

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 621.923
doi: 10.30987/2782-5957-2022-4-17-22

ВЛИЯНИЕ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ПЛАСТИН ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛИТИПОВ

Сергей Геннадьевич Бишутин^{1✉}, Сергей Сергеевич Алехин²

^{1,2} Брянский государственный технический университет, Россия, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7.

¹ e-mail: nad-bisch@yandex.ru ; ORCID: G-2386-2016.

² e-mail: salekhin@outlook.com ; ORCID: 2-5763-5539.

Аннотация

Исследования направлены на снижение брака при производстве полупроводниковой продукции на основе карбида кремния, что достигается путем изучения влияния технологических режимов обработки свободным абразивом (алмазным микропорошком в специальной пасте) на трещиностойкость карбидокремниевых пластин.

Представлены результаты алмазно-абразивной обработки пластин из карбида кремния политипов 4Н и 6Н. Исследованы размеры поверхностных микротрещин керамических подложек после механической обработки пастами с алмазным порошком различной зернистости, а также установлена взаимосвязь между длиной поверхностной

микротрещины и скоростью съема материала, зависящей от технологических режимов алмазно-абразивной обработки.

Впервые предложен научно обоснованный подход к выбору режимов алмазно-абразивной обработки карбидокремниевых пластин различных политипов, при которых формируемые микротрещины не способны привести к разрушению изделия на последующих технологических этапах изготовления полупроводниковой продукции.

Ключевые слова: трещиностойкость, карбидокремниевые пластины, алмазно-абразивная обработка, качество, поверхность.

Ссылка для цитирования:

Бишутин С.Г. Влияние абразивной обработки на трещиностойкость пластин из карбида кремния различных политипов / С. Г. Бишутин, С. С. Алехин // Транспортное машиностроение. – 2022. - № 4. – С. 17–22 . doi: 10.30987/2782-5957-2022-4-17-22.

Original article
Open Access Article

THE INFLUENCE OF ABRASIVE TREATMENT ON THE CRACK RESISTANCE OF SILICON CARBIDE PLATES OF VARIOUS POLYTYPES

Sergey Gennadievich Bishutin^{1✉}, Sergey Sergeevich Alekhin²

^{1,2} Bryansk State Technical University, 7, 50-let Oktyabrya Boulevard, Bryansk, Russia.

¹ e-mail: nad-bisch@yandex.ru ; ORCID: G-2386-2016.

² e-mail: salekhin@outlook.com ; ORCID: 2-5763-5539.

The study is aimed at reducing defects in the manufacture of semiconductors made of silicon carbide, which is achieved by studying the effect of technological modes of machining with loose abrasive (diamond micro-powder in a special paste) on the crack resistance of silicon carbide plates.

The results of diamond abrasive treatment of silicon carbide plates of 4H and 6H polytypes are given. The dimensions of surface micro cracks of ceramic substrates after machining with diamond powder pastes of various grit are studied, and the interconnection be-

tween the length of the surface micro crack and the material removal rate, depending on the technological modes of diamond abrasive treatment, is established.

For the first time, a scientifically based approach to choosing modes of diamond abrasive treatment of silicon carbide plates of various polytypes is proposed, in which appearing micro cracks are not capable of destroying the product at the subsequent technological stages of manufacturing semiconductors.

Keywords: crack resistance, silicon carbide plates, diamond abrasive treatment, quality, surface.

Reference for citing:

Bishutin S.G., Alekhin S.S. The influence of abrasive treatment on the crack resistance of silicon carbide plates of various polytypes. - Transport Engineering. – 2022 – P. 17 -22 . doi: 10.30987/2782-5957-2022-4-17-22.

Введение

Для изготовления большинства современной полупроводниковой продукции на основе карбида кремния, используемой в различных машинах и приборах, требуются монокристаллические пластины определенного политипа. Так, например, 4Н-политип характеризуется наибольшей шириной запрещенной зоны, что позволяет изготавливать на его основе полупроводниковые приборы, обладающие высоким пробивным напряжением. На основе керамического материала 4Н-SiC изготавливаются силовые и высокочастотные приборы (транзисторы биполярные и полевые, быстросовстнавливающиеся диоды и диоды Шоттки). Керамические подложки политипа 6Н близки по своим электрическим и механическим свойствам с 4Н керамикой, однако из-за большей теплопроводности и подвижности электронов нашли применение главным образом при произ-

водстве силовых микросхем и светодиодов.

Из-за высокой твердости керамических подложек обоих политипов их механическую обработку выполняют преимущественно свободным абразивом с малой производительностью. Однако, в ходе даже такой обработки дорогостоящая керамика может значительно растрескиваться, образуя поверхностные микротрещины, приводящие к дальнейшему разрушению пластин на различных технологических операциях производства полупроводниковых приборов [1]. Изучение влияния условий обработки на качество поверхностного слоя и трещиностойкость карбидокремниевых заготовок позволит выбрать режимы алмазного шлифования, которые не приведут к разрушению керамических пластин. В этой связи данное исследование является актуальным.

Условия и результаты абразивной обработки пластин из карбида кремния политипов 4Н и 6Н

Алмазно-абразивная обработка карбидокремниевых пластин представляет собой шлифование исходных подложек толщиной не более 400 мкм до толщины 250 ± 20 мкм на установке по обработке сверхтвердых материалов. Керамические образцы приклеиваются на цилиндрическую планшайбу, которая в свою очередь устанавливается на стеклянный притир, вращающийся с определенной частотой. На притир наносится свободный абразив в виде пасты с синтетическими алмазами

различной зернистости. Каждый последующий этап механической обработки характеризуется уменьшением зернистости абразивного порошка в составе применяемой пасты. Для увеличения производительности абразивной обработки планшайбу дополнительно нагружают грузами определенной массы. Внешний вид наклеенных керамических образцов на планшайбе, а также установки для обработки исследуемых материалов представлены на (рис. 1).



Рис. 1. Наклеенные на планшайбу керамические образцы (слева), установка по обработке сверхтвердых материалов (справа)

Fig. 1. Ceramic samples glued on a faceplate (left), installation for processing superhard materials (right)

Абразивно-алмазная обработка пластин из карбида кремния политипа 4Н и 6Н выполнялась по идентичному технологическому маршруту на установке ЮФ 113203. Фотографирование поверхностных слоев и определение размеров поверхностных микротрещин осуществлялось с помощью цифрового 3-D микроскопа VHX-1000E и растрового электронного микроскопа Jeol JSM 6610. Подробное описание

условий проведения и технологического оснащения операций абразивной обработки карбидокремниевых пластин представлено в источниках [2, 3].

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице.

Внешний вид нарушенного слоя с поверхностными микротрещинами пластины из карбида кремния политипа 6Н представлены на (рис. 2).

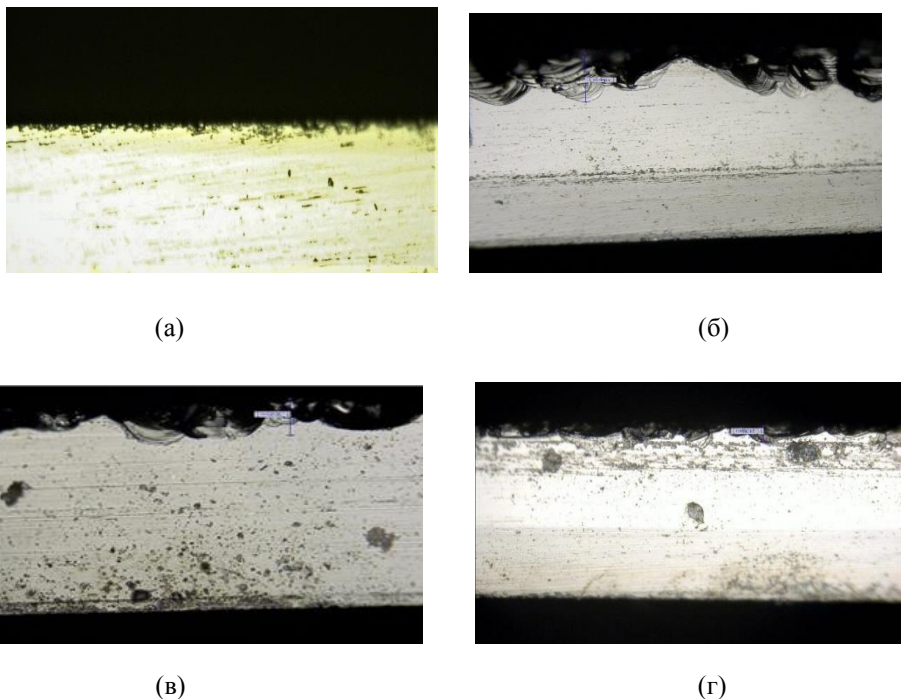


Рис. 2. Микрофотографии нарушенного слоя образцов пластин из карбида кремния (а – после скрайбирования пластин, б - обработка пастой АСМ 60/40, в - обработка пастой АСМ 40/28, г - обработка пастой АСМ 28/20)

Fig. 2. Micrographs of the damaged layer of samples of silicon carbide wafers (a - after scribing of the plates, b - treatment with ACM 60/40 paste, c - treatment with ACM 40/28 paste, d - treatment with ACM 28/20 paste)

Фотографии дефектных слоев, сформированных при алмазном шлифовании пластин из керамики политипа 4Н различ-

ными абразивными пастами, представлены на (рис. 3).

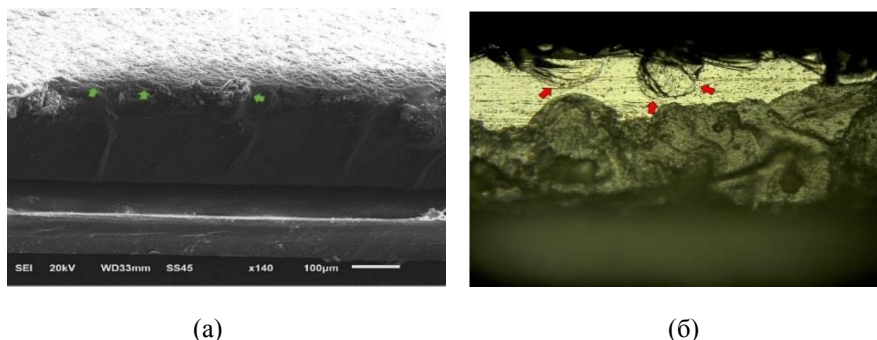


Рис. 3. Поверхностные микротрещины карбидокремниевой пластины (а – обработка пастой АСМ 60/40, б – обработка пастой АСМ 40/28)

Fig. 3. Surface microcracks of silicon carbide plate (a – treatment with ACM 60/40 paste, b – treatment with ACM 40/28 paste)

Таблица

Режимы обработки и размеры L микротрещин пластин из карбида кремния различных политипов

Table

Machining modes and dimensions L of microcracks in silicon carbide plates of various polytypes

Режим обработки пластин			Карбид кремния политипа 4Н		Карбид кремния политипа 6Н	
Абразивный материал	F , Н	n , мин ⁻¹	q , мкм/ч	L , мкм	q , мкм/ч	L , мкм
АСМ 60/40	87	50	20,0	75-90	22,0	90-105
		35	19,2		20,3	
		24	11,7	65-75	13,7	80-90
АСМ 40/28	87	42	14,0	50-60	15,2	50-70
		35	12,0	40-50	12,5	45-60
		24	7,8	35-45	8,5	35-55
АСМ 28/20	87	35	8,7	20-30	9,2	25-40
	40	35	5,0	10-20	5,5	10-30
	40	26	4,5	10-20	5,0	10-30

Примечание: F – дополнительное усилие прижима на карбидокремниевые пластины; n – частота вращения инструмента; q – скорость съема материала; L – размеры поверхностных микротрещин

В ходе исследований установлено, что величина дефектного слоя после скрайбирования (нанесения надрезов) карбидокремниевых пластин и формирования экспериментальных образцов не превышала 4 мкм. Алмазное шлифование керамики пастой АСМ 60/40 позволило получить максимальную производительность процесса при дополнительном усилии прижима карбидокремниевых образцов к планшетке $F=87$ Н (см. таблицу 1). Однако при данном режиме механической обработки керамики было зафиксировано образование микротрещин максимальных размеров (100 мкм и более) (рис. 2 б и 3 а). Уменьшение зернистости абразивной пасты на последующем этапе обработки привело к снижению производительности процесса до 8-15 мкм/ч, и значительному снижению

размеров поверхностных микротрещин для керамики обоих политипов. Заключительная обработка пластин пастой зернистостью АСМ 28/20 без дополнительного нагружения позволила получить лучший результат в отношении качества получаемого поверхностного слоя обрабатываемых подложек. При этом размер микротрещин не превышал 17...20 мкм (рис. 2 г), а производительность обработки снизилась до 4...5 мкм/ч.

Таким образом, на размер формируемых в поверхностных слоях микротрещин оказывают наибольшее влияние: размер зерна алмазного микропорошка абразивной пасты, дополнительное усилие прижима пластин к притиру F , а также скорость съема материала q с заготовки.

Выбор режимов абразивной обработки карбидокремниевых пластин с учетом их трещиностойкости

Результаты исследований показали, что увеличение зернистости алмазных зерен в пасте и повышение нагрузки на заготовки, приводит к значительному растрескиванию пластин и возникновению микротрещин в их поверхностных слоях, размер которых в отдельных случаях достигает

0,1...0,12 мм. Возникновение микротрещин в пластине может привести к разрушению дорогостоящих керамических подложек на последующих технологических операциях высокотемпературного отжига. Для предотвращения этого можно рекомендовать следующий подход к выбору

режимов абразивной обработки карбидокремниевых пластин.

Трещиностойкость карбидокремниевых пластин с микротрещинами можно охарактеризовать коэффициентом K_C интенсивности напряжений в зонах трещин. В этой связи длину L_T микротрещины, приводящей к разрушению карбидокремниевой пластины, можно определить, используя результаты исследований [2, 4]:

$$L_T = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_C}{k_b \sigma_n} \right)^2, \quad (1)$$

где k_b – безразмерная поправочная функция, учитывающая отношение длины L_T трещины к ширине пластины; σ_n – растягивающие напряжения, действующие на

σ_n , МПа	150	200	250	300
L_T , мм	0,22	0,12	0,08	0,05.

В ходе анализа экспериментальных данных (см. табл.) установлено, что между длиной L поверхностных микротрещин и скоростью q съема материала существует линейная корреляционная зависимость $L=kq$, где k – коэффициент пропорциональности ($k=3,5$ для карбида кремния политаипа 4Н и $k=4,0$ для 6Н керамики). Поэтому выбор режима абразивной обработки, обеспечивающего требуемую скорость съема материала без разрушения подложек пластин, возможен при выполнении следующих неравенств:

– для пластин из карбида кремния политаипа 4Н

$$L = 3,5q < L_T; \quad (2)$$

Заключение

На основании проведенных исследований впервые предложен научно обоснованный подход к выбору технологических режимов абразивной обработки пластин из карбида кремния различных политаипов, при которых формируемые микротрещины не способны привести к разрушению изделия на последующих стадиях изготовления полупроводниковой продукции.

Размеры поверхностных микротрещин после абразивного шлифования пластин из карбида кремния политаипа 6Н превышают размеры трещин пластин из керамики политаипа 4Н при одинаковых режимах обработки на 15...20 %, что может

пластину при изготовлении керамических изделий; K_C – коэффициент интенсивности напряжений в зонах трещин.

Практика изготовления карбидокремниевых пластин в АО «Группа Кремний Эл» показала, что растягивающие напряжения, возникающие при высокотемпературной обработке, могут составлять $\sigma_n=125\div 300$ МПа. При известном значении коэффициента $K_C=3,5\div 5$ МПа·м^{1/2} по формуле (1) можно рассчитать размер L_T микротрещин, возникающих при алмазно-абразивной обработке, которые приведут к разрушению карбидокремниевой подложки при различных растягивающих напряжениях σ_n [3]:

– для пластин из карбида кремния политаипа 6Н

$$L=4,0q < L_T, \quad (3)$$

где L – длина поверхностной микротрещины, формируемой в ходе абразивного шлифования пластины со скоростью съема материала q .

Следует отметить, что скорость съема материала q при алмазно-абразивной обработке карбидокремниевых пластин зависит от политаипа обрабатываемого материала, технологических режимов (см. таблицу 1) и возрастает с увеличением скорости вращения инструмента и усилия его прижатия к заготовке.

быть из-за более высоких температур при выращивании монокристалла политаипа 6Н и больших значений соотношения «кремний-углерод» в газовой фазе.

На трещиностойкость изделий из карбида кремния оказывают наибольшее влияние размер зерна алмазного микропорошка абразивной пасты, величина дополнительного усилия прижима пластин к притиру, а также скорость съема материала при заданной частоте вращения инструмента.

Заключительные этапы алмазной абразивной обработки пластин обоих политаипов рекомендуется выполнять с исполь-

зованием паст АСМ 28/20 без дополнительного нагружения пластин с частотой вращения притира, не превышающей 30 мин⁻¹. В результате чего длина микротрещин будет в пределах 10-30 мкм, что в последующем позволит получить кристаллы без критических дефектов и обеспечит получение заданных электрических параметров изделия.

На основе выполненных исследований появляется возможность научно обоснованного выбора условий и режимов алмазной абразивной обработки пластин из карбида кремния различных политипов, обеспечивающих целостность их керамических подложек при изготовлении полупроводниковой продукции и требуемый уровень производительности процесса шлифования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Душко О.В., Шумячер В.М. Алмазное шлифование карбидокремниевой керамики для машиностроения. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2009. 80 с.
2. Бишутин С.Г., Алехин А.А. Выбор технологических режимов алмазно-абразивной обработки пластин из карбида кремния. Научные технологии в машиностроении. 2020;12(114):3-6. doi: 10.30987/
3. Бишутин С.Г., Алехин А.А. Технологическое обеспечение трещиностойкости пластин из карбида кремния при алмазно-абразивной обработке. Вестник машиностроения. 2021;4:46-48. doi: 10.36652/0042-4633-2021-4-46-48
4. Крайнев А.Ф., Гусенков А.П., Болотин В.В. Конструирование машин / под ред. К.В. Фролова / М.: Машиностроение, 1994. Т.2 – 624 с.
1. Dushko OV, Shumyacher VM. Diamond grinding of silicon carbide ceramics for mechanical engineering. Volgograd: VolgGASU; 2009.
2. Bishutin SG, Alehin AA. Technological mode choice for silicon carbide plate diamond abrasion. Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2020;12(114):3-6. doi: 10.30987/
3. Bishutin SG, Alehin AA. Technological support of crack resistance of silicon carbide plates during diamond abrasion. Vestnik Mashinostroeniya. 2021;4:46-48. doi: 10.36652/0042-4633-2021-4-46-48
4. Krainev AF, Gusenkov AP, Bolotyn VV. Machine construction. In: Frolova KV, editor. Moscow: Mashinostroenie; 1994.

Информация об авторах:

Бишутин Сергей Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автомобильный транспорт», тел.: 8-483-256-09-95. Scopus-Author ID: 8912536800, Research- ID: G-2386-2016, Author-ID-РИНЦ: 174978.

Алехин Сергей Сергеевич, аспирант кафедры «Технология машиностроения», тел. 8-483-256-09-95. Research- ID: 2-5763-5539.

Bishutin Sergey Gennadievich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Motor Transport, phone: 8-483-256-09-95. Scopus-Author ID: 8912536800, Research- ID: G-2386-2016, Author-ID- RSCI: 174978.

Alekhin Sergey Sergeevich, Post-graduate student of the Department of Transport Engineering, phone: 8-483-256-09-95. Research- ID: 2-5763-5539.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 17.02.2021; одобрена после рецензирования 04.03.2022; принята к публикации 21.03.2022. Рецензент – Кириллов О.Н., доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Воронежского государственного технического университета.

The article was submitted to the editorial office on 17.02.2021; approved after review on 04.03.2022; accepted for publication on 21.03.2022. The reviewer is O.N. Kirillov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport Engineering at Voronezh State Technical University.