллы.

ЗАЩИТА СВЧ МИС СО СЛОЖНЫМИ КОНСТРУКТИВНЫМИ ОСОБЕННОСТЯМИ

Разделению приборных пластин на кристаллы СВЧ МИС различными методами резки предшествуют, как правило, операции шлифования и полирования обратной стороны приборной пластины [17, 18]. Благодаря разумному уменьшению толщины подложки повышается эффективность теплоотведения работающего прибора, сокращается время операции резки пластины на кристаллы, снижается износ режущего инструмента [19].

Операции утонения и резки на кристаллы требуют применения временного приклеивания пластины на диск-носитель или ленту-спутник. Операция приклеивания в обязательном порядке включает в себя длительное воздействие давящей мембранны в камере приклеивания при температуре плавления клеящего вещества в условиях вакуума. Это обеспечивает обезгаживание адгезива, а также прижатие приборной пластины с МИС к диску-носителю. На данном этапе МИС на пластине наиболее подвержены разрушающему воздействию прижимающей мембранны, а сложные конструктивные особенности МИС и развитый рельеф изготовленных приборов на пластине лишь увеличивают риск повреждений (рис. 4).

С целью обеспечения соответствия всем ключевым требованиям, предъявляемым к приклеиванию и используемым для этой цели адгезивам [20], был разработан и апробирован метод защиты СВЧ МИС на гетероструктурах AlGaN/GaN со сложными конструктивными особенностями за счет использования температурно совместимых полимеров, обеспечивающий однородность планаризирующей плоскости и химическую инертность при последовательности операций шлифования, полирования и резки на кристаллы [21]. Схематично применение данного метода представлено на рис. 5.

Разработанное решение для приклеивания приборных пластин сапфира и карбида кремния с СВЧ МИС на гетероструктурах AlGaN/GaN на диск-носитель с использованием температурно совместимых защитного полимера WaferBOND CR-200 и kleящего адгезива Glycol Phthalate 0CON-324 обеспечивает надежную защиту СВЧ МИС, однородность планаризирующей плоскости, необходимую стабильность и химическую инертность в течение операций шлифования и полирования при достаточной простоте применения с использованием известного оборудования. Приведенный порядок приклеивания приборных пластин с изготовленными на них СВЧ МИС со сложными конструктивными особенностями позволяет снизить риск повреждений тонкой приборной пластины в течение различных процессов, защитить СВЧ МИС и, следовательно, повысить процент выхода годной продукции.

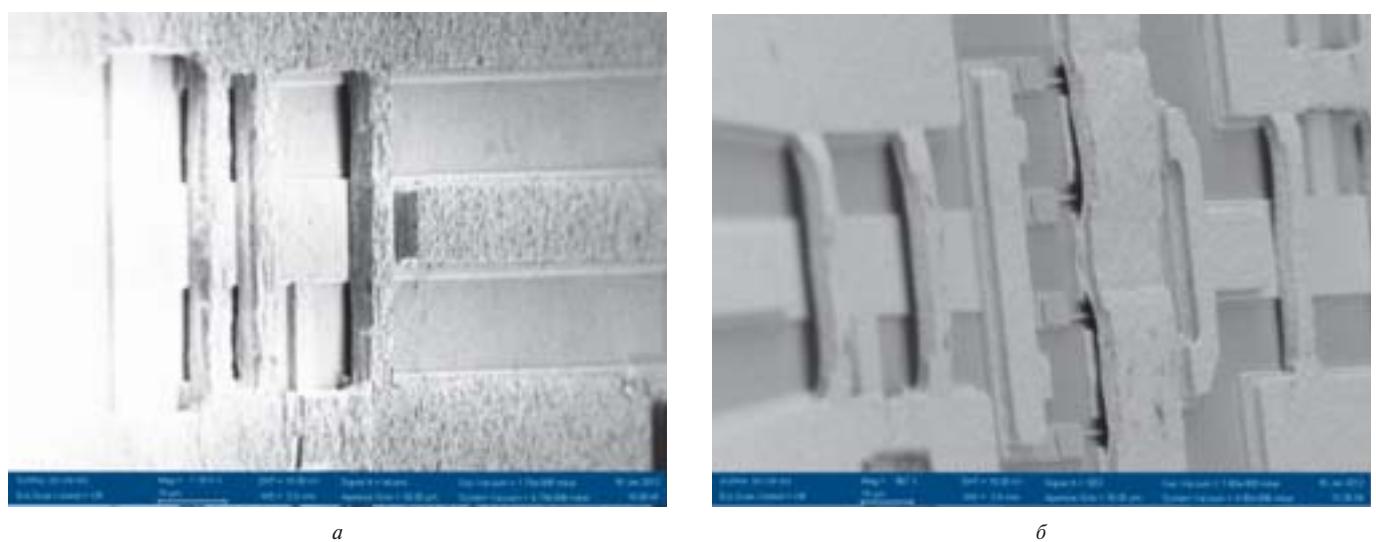


Рис. 4. Фотографии полного (а) и частичного (б) повреждений «воздушных мостов» СВЧ МИС, защищенных фоторезистом, в течение приклеивания приборной пластины на ленту-спутник, сделанные при помощи растрового электронного микроскопа

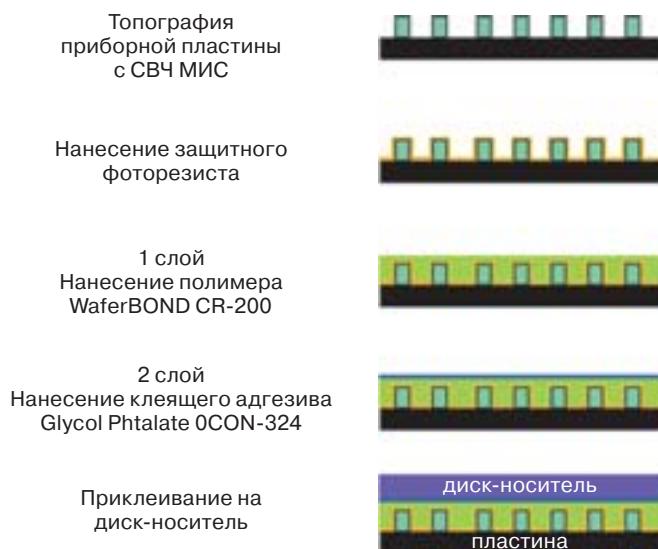


Рис. 5. Порядок приклеивания приборных пластин сапфира и карбида кремния с изготовленными на них СВЧ МИС на гетероструктурах AlGaN/GaN на диск-носитель

ОДНОСТОРОННЕЕ ШЛИФОВАНИЕ И ПОЛИРОВАНИЕ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ ОБРАТНОЙ СТОРОНЫ ПЛАСТИН САПФИРА С ИЗГОТОВЛЕННЫМИ СВЧ МИС НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ ALGAN/GAN

Помимо снижения толщины подложки перед непосредственно операцией резки на кристаллы требуется обеспечить прозрачность обратной стороны пластины и высокое качество обработанной поверхности, т. к. при резке пластины сапфира на кристаллы с использованием, например, методов на основе применения лазеров в последнее время пластину ориентируют преимущественно «лицевой» стороной вниз [17].

Режимы одностороннего шлифования и полирования свободным абразивом обратной стороны пластин сапфира с изготовленными СВЧ МИС на гетероструктурах AlGaN/GaN были установлены экспериментальным путем.

Шлифование приборных пластин сапфира осуществлялось супензиями на основе карбида бора (B_4C) с добавлением

этиленгликоля для обеспечения взвеси абразива, оставшуюся часть объема супензии составляла деионизованная вода (10% B_4C + 10% этиленгликоль + 80% деионизованная вода). Применилась чугунная шлифовальная плита, скорость вращения плиты на всех этапах 70 об/мин.

Обработка приборной пластины сапфира с изготовленными на ней СВЧ МИС на гетероструктурах AlGaN/GaN производилась в несколько этапов. Результат измерений в центре пластины на длине 45 мкм составил $R_a = 1,86$ нм [22].

Установленные режимы обработки позволяют, соблюдая рекомендованный для приборных пластин сапфира с изготовленными на них СВЧ МИС на гетероструктурах AlGaN/GaN допустимый диапазон конечной толщины 110–150 мкм, получать обработанные приборные пластины с разбросом, по толщине не превышающим 2 мкм, с сохранением высокого качества обработки поверхности с показателем шероховатости не более 2 нм [22]. В настоящее время достигнутые значения, характеризующие качество обработанной поверхности, являются уровнем достижений ведущих мировых компаний, специализирующихся на шлифовании и полировании таких материалов, как сапфир (см. табл. I) [23, 24].

Выбранные режимы обработки в части распределения нагрузки и использования абразивов снижают риск физического повреждения приборной пластины в течение операций шлифования и полирования.

РЕЗКА ПЛАСТИН САПФИРА НА КРИСТАЛЛЫ СВЧ МИС С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ЛАЗЕРНОГО УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ

Преимущества технологии лазерного управляемого раскалывания (ЛУТ) и ее перспективное применение в резке хрупких материалов [25] и производстве светоизлучающих диодов на сапфировых пластинах [26] обусловили решение применить этот метод резки для разделения приборных пластин сапфира с изготовленными на них СВЧ МИС на гетероструктурах AlGaN/GaN на отдельные кристаллы. Полученные при помощи метода ЛУТ торцы пластин сапфира чрезвычайно гладкие — шероховатость не превышает 10 нм. Микродефекты отсутствуют, что обуславливает повышенную прочность полученных кристаллов. Особо подчеркивается, что такие прочные кристаллы получаются стабильно [27]. Резку сапфировой

Таблица 1. Сравнение параметров обработанных пластин сапфира

	ИСВЧПЭ РАН	Logitech Ltd (Великобритания)	Okamoto Corporation (Япония)
Наличие на пластине СВЧ МИС	с МИС	без МИС	
Толщина пластины после обработки, мкм	140	80	170
Размеры пластины, дюйм	2	2	4
Тип шлифования и полирования		одностороннее	
Шлифовальные абразивы		карбид бора	—
Размерность абразива, мкм		15	—
Полировальные супензии		SF1	алмазная
Размерность абразива, мкм			3
Шероховатость поверхности, нм	1,86	2	6
Разброс толщины по пластине, мкм		не более 2	—

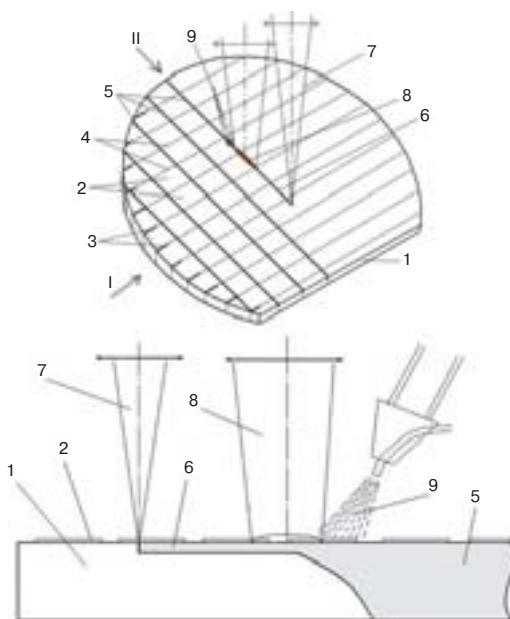


Рис. 6. Схема резки приборных пластин на кристаллы методом ЛУТ

пластины (1) со сформированными структурами (2) осуществляют для светоизлучающих диодов на пластинах сапфира следующим образом (см. рис. 6) [28]:

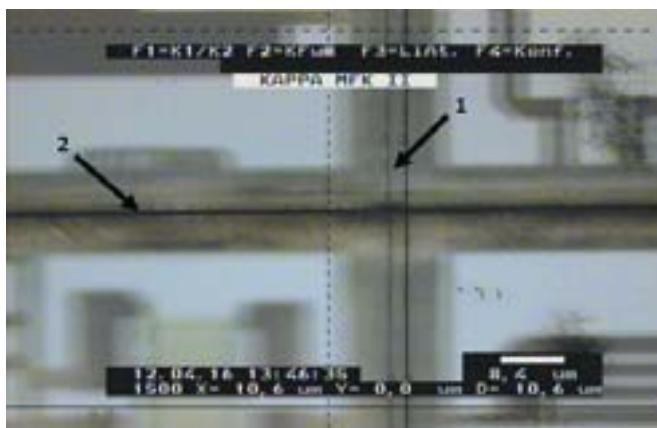
Для обеспечения резки в первом направлении (I) на краю пластины наносятся короткие надрезы (3), которые являются концентраторами напряжений и обеспечивают зарождение и продвижение разделяющих трещин (4). Перед резкой во втором направлении (II), чтобы получить сквозные разделяющие трещины (5) при помощи сфокусированного луча УФ-лазера (7) с длиной волны 355 нм наносят неглубокий надрез (6) по всей длине реза либо в местах пересечений с линиями реза (4). Глубина и ширина надреза составляют соответственно 5–9 мкм и 5–7 мкм. Нагревая линию надреза (6) лазерным лучом (8) при помощи CO₂-лазера мощностью до 50 Вт и затем охлаждая зону нагрева хладагентом (9), получаем сквозную разделяющую трещину (5). Скорость резки методом ЛУТ сапфировой пластины достигала 400–450 мм/с.

Применение технологии ЛУТ для разделения приборных пластин сапфира с изготовленными на них СВЧ МИС со сложными

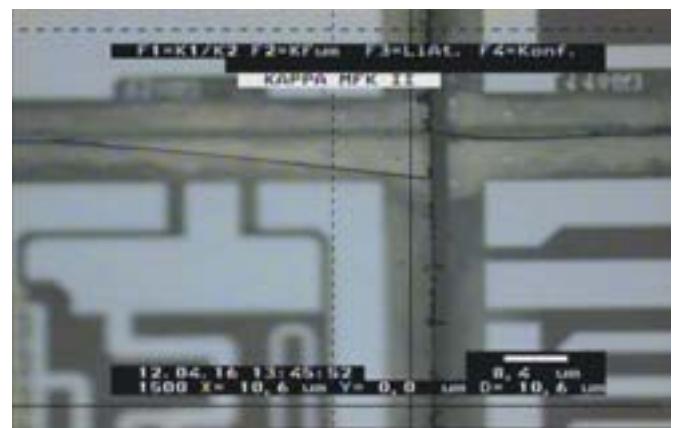
конструктивными особенностями на гетероструктурах AlGaN/GaN осуществлено впервые, в связи с чем был выявлен ряд требований к подготовке пластины [17, 18, 29]:

- Необходимость крепления пластины на пленку-спутник, что связано с охлаждением зоны нагрева посредством распыляемого хладагента, что может привести к неконтролируемому разлету уже разделенных кристаллов. Пленка-спутник удерживает разделенные кристаллы.
- Недопустимость на дорожках реза пленок фоторезиста или другого органического вещества. Такие пленки под воздействием лазерного излучения могут вскипать, либо коагулировать, что вызывает определенные трудности по удалению последствий этих явлений. Во избежание этого пластины следует крепить на пленку-спутник «лицевой» стороной вниз, а резать с обратной стороны.
- Необходимость полирования обратной стороны пластины для обеспечения прозрачности материала сапфира, т. к. оператору необходимо визуально прицелиться.
- Максимально высокое качество обработанной поверхности, т. к. разрез-трещина может отклониться от заданного направления вследствие дефектов обработки.
- Равнотолщинность пластины, что обусловлено фокусировкой лазера, а также тем обстоятельством, что при резке сапфира методом ЛУТ для каждой толщины требуется корректировать режим резки.
- Необходимость защиты «лицевой» стороны пластины полимерным покрытием при приклеивании на пленку-спутник, что обусловлено особенностями сформированных на пластине СВЧ МИС на гетероструктурах AlGaN/GaN. Покрытие полимером предохраняет «воздушные мости» и снижает риск выхода из строя МИС вследствие их повреждений.

Резка с обратной стороны с использованием планаризации поверхности и защиты СВЧ МИС с применением защитного полимера WaferBOND CR-200 по методу, рассмотренному выше, избавляет от необходимости экспонирования и проявления фоторезиста с дорожек реза приборной пластины. Данная операция существенно повысила бы риск разрушения пластины, в результате того, что при уменьшении толщины сапфировой подложки после утонения пластины вследствие упругих напряжений в пленке GaN пластина сапфира подвержена деформации



a

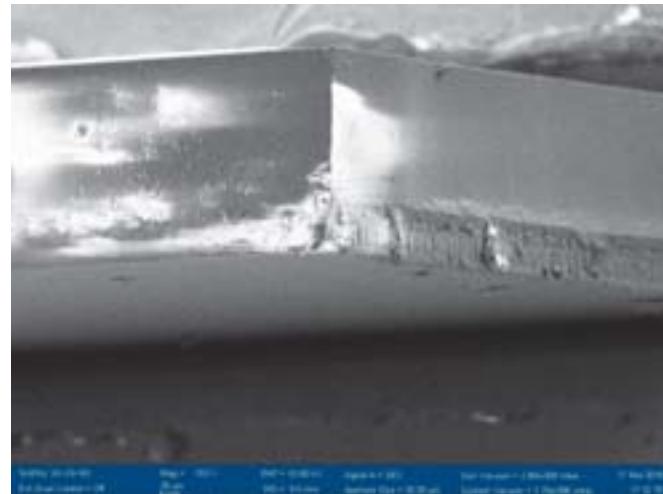


б

Рис. 7. Линии реза (1) пластины в первом направлении с помощью ЛУТ CO₂-лазером и линии реза (2) во втором направлении с предварительным надрезом УФ-лазером (а) и дефект разделения пластины на кристаллы методом ЛУТ (б): отклонение трещины при поперечном резе от линии реза на 100 мкм



а



б

Рис. 8. Фотографии кромок кристалла приборной пластины сапфира после операции резки методом ЛУТ. Кромка реза в первом направлении (а) и результат надреза с обратной стороны пластины УФ-лазером для реза во втором направлении (б)

сжатия, что приводит к существенному прогибу пластины при толщине пластины 150 мкм и менее [19]. Кроме того, такая пластина сапфира после шлифования и полирования до толщины 150 мкм и менее имеет прогиб больший (300 мкм и более), чем условие применения стеккеров или контактной фотолитографии для экспонирования дорожек реза на пластине (около 40 мкм) [30].

Резка приборных пластин сапфира на кристаллы СВЧ МИС на гетероструктурах AlGaN/GaN осуществлялась в Московском технологическом университете под руководством советника ректората, заведующего кафедрой оптических и биотехнических систем и технологий, доктора технических наук, профессора Кондратенко В. С. При резке применялись отработанные и оптимальные режимы [31].

На рис. 7а показан результат разделения сапфировых пластин на отдельные чипы методом лазерного управляемого термораскалывания, который обеспечивает высокое качество реза в первом и втором направлении. Следует отметить, что при использовании метода ЛУТ может возникать в основном следующий дефект, характерный для этого метода, который показан на рис. 7б, а именно: отклонение трещины при поперечном резе от линии реза.

На фотографиях кромки кристалла (рис. 8), сделанных при помощи растрового электронного микроскопа, видно высокое качество кромки в первом и втором направлении.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗДЕЛЕНИЯ НА КРИСТАЛЛЫ СВЧ МИС НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ ALGAN/GAN, ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА ПРИБОРНЫХ ПЛАСТИНАХ САПФИРА, С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ЛАЗЕРНОГО УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ НА ВЫХОД ГОДНЫХ КРИСТАЛЛОВ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СВЧ МИС

После проведения комплекса операций разработанного технологического процесса разделения на кристаллы СВЧ МИС на гетероструктурах AlGaN/GaN, изготовленных на пластинах сапфира, с применением метода ЛУТ изучался выход годных СВЧ МИС по геометрическим параметрам и влияние

технологического процесса разделения на электрофизические параметры СВЧ МИС [32].

Отбраковывание кристаллов по критерию несоответствия геометрическим размерам кристаллов СВЧ МИС, заданным топологией, проводилось визуально с использованием микроскопа согласно ОСТ 11 073.013-2008, часть 4. Выход годных кристаллов с приборной пластины сапфира по геометрическим параметрам составил 92%.

В качестве экспериментальных образцов при разделении на кристаллы СВЧ МИС на гетероструктурах AlGaN/GaN методом ЛУТ использовались 15 приборных пластин сапфира, которые показали одинаковый процент выхода годных. Доверительный интервал согласно методам статистического контроля по ОСТ 11 14.1011-99 и ОСТ 11 14.1012-99 [33, 34] составляет менее 1% при уровне вероятности 0,99.

В табл. 2 представлено сравнение выхода годных при разделении пластин сапфира с цифровыми интегральными микросхемами (ИМС) на кристаллы методом дисковой резки и разделении пластин сапфира с СВЧ МИС со сложными конструктивными особенностями на гетероструктурах AlGaN/GaN с применением метода ЛУТ по разработанному технологическому процессу.

Таблица 2. Выход годных при разделении пластины сапфира на кристаллы методами дисковой резки и ЛУТ

	Дисковая резка	Метод ЛУТ
Наличие на пластине СВЧ МИС	цифровые ИМС	3D СВЧ МИС с «воздушными мостами»
Материал пластины		сапфир
Толщина пластины, мкм	450	110–150
Размеры пластины, дюйм	до 4	2
Скорость резки, мм/сек	0,8	400
Ширина дорожки реза, мкм	300	200
Ширина реза, мкм	200	10
Выход годных		92%

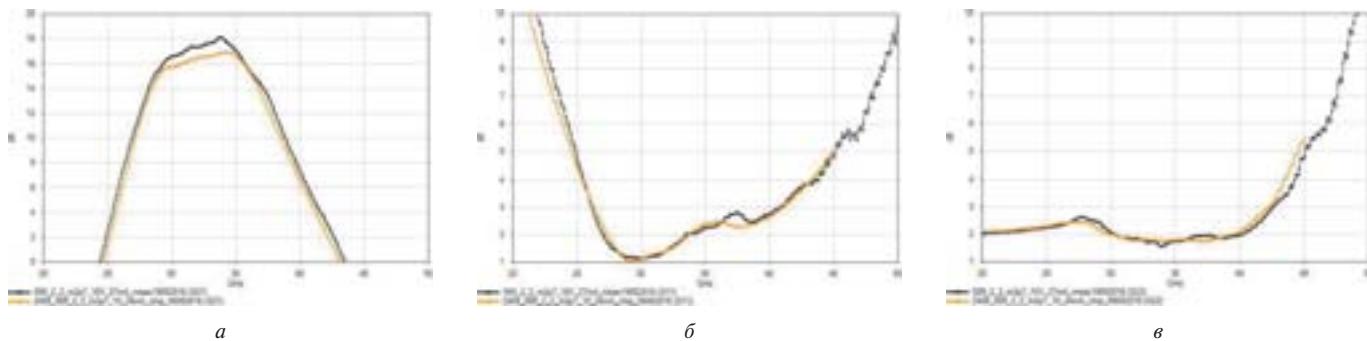


Рис. 9. СВЧ МИС на сапфире. Зависимость коэффициента усиления от частоты (а); зависимость коэффициента стоячей волны по входу от частоты (б); зависимость коэффициента стоячей волны по выходу от частоты (в)

Выход годных кристаллов СВЧ МИС с «воздушными мостами» не уступает выходу годных кристаллов цифровых ИМС.

Как следует из табл. 2, применение метода лазерного управляемого термораскалывания для разделения на кристаллы СВЧ МИС на гетероструктурах AlGaN/GaN, изготовленных на приборных пластинах сапфира, не уступает по уровню выхода годных разделению цифровых ИМС с применением метода дисковой резки, кроме того, существенно снижает ширину реза.

Влияние технологического процесса разделения на электрофизические параметры СВЧ МИС анализировалось по результатам измерений следующих параметров МИС:

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

Измерения электрофизических параметров СВЧ МИС на гетероструктурах AlGaN/GaN проводились непосредственно на пластине до технологического процесса разделения (графики черного цвета на рис. 9) и впоследствии на кристалле после разделения (графики оранжевого цвета на рис. 9). Как видно из графиков (рис. 9а–в), технологические операции утонения и резки пластины сапфира существенно не повлияли на характеристики СВЧ МИС.

Наблюдалось незначительное (в пределах 5–7 %) рассогласование измеренных параметров СВЧ МИС на пластине с аналогичными параметрами, измеренными на уже разделенном согласно технологическому процессу кристалле СВЧ МИС, что объясняется изменением импеданса микрополосковых линий вследствие уменьшения толщины подложки при ее утонении. Конечная толщина подложки СВЧ МИС закладывается при проектировании с учетом рекомендаций технологического процесса резки, вследствие чего измерения параметров МИС до и после резки могут незначительно отличаться.

Наблюдалось незначительное (в пределах 5–7 %) рассогласование измеренных параметров СВЧ МИС на пластине с аналогичными параметрами, измеренными на уже разделенном согласно технологическому процессу кристалле СВЧ МИС, что объясняется изменением импеданса микрополосковых линий вследствие уменьшения толщины подложки при ее утонении. Конечная толщина подложки СВЧ МИС закладывается при проектировании с учетом рекомендаций технологического процесса резки, вследствие чего измерения параметров МИС до и после резки могут незначительно отличаться.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разделении на кристаллы современных СВЧ МИС со сложными конструктивными особенностями на гетероструктурах

AlGaN/GaN, изготовленных на подложках сапфира, в настоящее время требуется учитывать ряд особенностей, которые не позволяют применить напрямую существующие технологии разделения на кристаллы планарных изделий, таких как светоизлучающие диоды, а также предназначенные для таких материалов, как кремний и арсенид галлия.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

1. Предложен метод защиты сверхвысокочастотных монолитных интегральных схем со сложными конструктивными особенностями на гетероструктурах AlGaN/GaN, изготовленных на пластинах сапфира, за счет использования температурно совместимых полимеров, который обеспечивает однородность планаризирующей плоскости и химическую инертность при последовательности операций разделения на кристаллы;
2. Разработан технологический процесс разделения на кристаллы сверхвысокочастотных монолитных интегральных схем на гетероструктурах AlGaN/GaN, изготовленных на пластинах сапфира, который обеспечивает выход годных кристаллов не менее 92 % при сохранении электрофизическими параметров приборов.

Разработанный технологический процесс разделения на кристаллы СВЧ МИС на гетероструктурах AlGaN/GaN, изготовленных на приборных пластинах сапфира, может быть использован в производстве современных СВЧ МИС на основе нитридных наногетероструктур, что с учетом малой ширины реза и высокого выхода годных, способно дать большее количество кристаллов с пластины, а, следовательно, понизить себестоимость отдельной СВЧ МИС. Перечисленные преимущества разработанных решений могут расширить возможности технологических систем производства и повысить качество продукции в области СВЧ электроники на основе нитридных наногетероструктур.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0124, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60715X0124).

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров Ю. В., Михайлович С. В. Перспективы замены арсенидных МИС на нитридные // Нано- и микросистемная техника, 2016. Т. 18. — № 4. — С. 217–226.
2. Федоров Ю., Мальцев П., Матвеенко О., Гнатюк Д., Крапухин Д., Путинцев Б., Павлов А., Зуев А. МИС усилителей со встроенными антенными СВЧ диапазона на наногетероструктурах // Наноиндустрия 2015, № 3. — С. 44–51.

3. Балакирев А., Туркин А. Развитие технологии нитрида галлия и перспективы его применения в СВЧ электронике // Современная электроника 2015, №4. — С. 28–32.
4. Joshin K., Kikkawa T., Masuda S., Watanabe K. *Outlook for GaN HEMT Technology* // Fujitsu Sci. Tech. J. 2014, Vol. 50, №1, pp. 138–143.
5. Burns C., LeFevre M., Mellor M., Runton D. *Advancements in GaN Technology* // European Microwave Conf. Amsterdam, 2012.
6. Persson E. “Höherer Wirkungsgrad Dank Galliumnitrid” // Design & Electronic №11, 2015 p. 25–27.
7. Matheson R. *Making the New Silicon: Gallium Nitride Electronics Could Drastically Cut Energy Usage* // Massachusetts Institute of Technology, MIT news office, 2015, <http://news.mit.edu/2015/gallium-nitride-electronics-silicon-cut-energy-0729>.
8. Pengelly R. S., Wood S. M., Milligan J. W., Sheppard S. T., Pribble W. L. *A Review of GaN on SiC High Electron-Mobility Power Transistors and MMICs* // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, Vol. 60, №6.
9. Крапухин Д. В., Мальцев П. П. «Монолитная интегральная схема малошумящего усилителя на нитриде галлия для диапазона 57–64 ГГц» // Российский технологический журнал. Т. 4. — №4, 2016 г. — С. 42–53.
10. Кривулин Н. О. «Ультратонкие слои кремния на сапфире» // Учебно-методич. пособ. Нижегородский университет 2011 г., 40 с.
11. Debashis De. *“Basic Electronics”* // Dorling Kindersley (India), 2010, 632 стр.
12. Галиев Р. Р., Гнатюк Д. Л., Зуев А. В., Крапухин Д. В., Майтама М. В., Матвеенко О. С., Михайлович С. В., Федоров Ю. В., Щербакова М. Ю. «Нитридные технологии для освоения миллиметрового диапазона длин волн» // Нано- и микросистемная техника №2, 2015 г. — С. 21–29.
13. Иванов В. И. «Методы резки кремниевых приборных пластин на чипы в производстве органических микродисплеев» // Интернет-журнал Науковедение №4 2014 г.
14. Парфенов В. А. «Лазерная микрообработка материалов» // Учеб.пособ. Изд-во СПб ГЭТУ «ЛЭТИ» 2011, 59 с.
15. Alissa M. Fitzgerald, Brent M. Huigens. *How to Dice Fragile MEMS Devices* // Chip Scale Review nov/dec 2011 p. 34–35.
16. Бугаев А. С., Енюшкина Е. Н., Арутюнян С. С., Иванова Н. Е., Глинский И. А., Томош К. Н. Разработка технологии формирования общей земли на активной поверхности монолитной интегральной схемы усилителя мощности на нитридных гетероструктурах // Материалы международной научно-технической конференции “INTERMATIC-2016”. — М.: МИРЭА, 2016. — часть 4. — С. 45–48.
17. Гамкрелидзе С. А., Кондратенко В. С., Стыран В. В., Трофимов А. А., Шаврук Н. В. «Влияние методов резки приборных пластин сапфира и карбида кремния на технико-эксплуатационные параметры монолитных интегральных схем» // Приборы, 2017. — №1. — С. 43–50.
18. Шаврук Н. В., Редькин С. В., Скрипниченко А. С., Трофимов А. А., Иванова Н. Е., Кондратенко В. С., Стыран В. В. «Разделение полупроводниковых пластин из твердого материала на кристаллы». // Материалы Международной научно-технической конференции INTERMATIC МИРЭА 2016 г. — С. 94–96.
19. Трофимов А. А. «Оптимизация толщины подложки приборных пластин сапфира и карбида кремния» // Нано- и микросистемная техника, 2017. — №4. — С. 219–226.
20. Ramm P., Lu J., Taklo M. *“Handbook of Wafer Bonding”* // Wiley-VCH Verlag GmbH&Co, 2012, p. 395.
21. Трофимов А. А. «Защита нитридных СВЧ МИС на пластине для операций шлифования, полирования и резки на кристаллы» // Приборы, 2017. — №5. — С. 37–43.
22. Трофимов А. А. «Режимы шлифования и полирования пластин из сапфира и карбида кремния, содержащих СВЧ монолитные интегральные схемы» // Прикладная физика, 2017, №3. — С. 89–95.
23. Kirstin Forsyth. *“Akribis Air: Innovation in Wafer Lapping and Polishing”* // SEMICON Europa 2014, Grenoble, France, 9 pages.
24. *“Hard Material Thinning Process Development and Full Auto Thinning Machine”* Okamoto Corporation, 2013, 38 pages. Confidential.
25. Kondratenko V. S., Kudzh S. A. “Precision Cutting of Glass and Other Brittle Materials by Laser-Controlled Thermo-Splitting (Review)” // Glass and Ceramics, 2017, Vol. 74, Issue 3–4, pp. 75–81.
26. Кондратенко В. С., Борисовский В. Е., Иванов В. И. «Разделение органических светоизлучающих диодов на кремниевой подложке методом лазерного управляемого термораскалывания» // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России №2 (122) 2014 г. С. 76–81, Изд-во Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас», Москва.
27. Кондратенко В. С., Зобов А. К., Наумов А. С., Лу Хунг-Ту. «Технология прецизионной лазерной резки сапфировых пластин» // Фотоника №2 2015 г. — С. 42–52.
28. Кондратенко В. С., Наумов А. С. Способ резки пластин из хрупких материалов // Патент РФ №2404931 по заявке №2009132338/08 от 28.08.2009. Опубл. 27.11.2010. Бюл. 33.
29. Мальцев П. П., Шаврук Н. В., Трофимов А. А., Кондратенко В. С., Зобов А. К. «Разделение сапфировых пластин толщиной выше 300 мкм на кристаллы». // 6-я Международная Научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения», Сборник трудов // НИЯУ МИФИ, 2015 г. — С. 54–55.
30. Груздов В. В., Колковский Ю. В., Концевой Ю. А. «Контроль новых технологий в твердотельной СВЧ электронике» // Техносфера, Москва, 2016 г., 328 с.
31. Шаврук Н. В., Редькин С. В., Трофимов А. А., Иванова Н. Е., Скрипниченко А. С., Кондратенко В. С., Стыран В. В. «Разделение высокотвердых полупроводниковых пластин сапфира на монолитные интегральные схемы методом лазерного управляемого термораскалывания» // Микроэлектроника, 2017, т. 46, №3. — С. 1–5.
32. Гамкрелидзе С. А., Кондратенко В. С., Стыран В. В., Трофимов А. А., Шаврук Н. В. «Изучение влияния разработанных базовых технологических маршрутов резки приборных пластин сапфира и карбида кремния на выход годных нитридных СВЧ МИС» // Успехи прикладной физики, 2017, №1. — С. 80–85.
33. ОСТ 11 14.1011-99 «Микросхемы интегральные. Системы и методы статистического контроля и регулирования технологического процесса» // Разраб. 22 ЦНИИ Минобороны России, АОЗТ «Электронтест», АОЗТ «Эланг-2», ГУП ЦКБ «Дейтон», исп. Богданов Ю. И., Дорошевич К. К., Иванов А. В., Критенко М. И., Попов В. Н., Подъяпольский С. Б., Рогулин Ю. Ф., Телец В. А., 78 с.
34. ОСТ 11 14.1012-99 «Микросхемы интегральные. Технические требования к технологическому процессу. Система и методы операционного контроля» // Разраб. 22 ЦНИИ Минобороны России, АОЗТ «Электронтест», АОЗТ «Эланг-2», исп. Амирбеков А. А., Дорошевич К. К., Дорошевич В. К., Иванов А. В., Критенко М. И., Краюшкин В. М., Подъяпольский С. Б., Рогулин Ю. Ф., Телец В. А., 71 с.