

## Ориентационная зависимость процессов травления подложек сапфира

А. М. Исмаилов, А. Э. Муслимов

*Проведен анализ процессов травления сапфировых подложек. Рассматриваются особенности использования методов химико-механического, лазерного, ионного, электронного травления сапфировых подложек. Определено, что при химико-механическом и лазерном травлении плоскостей сапфира происходит послойное удаление материала через промежуточные процессы внутрислоевого растрескивания, а скорость травления коррелирует с межплоскостным расстоянием. В случае применения ионного и электронного травления основным механизмом является образование пронизывающих пор, треков, которые ослабляют межатомные связи и приводят к разрушению кристаллической решетки сапфира. При этом скорость травления различных плоскостей кристалла сапфира коррелирует с потенциальной энергией межатомного взаимодействия внутри соответствующей плоскости. Наименьшая интенсивность  $F^+$ -полосы катодолюминесценции, как и скорость генерации кислородных вакансий наблюдается для С-плоскости сапфира, атомы кислорода в которых формируют плотноупакованный каркас. Наибольшая интенсивность катодолюминесценции наблюдается для А-плоскости сапфира, в которой атомы обладают наименьшей потенциальной энергией.*

*Ключевые слова:* ориентация, сапфир, подложки, травление, катодолюминесценция.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-1-51-57

### Введение

Кристаллы сапфира (корунд,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам являются одним из основных материалов современной оптоэлектроники и фотоники. Кристаллы сапфира способны противостоять внешнему воздействию, высокой температуре, давлению и механическим нагрузкам. В силу особенностей кристалли-

ческой структуры, сапфир обладает анизотропией свойств. Длительное время, в качестве подложек для формирования светоизлучающих устройств использовались подложки сапфира С(0001)-ориентации [1]. Как оказалось, использование профилированных подложек сапфира М(10 $\bar{1}$ 0)-ориентации позволяет получать пленки неполярного или полуполярного нитрида галлия [2], в результате чего увеличивается эффективность светоизлучающих устройств на 30 и более %. В отличие от С и М-ориентаций, подложки сапфира А(11 $\bar{2}$ 0)-ориентации часто используются в качестве оптических окон [3] в различных устройствах, в том числе в космической технике. С учетом приведенного выше, можно выделить несколько важных технологических характеристик, которыми должны обладать сапфировые кристаллы. С одной стороны, эксплуатационная стойкость, в частности, при воздействии ионизирующего и других типов излучения. С другой стороны, оптимизация

Исмаилов Абубакар Магомедович<sup>1</sup>, доцент, к.ф.-м.н.  
E-mail: egdada@mail.ru

Муслимов Арсен Эмирбегович<sup>2</sup>, в.н.с., д.ф.-м.н.  
E-mail: amuslimov@mail.ru

<sup>1</sup> Дагестанский государственный университет.  
Россия, 367000, Республика Дагестан, г. Махачкала,  
ул. Гаджиева, 43-а.

<sup>2</sup> Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова  
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.  
Россия, 119333, Москва, Ленинский просп., 59.

Статья поступила в редакцию 19 августа 2021 г.

© Исмаилов А. М., Муслимов А. Э., 2022

процессов предростовой подготовки поверхности подложек (полировка, микроструктурирование, профилирование), важных при формировании светоизлучающих устройств. Следует заметить, что указанные требования связанные со способами внешнего воздействия, которые приводят к декомпозиции или травлению поверхности сапфировых пластин, могут быть рассмотрены в качестве методов профилирования и т. д.

В зависимости от способа обработки можно рассматривать несколько моделей процесса травления сапфира. Модель растравливания атомных плоскостей сапфира на основе механизма последовательного послойного удаления материала [4] применима для химико-механического [5] или лазерного травления [6]. В случае химико-механического травления важным фактором является твердость материала подложки. Прямую корреляцию между твердостью и скоростью химико-механического травления подложек сапфира в зависимости от их ориентации исследовали в [5]. Авторами показано, что твердость  $H$  подложек сапфира, в зависимости от ориентации увеличивается в следующей последовательности  $H_C < H_M < H_A$ . Скорость химико-механической полировки  $V$  при этом, наоборот, максимальна для базисной  $C$ -плоскости ( $V_C > V_M > V_A$ ). Полирующий состав содержал частицы диоксида кремния. При использовании полирующего состава с частицами поликристаллического алмаза [7] было получено следующее соотношение для ориентационной зависимости скорости полировки  $V_C > V_A > V_M$ . Несмотря на некоторое несоответствие, следует отметить преимущественное травление  $C$ -плоскости сапфира, по сравнению с  $A$  и  $M$ -плоскостями. Можно предположить, что промежуточным этапом травления является растрескивание материала. Совершенно иные процессы наблюдаются в случае лазерного травления. Взаимодействие лазерного излучения с материалом включает в себя сложные процессы, такие как множественная кулоновская диссоциация, туннельная и лавинная ионизация и др. Учет их является сложной задачей. Наиболее близкой моделью, описывающей наблюдаемые при лазерном травлении процессы, является предложенная в [8], в которой аналогично химико-меха-

ническому травлению предполагается послойное удаление материала через промежуточные процессы растрескивания. В [9] отмечено, что выбор кристаллографической плоскости мало повлиял на скорость лазерного травления, в сравнении с параметрами (энергия импульса и количество импульсов) фемтосекундных лазерных импульсов. Однако, авторы другого исследования [6] наблюдали ориентационную зависимость скорости травления:  $V_C > V_M > V_A$ . Это соответствовало величинам пороговой энергии  $E$  лазерного травления при фиксированных количествах импульсов:  $E_C < E_M < E_A$ .

При исследовании ориентационной зависимости скорости травления подложек сапфира пучком ионов [10] при ускоряющем напряжении 30 кВ было обнаружено, что скорость травления максимальна для  $A$  плоскости сапфира. В целом, между скоростями ионного травления различных плоскостей сапфира наблюдается следующее соотношение:  $V_A > V_M > V_C$ . При этом, шероховатость  $R$ , максимальна для  $C$  плоскости сапфира ( $R_C > R_M > R_A$ ).

Обобщая результаты исследований, можно заметить, что модель послойного растравливания учитывает межплоскостные расстояния  $d$  вдоль направлений  $C[0001]$ ,  $M[10\bar{1}0]$ ,  $A[11\bar{2}0]$  в кристалле сапфира, которые коррелируют с величинами скоростей травления при лазерном и химико-механическом травлении. Что касается ионного травления, когда дефекты в приповерхностных слоях кристалла сапфира формируются в основном за счет ударного смещения, более важны силы взаимодействия атомов внутри атомных плоскостей. Отсутствие прямой корреляции с межплоскостным расстоянием связано с особенностью взаимодействия бомбардирующих ионов с приповерхностными слоями кристалла, а именно, образованием пронизывающих кристаллы пор, треков.

Ранее [11, 12] нами был обнаружен эффект травления поверхности пластин сапфира потоком электронов средних энергий (до 70 кэВ). Предположительно, в основе наблюдаемых процессов травления электронами лежит не ударное смещение, а эффекты радиолитического распада по механизму Оже-распада [13]. Несмотря на иной механизм, процесс элек-

тронного травления также, как и ионного носит локализованный характер, в отличие от химико-механического и лазерного травления, охватывающих более широкие приповерхностные слои. В этой связи, весьма интересна ориентационная зависимость процессов травления поверхности сапфира электронами средних энергий. Наблюдать напрямую процессы травления электронами поверхности сапфира (является сильным диэлектриком) без стимулирующего покрытия довольно сложно. Однако, использованная в [11] методика катодоллюминесцентного (КЛ) анализа позволяет обнаружить корреляцию между процессами травления в потоке электронов и ориентацией сапфировой подложки. Основными центрами окраски в сапфире в ультрафиолетовой области (УФ) являются  $F$ ,  $F^+$ -центры (вакансии кислорода захватившие два и один электрон, соответственно) и комплексы на их основе.  $F^+$ -центр характеризуется тремя полосами поглощения 6,1, 5,2 и 4,8 эВ и полосой люминесценции 3,8 эВ (330 нм).  $F$ -центр имеет полосу поглощения 6 эВ и люминесценции 3 эВ (415 нм). Основной, при электронном способе возбуждения люминесценции, является  $F^+$ -полоса, а  $F$ -полоса подавляется в процессе бомбардировки электронами. Исследования временной зависимости интенсивности свечения  $F$ ,  $F^+$ -полос показывают, что интенсивность свечения  $F^+$ -полосы усиливается и переходит в режим насыщения. Следовательно, под действием электронного пучка происходит постоянная генерация новых кислородных вакансий. Этот процесс продолжается до достижения равновесия между генерацией и усиливающейся рекомбинацией кислородных вакансий за счет введения в процесс дефектообразования более глубоких слоев сапфира. Следовательно, зависимость интенсивности  $I$  свечения от концентрации  $n$  центров при малых концентрациях [14] можно считать  $I \sim n$ . С учетом этого, интенсивность  $F^+$ -полосы катодоллюминесценции на начальном этапе облучения электронами можно считать пропорциональной концентрации кислородных вакансий. Тем самым, методика катодоллюминесцентного анализа позволяет исследовать корреляцию процессов интенсивного дефектообразования (травления) с ориентацией подложек сапфира.

## Эксперимент

В качестве подложек использовались сапфировые пластины  $C$ ,  $A$ ,  $M$ -ориентаций. Было использовано два типа пластин: исходные (тип I) и после отжига при температуре 1400 °С в течении часа в атмосферных условиях (тип II) для перекристаллизации поверхности и снижения концентрации дефектов приповерхностного слоя привнесенных в процессе роста, механической обработкой и полировкой. Исследование методом возбуждения КЛ в образцах осуществлялось электронным пучком электронографа ЭГ-75, энергия электронов которого составляла 50 кэВ и 60 кэВ (диаметр пятна 0,5 мм), плотность потока электронов –  $10^{21} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , ток электронного пучка – 80 мкА. Применяли спектроскопию КЛ на базе спектрофотометрического комплекса AvaSpec-ULS2048x64-USB2 (Avantes). Для вывода излучения из колонны электронографа использовали вакуумный оптоволоконный переходник FC-VFT-UV400. Угол падения пучка электронов на плоскость подложки – 45°, угол между осью оптоволоконного переходника и направлением распространения падающего пучка электронов – 90°.

## Результаты и их обсуждение

На рисунке *a* приведены спектры КЛ образцов типа I и II при энергии электронов (50 кэВ). Как можно видеть, спектры КЛ образцов типа I и II имеют значительные различия, что подтверждает важность этапа предварительной высокотемпературной обработки образцов оксидных кристаллов перед их применением. Исследование спектров КЛ исходных подложек сапфира после химико-механической полировки показало, что наибольшей интенсивностью  $F^+$ -полосы свечения обладают  $M$ -пластины сапфира ( $M(I)$  – рисунок *a*). Интенсивность  $F^+$ -полосы свечения в спектре КЛ от  $M$ -пластины сапфира снижается после отжига образца ( $M(II)$  – рисунок *a*). Аналогично снижается интенсивность  $F^+$ -полосы после отжига и для  $C$ -пластин сапфира ( $C(I)$ ,  $C(II)$  – рисунок *a*). Усиление интенсивности  $F^+$ -полосы в 3 раза наблюдается только после отжига  $A$ -пластин сапфира ( $A(I)$ ,  $A(II)$  – рисунок *a*). В соответствии с рисунком абсолютные интенсивности  $I$  свечения  $F^+$ -полос КЛ для образцов типа I соотно-

сятся следующим образом:  $I_M > I_A > I_C$ . Для образцов типа II это соотношение выглядит следующим образом:  $I_A > I_M > I_C$ , что соответствует ориентационной зависимости скоростей ионного травления пластин сапфира различных ориентаций. Дополнительно (рисунок б) были проведены исследования свечения  $F^+$ -полосы спектра КЛ образцов типа I и II при более высокой энергии электронов (60 кэВ). При увеличении энергии электроны

способны проникать в более глубокие слои и генерировать вакансии кислорода в них. Как можно видеть из рисунка б общая тенденция сохраняется:  $I_A > I_C$ . Отжиг приводит к усилению интенсивности  $F^+$ -полосы (A (I), A (II) – рисунок б). Следует заметить, что при увеличении энергии электронов интенсивность  $F^+$ -полосы спектра КЛ от С-плоскости сапфира практически не претерпевает изменения (C (I), C (II) – рисунок б).

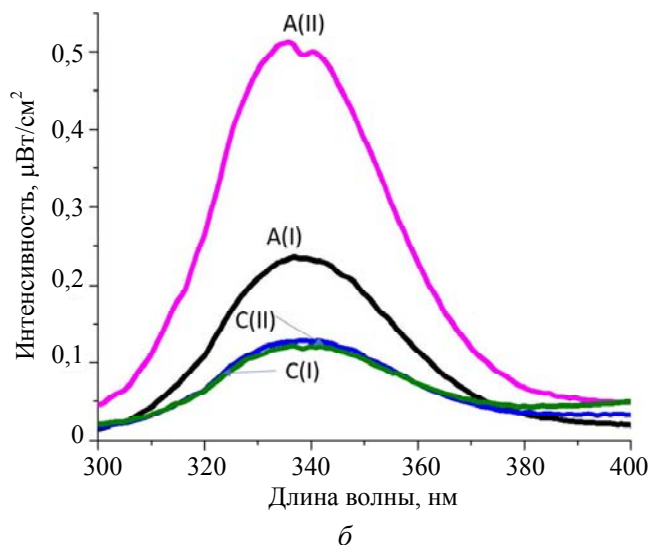
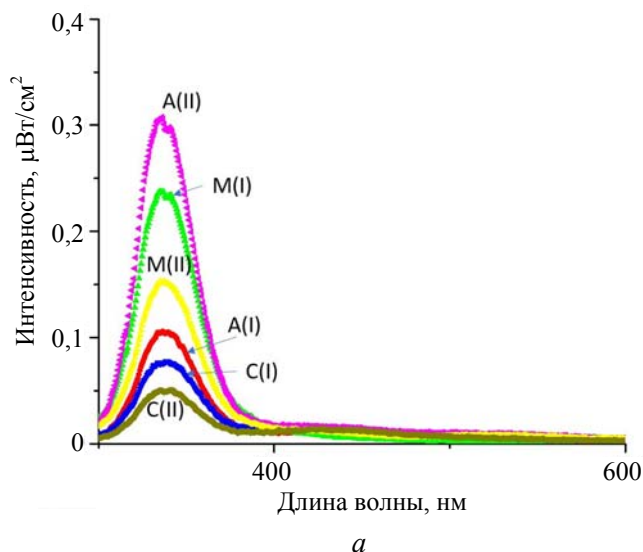


Рисунок. Сравнительные спектры катодолуминесценции образцов подложек сапфира типа I и II при энергии электронного пучка 50 кэВ (а) и 60 кэВ (б)

В целом, в соответствии с теоретическими расчетами для кристаллов гексагональной кристаллической системы межплоскостное расстояние для С-, М-, А-плоскостей сапфира равны 2.165, 1.374, 1.190 Å, соответственно. Энергия связи соседних атомных слоев вдоль какого-либо направления в кристалле обратно пропорциональна соответствующему межплоскостному расстоянию. От величины энергии связи зависит скорость пошагового удаления приповерхностных слоев подложек сапфира при химико-механическом и лазерном травлении. Учитывая величины межплоскостных расстояний, можно объяснить наблюдаемую зависимость скоростей химико-механического и лазерного травления  $V_C > V_M > V_A$ . По-видимому, с этим же связана минимальная твердость С-плоскости сапфира.

В случае ударного смещения, важным фактором является взаимодействие атомов в атомном слое (потенциальная энергия атомов). Согласно расчетам [10] плотность ато-

мов для С, М, А-плоскостей равны 25, 12.75, 7.63 атомов/нм<sup>2</sup>, соответственно. Величины потенциальных энергий приходящихся на 1 атом (энергия удаления атомов) равны 291.23, 471.65, 908.63 эВ, для А, М, С-плоскостей, соответственно. Этим объясняется максимальная скорость ионного травления А-плоскости сапфира. Для объяснения аналогичного соотношения между интенсивностями  $F^+$ -полос в спектрах КЛ (равно концентрациями кислородных вакансий) для различных плоскостей сапфира необходимо обратиться к особенностям радиолиза по механизму Оже-распада в сапфире. В процессах радиолиза по механизму Оже-распада, в результате удара внешнего электрона во внутренней электронной оболочке катиона алюминия образуется дырка. После этого один валентный электрон кислородного аниона перескакивает в эту дырку с выделением одного или двух дополнительных анионных валентных электронов кислорода. В результате кислородный анион

превращается в положительный ион  $O^+$  с изменением величины и знака потенциальной энергии. В дальнейшем, кислород вынужден десорбироваться из кристалла сапфира. С учетом полученных в [10] расчетных данных ориентационной зависимости потенциальной энергии, приходящейся на единичный атом, можно заметить, что наименьшей энергией десорбции кислорода обладает А-плоскость сапфира. Процесс десорбции кислорода усиливается при увеличении энергии бомбардирующих электронов, что отражается в усилении интенсивности  $F^+$ -полос в спектрах КЛ (А (I), А (II) – рисунок б). Наоборот, процессы десорбции с поверхности С-подложек сапфира минимизированы, поскольку атомы в С-плоскости сапфира обладают наибольшей энергией десорбции.

Что касается различий в спектрах КЛ исходных и термообработанных подложек сапфира, важно отметить минимальную концентрацию кислородных вакансий в С-подложках как исходных типа I, так и термообработанных типа II. Базисная С-плоскость сапфира формируется плотноупакованными кислородными слоями и именно эти слои определяют особенности структурного мотива типа корунда. Как для исходных пластин сапфира, обработанных химико-механическим способом, так и для термообработанных, кислородный каркас преимущественно сохраняется. После термообработки в атмосферных условиях частично заполняются кислородные вакансии, что отражается в снижении интенсивности  $F^+$ -полосы в спектре КЛ (С(I), С(II) – рисунок а). При увеличении энергии бомбардирующих электронов интенсивность  $F^+$ -полос усиливается (С(I), С(II) – рисунок б) за счет дополнительной генерации вакансий кислорода в более глубоких слоях сапфира. При этом минимизируются различия между спектральными кривыми для исходного и термообработанного образцов (С(I), С(II) – рисунок б). Основные различия в количестве вакансий кислорода в подвергнутом химико-механической полировке и термообработанном образцах могут быть только в приповерхностном слое. Увеличение энергии бомбардирующих электронов приводит к снижению доли люминесцирующих центров в приповерхностном механически-поврежденном слое в интегральной интенсивности суммарного свечения.

Вероятность, радиолиза по механизму Оже-распада и, как результат, десорбция кислорода пропорциональна концентрации атомов алюминия в поверхностном слое сапфира. Можно предположить избыточное содержание междоузельных атомов алюминия на М-плоскости сапфира после химико-механической обработки и связанную с этим наибольшую интенсивность  $F^+$ -полосы в спектре КЛ исходной М-пластины сапфира (М(I) – рисунок а). Термообработка приводит к рекристаллизации поверхности М-сапфира и снижению уровня дефектов (М(II) – рисунок а).

### Заключение

В работе проведен анализ процессов травления сапфировых подложек. Определено, что при химико-механическом и лазерном травлении плоскостей сапфира происходит послойное удаление материала через промежуточные процессы внутрислоевого растрескивания, а скорость травления коррелирует с межплоскостным расстоянием. В случае применения ионного и электронного травления основным механизмом является образование пронизывающих пор, треков, которые ослабляют межатомные связи и приводят к разрушению кристаллической решетки сапфира. При этом скорость травления различных плоскостей кристалла сапфира коррелирует с потенциальной энергией межатомного взаимодействия внутри соответствующей плоскости. Исследования ориентационной зависимости процессов электронного травления подложек сапфира проведены с использованием метода катодолюминесцентного анализа при средних энергиях электронов до 60 кэВ. Показано, что наименьшая интенсивность  $F^+$ -полосы катодолюминесценции, как и скорость генерации кислородных вакансий наблюдается для С-плоскости сапфира, атомы кислорода в которых формируют плотноупакованный каркас и обладают наибольшей потенциальной энергией. Наибольшая интенсивность катодолюминесценции наблюдается для А-плоскости сапфира, в которой атомы обладают наименьшей потенциальной энергией. Показано, что ориентационные зависимости скоростей травления электронами средних энергий

для А и С-плоскостей сапфира до и после термообработки идентичны. Для М-плоскости сапфира скорость травления электронами максимальна для образцов после химико-механической полировки без дополнительной термообработки, что, вероятно, связано с повышенной концентрацией атомов алюминия в приповерхностном слое.

*Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ФНИЦ «Кристаллография и фотоника», в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, а также при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-0800598)*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Du C., Ma Z., Zhou J., Lu T., Jiang Y., Jia H., Chen H. // Applied Physics Letters. 2014. Vol. 104. № 15. P. 151102. doi:10.1063/1.4871090
2. Anuar A., Ahmad Makinudin A. H., Al-Zuhairi O., Chanlek N., Abu Bakar A. S., Supangat A. // Vacuum. 2020. Vol. 174. P. 109208. doi:10.1016/j.vacuum.2020.109208
3. Wang G., Zuo H., Zhang H., Wu Q., Zhang M., He X., Zhu L. Materials & Design. 2010. Vol. 31 (2). P. 706. doi:10.1016/j.matdes.2009.08.015
4. Wu G., Xing Y. // Journal of Microelectromechanical Systems. 2020. Vol. 29. № 5. P. 1234. doi:10.1109/jmems.2020.3013601
5. Cao L., Zhang X., Yuan J., Guo L., Hong T., Hang W., Ma Y. // Applied Sciences. 2020. Vol. 10 (22). P. 8065. doi:10.3390/app10228065
6. Wen Q., Zhang P., Cheng G., Jiang F., Lu X. // Ceramics International. 2019. Vol. 45. № 17. Part B. P. 23501. doi:10.1016/j.ceramint.2019.08.056
7. Zhu H., Tessaroto L. A., Sabia R., Greenhut V. A., Smith M., Niesz D. E. // Applied Surface Science. 2004. Vol. 236 (1-4). P. 120. doi:10.1016/j.apsusc.2004.04.027
8. Kim S. H., Sohn I.-B., Jeong S. // Applied Surface Science. 2009. Vol. 255 (24). P. 9717. doi:10.1016/j.apsusc.2009.04.058
9. Qi L., Nishii K., Yasui M., Aoki H., Namba Y. // Optics and Lasers in Engineering. 2010. Vol. 48 (10). P. 1000. doi:10.1016/j.optlaseng.2010.05.006
10. Wen Q., Wei X., Jiang F., Lu J., Xu X. // Materials. 2020. Vol. 13 (12). P. 2871. doi:10.3390/ma13122871
11. Исмаилов А. М., Муслимов А. Э. // Прикладная физика. 2020. № 5. С. 86.
12. Исмаилов А. М., Муслимов А. Э. // Прикладная физика. 2021. № 5. С. 75.
13. Knotek M. L., Feibelman P. J. // Phys. Rev. Lett. 1978. Vol. 40. P. 964.
14. Багдасаров Х. С., Пастернак Л. Б., Севастьянов Б. К. // Квантовая электроника. 1976. Т. 3. № 6. С. 1307.

PACS: 81.15.Cd

## Orientation dependence of sapphire substrate etching processes

*A. M. Ismailov<sup>1</sup> and A. E. Muslimov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Dagestan State University  
43-a Gadjeva st., Makhachkala, 367000, Russia  
E-mail: egdada@mail.ru

<sup>2</sup> FSRC “Crystallography and Photonics” RAS  
59 Leninskii Ave., Moscow, 119333, Russia  
E-mail: amuslimov@mail.ru

*Received December 27, 2021*

***The analysis of the processes of etching sapphire substrates was carried out. Features of using methods of chemical-mechanical, laser, ion, electronic etching of sapphire substrates are discussed. It was determined that during chemical-mechanical and laser etching of sapphire planes, layer-by-layer removal of material occurs through intermediate processes of intra-layer cracking, and the etching rate correlates with interplane distance. In the case of ion and elec-***

*tron etching, the main mechanism is the romination of permeating pores, tracks that weaken interatomic bonds and lead to the destruction of the crystal lattice of sapphire. At the same time, the etching rate of various planes of the sapphire crystal correlates with the potential energy of interatomic interaction inside the corresponding plane. The lowest intensity of the  $F^+$ -band of cathodoluminescence, as well as the rate of oxygen vacancy genesis, is observed for the C-plane of sapphire, the atoms of the oxygen genus in which form a densely packed framework. The greatest intensity of cathodoluminescence is observed for the A-plane of sapphire, in which atoms have the least potential energy.*

*Keywords:* orientation, sapphire, substrates, etching, cathodoluminescence.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2022-1-51-57

## REFERENCES

1. C. Du, Z. Ma, J. Zhou, T. Lu, Y. Jiang, H. Jia, and H. Chen, H. Applied Physics Letters **104** (15), 151102 (2014). doi:10.1063/1.4871090
2. A. Anuar, A. H. Ahmad Makinudin, O. Al-Zuhairi, N. Chanlek, A. S. Abu Bakar, and A. Supangat, Vacuum **174**, 109208 (2020). doi:10.1016/j.vacuum.2020.109208
3. G. Wang, H. Zuo, H. Zhang, Q. Wu, M. Zhang, X. He, and L. Zhu, Materials & Design **31** (2), 706 (2010). doi:10.1016/j.matdes.2009.08.015
4. G. Wu and Y. Xing, Journal of Microelectromechanical Systems **29** (5), 1234 (2020). doi:10.1109/jmems.2020.3013601
5. L. Cao, X. Zhang, J. Yuan, L. Guo, T. Hong, W. Hang, and Y. Ma, Applied Sciences, **10** (22), 8065 (2020). doi:10.3390/app10228065
6. Q. Wen, P. Zhang, G. Cheng, F. Jiang, and X. Lu, Ceramics International, Part B, **45** (17), 23501 (2019). doi:10.1016/j.ceramint.2019.08.056
7. H. Zhu, L. A. Tessaroto, R. Sabia, V. A. Greenhut, M. Smith, and D. E. Niesz, Applied Surface Science **236** (1-4), 120 (2004). doi:10.1016/j.apsusc.2004.04.027
8. S. H. Kim, I.-B. Sohn, and S. Jeong, Applied Surface Science **255** (24), 9717 (2009). doi:10.1016/j.apsusc.2009.04.058
9. L. Qi, K. Nishii, M. Yasui, H. Aoki, and Y. Namba, Optics and Lasers in Engineering **48** (10), 1000 (2010). doi:10.1016/j.optlaseng.2010.05.006
10. Q. Wen, X. Wei, F. Jiang, J. Lu, and X. Xu, Materials **13** (12), 2871 (2020). doi:10.3390/ma13122871
11. A. M. Ismailov and A. E. Muslimov, Applied Physics, No. 5, 86 (2020) [in Russian].
12. A. M. Ismailov and A. E. Muslimov, Applied Physics, No. 5, 75 (2021) [in Russian].
13. M. L. Knotek and P. J. Feibelman, Phys. Rev. Lett. **40**, 964 (1978).
14. H. S. Bagdasarov, L. B. Pasternak, and B. K. Sevastyanov, Quantum Electron **3** (6), 1307 (1976).