

УДК 621.382

PACS: 85.40.-e, 85.90.+h

Режимы шлифования и полирования пластин из сапфира и карбида кремния, содержащих СВЧ монолитные интегральные схемы

А. А. Трофимов

В работе проведено исследование режимов производственных операций одностороннего шлифования и полирования подложек приборных пластин сапфира и карбида кремния с целью получения высокого качества обработанной поверхности. При достижении в течение операций шлифования и полирования толщины подложки 150 мкм получено высокое качество поверхности с показателем шероховатости около 2 нм и разбросом по толщине пластины не более 2 мкм.

Ключевые слова: приборные пластины, сапфир, карбид кремния, СВЧ МИС, одностороннее шлифование и полирование.

Введение

Развитие технологии сверхвысокочастотных (СВЧ) приборов на широкозонных полупроводниковых материалах в последнее время привело к существенным практическим результатам и освоению мощных СВЧ-транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС) на нитриде галлия (GaN) в производстве [1–3].

Подложками для СВЧ-транзисторов и МИС на основе нитрида галлия служат, как правило, сапфир и карбид кремния [4]. Требования к качеству подложек все время растут. Это вызывает необходимость поиска новых или модернизации старых методов подготовки подложек [5].

Заметим, что разделению на отдельные кристаллы предшествуют подготовительные операции с т. н. приборной пластиной, например, такие как шлифование и полирование, а также исследование пластины под микроскопом и измерение рельефа при помощи профилометра [6–9].

Шлифование – это процесс, при котором происходит прецизионное удаление материала с образца, в целях получения желаемого размера, качества поверхности или формы поверхности образца.

Основным назначением шлифования обратной стороны пластины является исправление погрешностей их геометрической формы после резки слитка на пластины, частичное удаление нарушенного в процессе резки приповерхностного слоя и получение требуемого класса чистоты.

Для улучшения производительности операции обычно применяется утонение в несколько стадий с постепенным уменьшением размера зерна абразива, что уменьшает нарушенный слой и сокращает длительность последующей полировки.

Важно гарантировать качество изготовленного кристалла. По этой причине внутренние качества кристалла определяются уровнем приповерхностных повреждений, шероховатостью поверхности, разбросом по толщине, формой пластины и прочностью кристалла на разрушение.

Большинство этих параметров зависит от заключительных операций, в первую очередь, от утонения. Поэтому важно изучать эффекты утонения, так же как и дефекты, возникающие в процессе утонения, чтобы, по возможности, максимально идентифицировать и устранить их.

Входные и выходные параметры процесса, которые должны быть проверены в течение или после утонения пластины:

- окончательная толщина пластины;
- разброс по толщине пластины в пределах пластины;
- средняя шероховатость;

Возможности механического утонения пластины непосредственно зависят от материала пластины. До тех пор, пока толщина корпуса изделия продолжает уменьшаться, утонение пластин продолжает оставаться важнейшим этапом в процессе сборки [10].

Трофимов Александр Александрович, младший научный сотрудник.

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН.

Россия, 117105, Москва, Нагорный проезд, 7, стр. 5.

Тел. +7 (906) 051-52-02.

E-mail: aa-trofimov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 11 апреля 2017 г.

© Трофимов А. А., 2017

Цель данной работы заключалась в изучении процесса утонения в интересах получения при этом высокого качества поверхности обратной стороны приборных пластин сапфира и карбида кремния, что является определяющим условием для последующей эффективной резки приборных пластин на кристаллы СВЧ МИС. Для этого определялись оптимальные режимы одностороннего шлифования и полирования приборных пластин со сформированными на них СВЧ МИС.

Определение режимов шлифования и полирования приборных пластин сапфира и карбида кремния

Определение режимов шлифования и полирования обратной стороны приборных пластин сапфира и карбида кремния с изготовленными на них СВЧ МИС [11, 12] производилось на установке РМ 5 компании Logitech, Ltd (Великобритания). Данная установка предназначена для обработки широкого ряда материалов и позволяет осуществлять шлифование и полирование на одной и той же оснастке, меняя лишь абразивные суспензии и шлифовальные/полировальные диски. Обработка приборных пластин на данной установке производится свободным абразивом, что, в отличие от обработки связанным абразивом, налагает ограничения на скорость утонения, но при этом позволяет более гибко выстроить процесс в части нагрузки на пластину. В случае с такими трудно поддающимися обработке материалами, как сапфир и карбид кремния, последнее обстоятельство трудно переоценить ввиду хрупкости обрабатываемого материала.

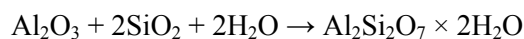
Основная сложность при обработке сапфира и карбида кремния заключается в том, что сапфир и карбид кремния являются твердыми материалами (от 9 до 9+ по шкале Мооса). Кроме того, данные материалы химически стойкие к щелочам и кислотам при комнатной температуре, что делает весьма затруднительным химико-динамическое полирование.

Шлифование приборных пластин сапфира и карбида кремния осуществлялось суспензиями на основе карбида бора В₄С с добавлением этиленгликоля для обеспечения необходимой взвеси абразива. Оставшуюся часть объема суспензии составляла деионизованная вода (10 % В₄С + 10 % этиленгликоль + 80 % деионизованная вода). Применялась чугунная шлифовальная плита, скорость вращения плиты на всех этапах 70 об/мин. При одинаковых условиях карбид кремния обрабатывается вдвое медленнее, что неизбежно приводит к увеличению расхода абразива и трудозатрат. Это связано с тем, что твердость по Моосу у карбида

кремния (9,1 балла) выше, чем у сапфира (9 баллов), и практически не уступает твердости по Моосу карбида бора (9,32 балла), который выступает в качестве обрабатываемого материала.

Постепенное уменьшение размера зерна абразива связано с уменьшением нарушенного слоя, который для таких твердых материалов, как сапфир и карбид кремния, составляет величину, приблизительно равную размеру зерна абразива [13, 14].

Полирование, преследуя цель снятия нарушенного слоя на подложке, неизбежно возникающего в процессе шлифования, выполнялось на нейлоновом полировальном сукне марки Chem-cloth 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:



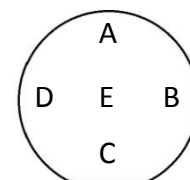
что делает полировку сапфира химико-механическим процессом и позволяет добиться лучшего качества поверхности.

Отличительной особенностью полирования карбида кремния является тот факт, что карбид кремния не взаимодействует с полировальной суспензией SF1, как в случае с сапфиром. Вследствие этого полировка карбида кремния идет крайне медленно, приблизительно на уровне 1,5 мкм/час. Изучив опыт зарубежных исследователей, которые успешно применяют смеси абразивных суспензий с целью улучшения качества обрабатываемой поверхности [15], в полирующую суспензию SF1 для увеличения скорости полировки был добавлен синтетический алмазный порошок марки АСМ фракции 1/0. Скорость полирования возросла приблизительно до 3,5 мкм/час. Полирование при помощи алмазной суспензии предназначено для финишных операций при обработке твердых материалов, что дает существенную экономию при обработке. Кроме того, при добавлении алмазного порошка в полировальную суспензию SF1, мелкодисперсный аморфный оксид кремния, входящий в состав этой суспензии и при высыхании суспензии образующий кристаллы, работающие как абразивный материал при полировке, увлекает в себя частицы алмазного порошка. Тем самым алмазный порошок, связываясь мелкодисперсным аморфным оксидом кремния, образует своего рода свободносвязанный абразив, что положительно сказывается на качестве обрабатываемой поверхности.

Экспресс-метод определения величин, характеризующих геометрическое совершенство формы приборных пластин в течение шлифования и полирования, состоит в измерении их толщины в пяти точках, которые расположены на линиях, параллельных и перпендикулярных базовому срезу (см. рис. 1). Измерения пластины осуществлялись при помощи контактного измерителя толщины CG-10 компании Logitech, Ltd (Великобритания). Этот прибор обладает погрешностью измерений 0,1 мкм при диапазоне 0–10 мм и силе давления контактной иглы 0,6-0,9 Н.

Режимы обработки приборных пластин сапфира и карбида кремния представлены в таб. 1 и 2 соответственно.

Рис. 1. Расположение контрольных точек измерения толщины.



Вне зависимости от длительности обработки более крупным абразивом, при котором сложнее обеспечить высокую однородность толщины по пластине, при переходе на более мелкий абразив не трудно устранить возникшую разнотолщинность при условии соблюдения необходимой геометрии шлифовальной плиты.

Таблица 1

Обработка приборной пластины сапфира

№ этапа	Абразив	Время обработки, мин	Нагрузка на пластину, г/см ²	Толщина пластины после обработки [мкм]				
				A	B	C	D	E
1					449,2		448,9	
2				470,9	469,5	469,8	470,2	470,0
3	В ₄ С 50 мкм	60	150	447,1	448,6	446,7	445,3	446,0
4				404,9	404,5	406,5	405,7	411,0
5				362,5	364,4	361,7	360,5	365,0
6				318,5	319,0	318,7	316,0	317,0
7			252,3	254,6	253,2	250,3	257,0	
8			237,7	235,1	234,8	237,6	240,0	
9			221,6	224,1	223,4	222,4	224,0	
10	В ₄ С 15 мкм	30	200	201,2	201,9	201,8	202,1	204,0
11				183,2	185,4	183,7	183,5	184,0
12	SF1	60	300	161,1	162,3	161,8	161,2	160,0
13					140,8		141,4	

Таблица 2

Обработка приборной пластины карбида кремния

№ этапа	Абразив	Время обработки, мин	Нагрузка на пластину, г/см ²	Толщина пластины после обработки [мкм]						
				A	B	C	D	E		
1					364,5		364,5			
2				403,2	403,9	402,2	403,6	403,5		
3	В ₄ С 15 мкм	30	100	392,0	392,5	390,4	390,0	400,6		
4				374,2	376,9	376,0	373,8	386,0		
5				358,6	361,8	362,8	362,8	364,0		
6		337,0		339,9	336,7	339,0	345,4			
7		309,3		313,4	314,4	311,7	308,6			
8		304,4		304,0	302,8	303,0	308,8			
9		295,1		293,0	292,6	292,2	294,4			
10		278,0		278,2	278,1	277,2	277,3			
11		265,7		265,0	265,7	265,8	265,1			
12		255,1		254,6	255,1	251,7	252,2			
13		244,2		241,2	243,4	242,7	244,0			
14		232,5		231,0	232,3	230,0	230,7			
15		215,0		216,0	217,5	217,0	216,0			
16		201,2		202,1	205,7	203,5	203,6			
17		159,7		155,0	159,5	158,8	158,1			
18		147,2		146,2	148,0	147,7	147,0			
19		SF1+ACM 1/0		90	150	142,3	142,6	144,4	143,8	143,3
20							133,6		134,3	

Первым и последним этапом является измерение на контактных площадках пластины до приклеивания на диск-носитель и после отклеивания соответственно.

При шлифовании приборной пластины карбида кремния отказались от использования грубого абразива с размером зерна 50 мкм. Это связано с тем, что после проведения обработки тестовой пластины при обработке грубым абразивом было выявлено появление глубоких (около 20–30 мкм) царапин на пластине, что может быть объяснено повышенной по сравнению с сапфиром хрупкостью материала карбида кремния. Измерение шероховатости поверхности обработанной обратной

стороны приборной пластины сапфира производилось при помощи Фото с экрана зондового профилометра DektakXT компании Bruker (США), который имеет воспроизводимость менее 5 Å.

Качество поверхности обратной стороны приборных пластин сапфира и карбида кремния после шлифования и полирования проиллюстрировано на рис. 2 и 3 соответственно. При обработке обратной стороны приборных пластин сапфира и карбида кремния с изготовленными на них СВЧ МИС удалось добиться высокого качества обработанной поверхности при конечной толщине пластины до 150 мкм. Кроме того, разброс толщины по пластине не превышает 2 мкм.

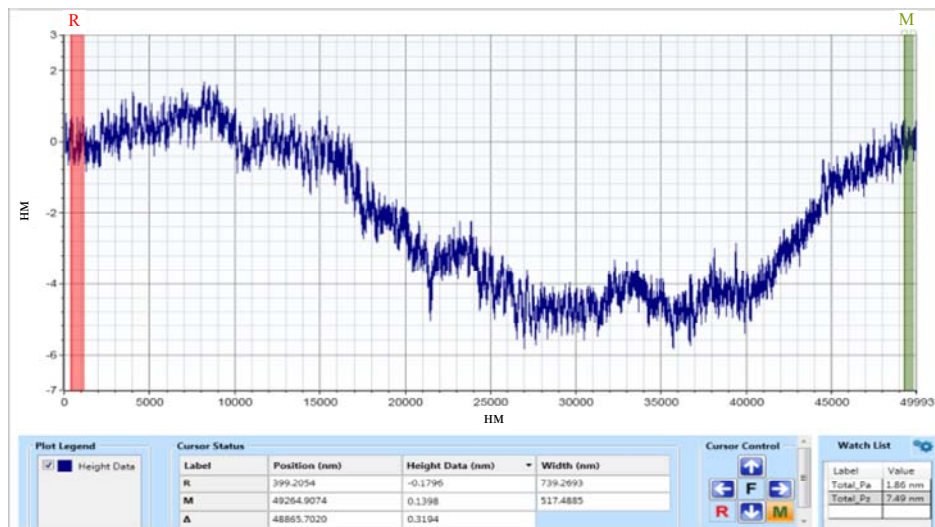


Рис. 2. Фото с экрана зондового профилометра DektakXT. Измерение шероховатости (R_a) обработанной приборной пластины сапфира на длине 45 мкм. $R_a = 1,86$ нм.

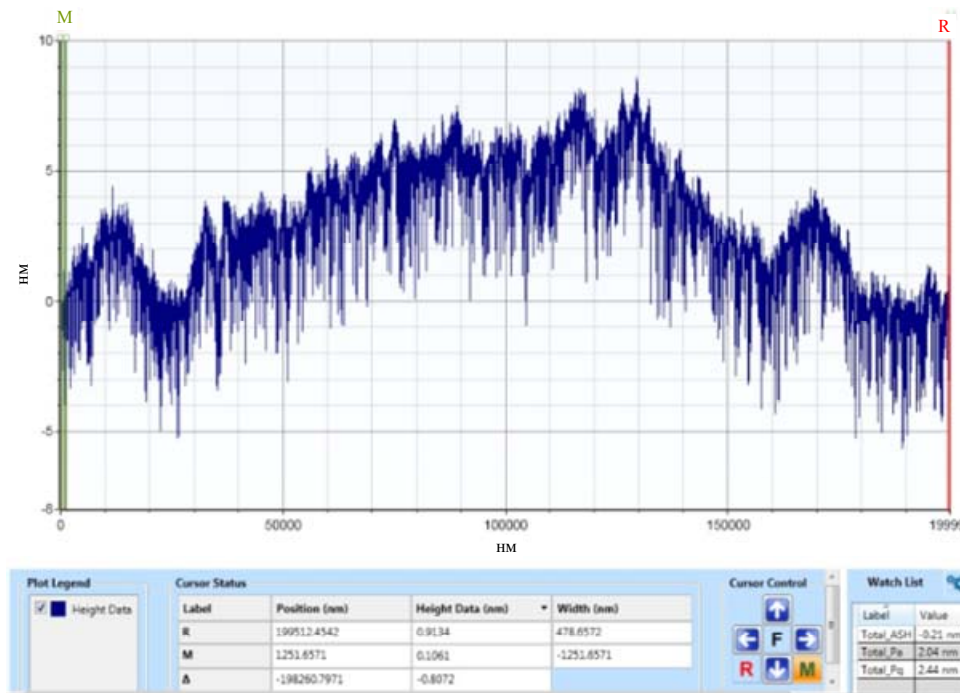


Рис. 3. Фото с экрана зондового профилометра DektakXT. Измерение шероховатости (R_a) обработанной приборной пластины карбида кремния на длине 20 мкм. $R_a = 2,04$ нм.

Заметим, что в России в 2013 году предприятие ЗАО «Светлана-Электронприбор» завершило разработку базового метода выращивания монокристаллов полуизолирующего карбида кремния путем сублимации. Выращенные монокристаллы обрабатываются на линейке, состоящей из самого современного импортного оборудования. Исследования качества получаемых подложек, выполненные в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, показали,

что по комплексу параметров подложки карбида кремния, изготовленные ЗАО «Светлана-Электронприбор», не уступают по качеству аналогичной продукции фирмы CREE (США) [16]. Сравнение полученных результатов в части параметров обработки пластины карбида кремния в ЗАО «Светлана-Электронприбор» и в Институте сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН (т. е. в данной работе) представлено в таб. 3.

Таблица 3

Сравнение параметров обработанной приборной пластины карбида кремния

	Светлана-Электронприбор	ИСВЧПЭ РАН
Материал пластины	SiC	SiC
Размеры пластины, дюйм	до 4	2
Наличие на пластине СВЧ МИС	нет	да
Тип шлифования и полирования	двустороннее	одностороннее
Шлифовальные абразивы	смесь карбида кремния и карбида бора	карбид бора
Размерность абразива, мкм	18–20	15
Полировальные суспензии	алмазная	смесь SF1 и АСМ 1/0
Размерность абразива, мкм	3	1 и менее
Толщина пластины после обработки, мкм	370±50	до 150
Шероховатость поверхности, нм	не более 2	2,04
Разброс толщины по пластине, мкм	не более 1	не более 2

Таким образом, качество поверхности обратной стороны приборных пластин сапфира и карбида кремния после шлифования и полирования практически, достигнутых в данной работе, не уступает лучшим современным отечественным и зарубежным достижениям. Вместе с тем обращает на себя внимание то, что в данной работе уже имелось наличие на обрабатываемых пластинах готовых СВЧ МИС, а сама толщина пластин после обработки менее 150 мкм (против 370 мкм в ЗАО «Светлана-Электронприбор»). Кроме того, шлифование и полирование выполнено в нашем случае односторонним способом (вследствие наличия на пластинах СВЧ МИС). Эти замечания важны, поскольку уменьшение толщины подложки приборных пластин сапфира и карбида кремния способствует более эффективному теплоотведению для СВЧ МИС, сокращает время операции резки приборной пластины на кристаллы, а также снижает износ режущего инструмента. Это в случае разделения на кристаллы приборных пластин из таких твердых материалов, как сапфир и карбид кремния, неизбежно отражается на экономичности операции, что, в конечном итоге, приводит к снижению конечной стоимости готового СВЧ-прибора.

Заключение

Определены режимы одностороннего шлифования и полирования свободным абразивом об-

ратной стороны подложек приборных пластин сапфира и карбида кремния с уже изготовленными на них СВЧ МИС.

Данные режимы обработки позволяют, соблюдая заданный диапазон толщины приборной пластины, получать пластины с разбросом по толщине не превышающем 2 мкм при сохранении высокого качества обработки поверхности с показателем шероховатости около 2 нм.

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

Достигнутое в работе значительное уменьшение толщины подложки приборных пластин сапфира и карбида кремния способствует более эффективному теплоотведению для СВЧ МИС, а также сокращает время последующей операции резки приборной пластины на кристаллы и снижает износ режущего инструмента. Всё это, в конечном итоге, приводит к снижению конечной стоимости готового СВЧ-прибора.

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. // Нано- и микро-системная техника. 2016. Том 18. № 4. С. 217.
2. Галиев Р. Р., Гнатюк Д. Л., Зуев А. В., Крапухин Д. В., Майтама М. В., Матвеев О. С., Михайлович С. В., Федоров Ю. В., Щербакова М. Ю. // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 2. С. 21.
3. Федоров Ю., Мальцев П., Матвеев О., Гнатюк Д., Крапухин Д., Путинцев Б., Павлов А., Зуев А. // Наноиндустрия. 2015. № 3. С. 44.
4. Крапухин Д. В., Мальцев П. П. // Российский технологический журнал. 2016. Том 4. № 4. С. 42.
5. Dobrovinskaya E. R., Lytvynov L. A., Pishchik V. In Book: *Sapphire: Material, Manufacturing, Applications*. – Springer Science + Business Media, LLC. 2009. P. 176.
6. Гамкрелидзе С. А., Кондратенко В. С., Стыран В. В., Трофимов А. А., Щаврук Н. В. // Приборы 2017. № 1. С. 43.
7. Гамкрелидзе С. А., Кондратенко В. С., Стыран В. В., Трофимов А. А., Щаврук Н. В. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 1. С. 80.
8. Щаврук Н. В., Трофимов А. А., Иванова Н. Е., Михалева А. О. / Материалы Международной научно-технической конференции INTERMATIC. МИРЭА. 2015. С. 87.
9. Щаврук Н. В., Редькин С. В., Скрипниченко А. С., Трофимов А. А., Иванова Н. Е., Кондратенко В. С., Стыран В. В. / Материалы Международной научно-технической конференции INTERMATIC. МИРЭА. 2016. С. 94.
10. Marinescu I. D., Uhlmann E., Doi T. K. *Handbook of Lapping and Polishing* – CRC Press, Taylor & Francis Group. 2007.
11. 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.
12. 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.
13. Аникин А. В., Литвинов Ю. М. / ПЭМ-2006: Труды девятой международной научно-технической конференции. Дивноморское, 2006. С. 60.
14. Бритвин А. А. Автореферат дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук – Москва. 2007.
15. Bhagavat S., Liberato J., Kao I. // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2010. Vol. 50. Issue 9. P. 843.
16. Вьюгинов В. Н., Добров В. А., Кириллов А. В., Морозов С. Н., Шифман Р. Г. / Материалы Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – Санкт-Петербург. 2014. С. 176.

PACS: 85.40.-e, 85.90.+h

Modes of lapping and polishing plates made of sapphire and silicon carbide containing microwave monolithic integrated circuits

A. A. Trofimov

Institute of Ultra-High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences
Bld. 5, 7 Nagorny proezd, 117105, Moscow, Russia
E-mail: aa-trofimov@yandex.ru

Received April 11, 2017

Consideration is given to definition of lapping and polishing modes of sapphire and silicone carbide wafers with monolithic microwave integrated circuits (MMIC) to obtain high quality of a processed surface. The thickness of sapphire and silicone carbide wafers was less than 150 microns with the surface roughness of 2 nanometers. The total thickness variation was less than 2 microns. It was achieved by lapping and polishing.

Keywords: sapphire, silicone carbide, wafers, MMIC, lapping, polishing.

REFERENCES

1. Yu. V. Fedorov and S. V. Mikhaylovich, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika* **18** (4), 217 (2016).
2. R. R. Galiev, D. L. Gnatyuk, A. V. Zuev, D. V. Krapuhin, M. V. Maytama, O. S. Matveenko, S. V. Mikhaylovich, Yu. V. Fedorov, and M. Yu. Shcherbakova, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, No. 2, 21 (2015).
3. Yu. Fedorov, P. Maltsev, O. Matveenko, D. Gnatyuk, D. Krapuhin, B. Putincev, A. Pavlov, and A. Zuev, *Nanoindustriya*, No. 3, 44 (2015).
4. D. V. Krapuhin and P. P. Maltsev, *Rossiyskiy Tekhnologicheskiy Zhurnal* **4** No. (4), 42 (2016).
5. E. R. Dobrovinskaya, L. A. Lytvynov, and V. Pishchik, in *Book: Sapphire: Material, Manufacturing, Applications* (Springer Science + Business Media, LLC 2009), p. 176.
6. S. A. Gamkrelidze, V. S. Kondratenko, V. V. Styran, A. A. Trofimov, and N. V. Shchavruk, *Pribory*, No. 1, 43 (2017).

7. S. A. Gamkrelidze, V. S. Kondratenko, V. V. Styran, A. A. Trofimov, and N. V. Shchavruk, *Usp. Prikl. Fiz.*, **5** (1), 80 (2017).
8. N. V. Shchavruk, A. A. Trofimov, N. E. Ivanova, A. O. Mihalev “Razrabotka bazovoy tekhnologii razdeleniya plastin karbida kremniya na kristally metodom diskovoy rezki” // *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii INTERMATIC*, 2015, s. 87–89, MIREA.
9. N. V. Shchavruk, S. V. Redkin, A. S. Skripnichenko, A. A. Trofimov, N. E. Ivanova, V. S. Kondratenko, and V. V. Styran, in *Proc. Conf. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii INTERMATIC, MIREA, 2016*, pp. 94–96.
10. I. D. Marinescu, E. Uhlmann, and T. K. Doi, *Handbook of Lapping and Polishing* (CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007).
11. Yu. V. Fedorov and M. V. Maytama, *Topologiya IMS Integralnyy maloshumyashchiy usilitel dlya diapazona chastot 8–12 GHz* (Svidetelstvo o gosudarstvennoy registracii 2016630103 ot 19.08.2016).
12. Yu. V. Fedorov and M. V. Maytama, *Topologiya IMS Integralnyy usilitel moshchnosti dlya diapazona chastot 8–12 GHz* (Svidetelstvo o gosudarstvennoy registracii 2016630104 ot 19.08.2016).
13. A. V. Anikin and Yu. M. Litvinov, *Issledovanie mekhanicheskikh svoystv salfira razlichnoy orientacii* (PEHM-2006 Trudy devyatoy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii – Divnomorskoe, 2006), pp. 60–63.
14. A. A. Britvin, Avtoreferat Diss. PhD. (05.27.2006, Moskva, 2007).
15. S. Bhagavat, J. Liberato, and I. Kao, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **50**, 843 (2010).
16. V. N. Vyuginov, V. A. Dobrov, A. V. Kirillov, S. N. Morozov, and R. G. Shifman, in *Proc. Conf. Materialy Vserossiyskoy konferencii Elektronika i mikroelektronika SVCH*, (Sankt-Peterburg, 2014), pp. 176–181.