

Исследование влияния абразивной обработки на процесс образования дефектов в кристаллах сапфира

Ю.В. Клунникова

*Южный федеральный университет,
Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, Таганрог*

Аннотация: В статье представлены результаты исследования влияния абразивной обработки на процесс образования дефектов в кристаллах сапфира. На основании полученных результатов выработаны рекомендации по определению свойств приповерхностных слоев сапфира и усовершенствованию качества кристалла. Исследования влияния абразивной обработки на процесс образования дефектов в кристаллах сапфира позволяют выбрать оптимальные режимы процесса получения изделий из монокристаллов сапфира.

Ключевые слова: сапфир, абразивная обработка, дефект, оптимальный режим, трещина, приповерхностный слой, шлифование, полирование.

Для обработки поверхности сапфира, соответствующей требованиям к подложкам в микроэлектронике, необходимо проводить обработку в несколько этапов с уменьшением размера абразива. При этом на начальных этапах абразивной обработки сапфира применяется инструмент со связанным абразивом, затем свободный абразив различной зернистости [1].

После любой абразивной обработки остается нарушенный слой той или иной глубины, который образуется в результате воздействия зерен на обрабатываемую поверхность. Под нарушенным слоем подразумевают [1-4] слой, распространяющийся от обработанной поверхности пластин и кристаллов вглубь и состоящий из следующих зон: I – наружной рельефной, состоящей из хаотически расположенных выступов и впадин, II – одиночных невыкрошившихся “выколок” и идущих вглубь микротрещин (так называемый трещиноватый слой) и III – зоны деформированного монокристалла, состоящей из скоплений дислокаций и дислокационных петель, являющихся продолжением трещин и расположенных вокруг них зон упруго-деформированного монокристалла. Ниже нарушенного слоя расположен неповрежденный после обработки кристалл.

Для монокристаллов сапфира последовательность образования трещин следующая. При нагружении индентора сначала появляются радиальные трещины, увеличивающиеся с ростом нагрузки, затем медианные, которые могут слиться с радиальными при компланарных условиях. Последними появляются боковые трещины, почти параллельные поверхности сапфира, которые при дальнейшем увеличении нагрузки выходят на поверхность и приводят к скалыванию материалов. При соотношении $C/a \geq 2$ (C – длина трещины, a – полудиагональ отпечатка индентора) получены следующие выражения для длин трещин [5, 6]:

$$C_R \approx \frac{F_1^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{1}{4}} \cdot K_{IC}^{\frac{1}{3}}}; C_L \approx \left(\frac{F_1}{K_{IC}} \right)^{\frac{3}{4}}, \quad (1)$$

где C_R и C_L – длины радиальных и боковых трещин соответственно, F_1 – нагрузка на единичное зерно, K_{IC} – трещиностойкость сапфира, H – твердость.

Известно [5], что на единице поверхности шлифовальника площадью 1 см^2 находится 10^5 алмазных зерен и при общей нагрузке около 1 Н на одно зерно приходится нагрузка около 10^{-5} Н.

На основании работ [5, 7] получена зависимость между зоной пластической деформацией S ($C_R \gg S$) вокруг отпечатка индентора при вдавливании сферы и длиной радиальных трещин C_R :

$$S = \frac{F_1 \cdot (1 - 2\nu)}{K_{IC} \sqrt{2\pi^5 C_R}}. \quad (2)$$

При взаимодействии абразива и поверхности материала в определенных условиях образуются трещины всех указанных типов не только при вдавливании инденторов, но и при царапании абразивными зернами.

Для прогнозирования показателей процессов массового воздействия абразивными частицами при обработке монокристаллов сапфира автором исследована возможность использования закономерностей микроразрушения монокристаллов сапфира единичным зерном абразива. На основании выражений (1) – (2) для монокристаллов сапфира получены следующие значения: $C_R = 0.1068$ нм, $C_L = 1.566$ нм, $S = 3.172$ нм.

В работе рассмотрено влияние параметров абразивной обработки сапфира на глубину слоя с повышенной плотностью дислокаций на основании модели, предложенной Е. И. Райхельсом и М. А. Ромом [8]. Автором рассматривался схематический случай обработки свободным абразивом.

Как показано в работе [8], где используется модель Хилла, основывающаяся на идее приближенного метода анализа процессов обработки материалов, глубина внедрения сферического зерна в кристалл a и величина зоны пластичности S являются характеристическими величинами кристалла, которые связаны друг с другом соотношением

$$\frac{(k)^3}{1 + 3 \ln(k)} = \frac{2}{9(1 - \nu)} \frac{E}{H}, \quad (3)$$

где ν – коэффициент Пуассона, E – модуль Юнга, H – микротвердость.

На основании выражения (3) графическим путем найдено значение $S/a = k$ для кристаллов сапфира (аналогично работе [8]), затем определена величина зоны пластичности. Для монокристаллов сапфира величина зоны деформации кристалла, рассчитанная автором статьи по данному методу, составляет 3.865 нм, что согласуется с результатами, полученными ранее.

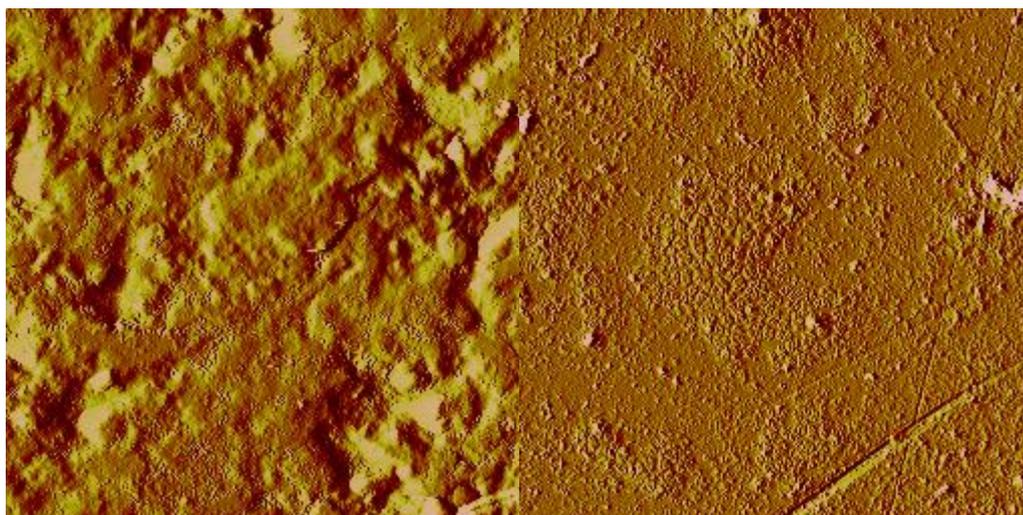
При длительном шлифовании, когда в каждый момент времени на кристалл одновременно действует большое количество зерен, конечная дислокационная структура приповерхностного слоя сапфира определяется

динамическим равновесием между скоростью сошлифования кристалла и скоростью образования новых дислокаций.

С целью уменьшения количества внешних приповерхностных дефектов сапфира в работе проводилась обработка поверхности сапфира абразивом и исследование влияния различных инструментов и способов обработки на состояние поверхности сапфира.

Поверхности образцов исследовались методом атомно-силовой микроскопии (далее АСМ). Результаты обработки образцов сапфира алмазными порошками АСМ 28/20 и АСМ 1/0 приведены на рисунках 1, 2.

На рисунке 1 представлены профили типичных шероховатостей поверхности сапфира: слева – после шлифовки (результат ~ 1000 нм), справа – после полировки (результат ~ 100 нм).



а

б

Рис. 1 – Микрофотографии поверхности сапфира после обработки алмазным порошком АСМ 28/20 (а) и АСМ 1/0 (б)

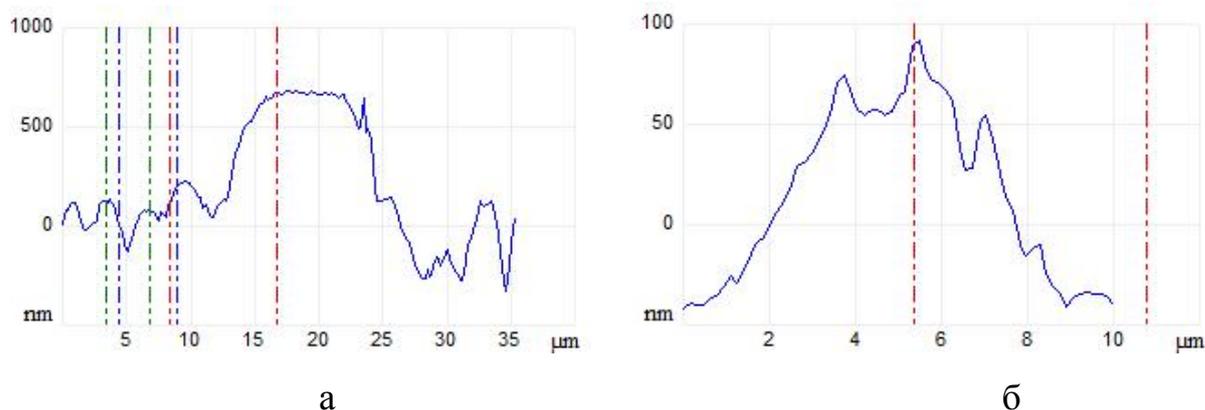


Рис. 2 – Параметры поверхности сапфира обработки алмазным порошком АСМ 28/20 (а) и АСМ 1/0 (б)

Для удаления верхнего дефектного приповерхностного слоя сапфира в работах [2, 9] предложены модели процессов съема материала с пластин полупроводниковых и диэлектрических материалов свободным абразивом для получения бездефектного приповерхностного слоя монокристаллов сапфира.

В основе моделей Бритвина А.А. [2] лежит представление о хрупком разрушении твердых тел под действием концентрированных нагрузок абразивных частиц – инденторов на обрабатываемый материал. В модели Бритвина А.А. [2] процессов съема материала абразивом рассчитывается максимальная глубина проникновения медианных и радиальных трещин в материал при воздействии абразива остроугольной формы на поверхность обрабатываемого материала. Глубина приповерхностного поврежденного слоя имеет следующее выражение [2]:

$$c = \left[4\alpha\beta R_3^2 \left(1 + \left(\frac{H_s}{H_c} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-2} (H_s \cdot E)^{\frac{1}{2}} K_{Ic}^{-1} \right]^{\frac{2}{3}}, \quad (4)$$

где α и β константы, равные, соответственно, 0,016 и π , а E , H_s и K_{Ic} , – соответственно модуль упругости, твёрдость и трещиностойкость обрабатываемого материала, H_c – твёрдость контртела (шлифовальника), R_3 – средний радиус абразивных частиц.

Особенностью модели съема материала абразивом является учёт механических свойств контртела – шлифовальника при двухстороннем шлифовании свободным абразивом.

Данные по механическим свойствам сапфира для расчета глубины приповерхностного поврежденного слоя и глубины образования боковых трещин сапфира брали из литературных источников [2, 9-14].

Автором рассчитана глубина приповерхностного поврежденного слоя (s) и глубина залегания формируемых при абразивной обработке сапфира боковых трещин ($h_{бок.тр.}$) по формулам автора [2] с учетом параметров обработки для пластин сапфира ориентации (0001) двусторонним шлифованием (ДСШ) свободным абразивом карбида бора.

На рисунке 3 представлена зависимость влияния радиуса абразива на глубину приповерхностного поврежденного слоя

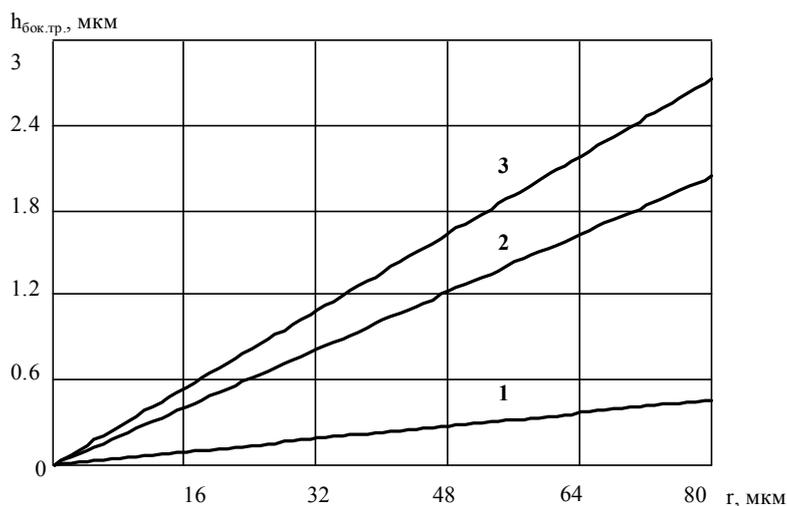


Рис. 3 – Влияние радиуса абразива на глубину приповерхностного поврежденного слоя (материал шлифовальника: 1 – латунь, 2 – чугун, 3 – стекло)

В результате проведенных исследований процессов абразивной обработки кристаллов сапфира удалось согласовать расчет параметров обработки сапфира с моделями процессов съема материала с пластин полупроводниковых и диэлектрических материалов свободным абразивом работы [2]. Полученные результаты были использованы для разработки экспериментальной технологии обработки подложек из сапфира.

Таким образом, для уменьшения количества дефектов сапфира в приповерхностном слое проведены экспериментальные исследования механической обработки поверхности сапфира. Расчетным путем получены данные о глубине нарушенного слоя в сапфире. Исследованы механизмы появления приповерхностных дефектов и трещин в кристаллах сапфира, что служит основой для оптимизации процессов обработки кристаллов сапфира. На основании полученных результатов выработаны рекомендации по определению свойств приповерхностных слоев сапфира, усовершенствованию качества кристалла.

Результаты получены с использованием оборудования Научно-образовательного центра «Лазерные технологии», Центра коллективного пользования и Научно-образовательного центра «Нанотехнологии», Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (г. Таганрог).

Статья написана в рамках выполнения проекта ФЦП Россия № 14.587.21.0025. Уникальный идентификатор проекта RFMEFI58716X0025.

Литература

1. Бочкин О.И., Брук В.А., Никифорова-Денисова С.Н. Механическая обработка полупроводниковых материалов. Москва: Высшая школа, 1977. 152 с.

2. Бритвин А.А. Моделирование процессов механической обработки пластин полупроводниковых и диэлектрических материалов свободным абразивом. Москва: автореф. дис. канд. техн. наук, 2007. 28 с.
 3. Шульга Г.И., Скринников Е.В., Шульга Т.Г. Оценка эффективности водорастворимых технологических смазочных средств при алмазно-абразивной обработке материалов на машине трения СМЦ-2 // Инженерный вестник Дона, 2014, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2014/2561/.
 4. Дровников А.Н., Валюкевич Ю.А., Трифонов А.В. Исследование динамической характеристики установки для струйной обработки поверхности // Инженерный вестник Дона, 2013, №1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1544/.
 5. Карбань В.И., Борзаков Ю.И. Обработка монокристаллов в микроэлектронике. Москва: Радио и связь, 1988. 104 с.
 6. Evans A.G., Wilshau T.R. Gaussi-static particle damage in brittle solids: observations, analysis and implications. Acta Met. 1976. Vol. 24. № 10. pp. 936-956.
 7. Kirchner H.P., Ragosta J.A. Relation of load to radial crack length for spherical indentations in hot-pressed ZnS // Amer. Ceram. Soc. 1983. Vol. 66. № 4. pp. 293-296.
 8. Райхельс Е.И., Ром М.А. Влияние параметров абразивной обработки на степень искаженности поверхностного слоя монокристаллов // Физика и химия обработки материалов. 1980. № 2. С. 96-98.
 9. Аникин А.В., Литвинов Ю.М. Рентгеновская диагностика структуры и глубины повреждений в механически обработанных пластинах сапфира // Известия вузов. Электроника. 2006. № 6. С. 89-90.
 10. Арндаренко А.А., Голодаева Н.Л., Литвинов Ю.М., Цыпленков И.Н. Глубина и структура повреждений в пластинах GaP, полученных методом многопроволочной резки // Известия вузов. Электроника. 2005. № 2. С. 32-35.
-

11. Соловей В.В., Литвинов Ю.М. Диагностика субмикронных приповерхностных повреждений в пластинах кремния после двухстороннего химико-механического полирования // Известия вузов. Электроника. 2005. № 6. С. 32-35.

12. Соловей В.В., Литвинов Ю.М., Хохлов А.И., Яковлев С.П. Процесс двухстороннего химико-механического полирования пластин кремния // Известия вузов. Электроника. 2004. № 6. С. 26-30.

13. Бритвин А.А., Литвинов М.Ю., Литвинов Ю.М., Мальвинова О.М., Хуснетдинов И.А. Прогнозирование глубины приповерхностных повреждений в материалах электронной техники при их обработке свободным абразивом // Электронная промышленность. 2003. Т. 3. С. 97-101.

14. Малюков С.П., Клуникова Ю.В. Информационная и экспертная системы оптимизации производства сапфира // Программные продукты и системы. 2013. № 2. С. 240-243.

References

1. Bochkin O.I., Bruk V.A., Nikiforova-Denisova S.N. Mehanicheskaja obrabotka poluprovodnikovyh materialov [Mechanical treatment of semiconductor materials]. Moskva: Vysshaja shkola, 1977. 152 p.

2. Britvin A.A. Modelirovanie processov mehanicheskoy obrabotki plastin poluprovodnikovyh i dijelektricheskikh materialov svobodnym abrazivom [Simulation of treatment processes of semiconductor and dielectric materials by free abrasive]. Moskva: avtoref. dis. kand. tehn. nauk, 2007. 28 p.

3. Shul'ga G.I., Skrinnikov E.V., Shul'ga T.G. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2014/2561/.

4. Drovnikov A.N., Valjukevich Ju.A., Trifonov A.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1544/.

5. Karban' V.I., Borzakov Ju.I. Obrabotka monokristallov v mikrojelektronike [Treatment of monocrystals in microelectronics]. Moskva: Radio i svjaz', 1988. 104 p.
6. Evans A.G., Wilshau T.R. Gaussi-static particle damage in brittle solids: observations, analysis and implications. Acta Met. 1976. Vol. 24. № 10. pp. 936-956.
7. Kirchner H.P., Ragosta J.A. Relation of load to radial crack length for spherical indentations in hot-pressed ZnS. Amer. Ceram. Soc. 1983. Vol. 66. № 4. pp. 293-296.
8. Rajhel's E.I., Rom M.A. Fizika i himija obrabotki materialov. 1980. № 2. pp. 96-98.
9. Anikin A.V., Litvinov Ju.M. Izvestija vuzov. Jelektronika. 2006. № 6. pp. 89-90.
10. Arendarenko A.A., Golodaeva N.L., Litvinov Ju.M., Cyplenkov I.N. Izvestija vuzov. Jelektronika. 2005. № 2. pp. 32-35.
11. Solovej V.V., Litvinov Ju.M. Izvestija vuzov. Jelektronika. 2005. № 6. pp. 32-35.
12. Solovej V.V., Litvinov Ju.M., Hohlov A.I., Jakovlev S.P. Izvestija vuzov. Jelektronika. 2004. № 6. pp. 26-30.
13. Britvin A.A., Litvinov M.Ju., Litvinov Ju.M., Mal'vinova O.M., Husnetdinov I.A. Jelektronnaja promyshlennost'. 2003. T. 3. pp. 97-101.
14. Maljukov S.P., Klunnikova Ju.V. Programmnye produkty i sistemy. 2013. № 2. pp. 240-243.