

## Люминесцентный анализ процессов травления сапфира с нанокристаллами золота в потоке электронов

А. М. Исмаилов, А. Э. Муслимов, В. М. Каневский

*В представленной работе изучена кинетика процессов радиационно-индуцированной перестройки поверхности сапфира с нанокристаллами золота с использованием временной зависимости спектров катодолюминесценции. Показано, что основными центрами окраски в УФ-области спектра катодолюминесценции сапфира являются  $F^+$ -центры, а  $F$ -полоса подавлена. Исследование временной зависимости интенсивности  $F^+$ -центров подтверждает отсутствие этапа поверхностного плавления сапфира в процессе облучения потоком электронов с ускоряющим напряжением 50 кэВ. Малая величина уширения линии  $Cr^{3+}$  соответствует незначительным отклонениям температуры на поверхности сапфира в процессе электронного облучения. Предложена качественная модель описывающая травление поверхности сапфира с нанокристаллами золота в процессе воздействия электронов. В основе рассмотренной модели лежит радиационно-индуцированный Оже-распад сапфира и формирование в процессе протекания экзотермической реакции интерметаллических фаз Au-Al.*

*Ключевые слова:* сапфир, нанокристаллы золота, катодолюминесценция, поток электронов.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-2-22-29

### Введение

В основе современной технологии изготовления устройств микро- и нанoeлектроники лежит процесс травления, позволяющий формировать микро и наноструктуры. Несмотря на накопленный опыт полной автоматизации процесса не достигнуто и в каждом случае требуется индивидуальный подход, учитывающий особенности свойств как самого материала, так и процесса, лежащего в основе того

или иного метода травления (реактивное ионное, плазмохимическое и т. д.). Более того, для построения полноценной модели процесса травления известного материала необходимо иметь массив параметров, описывающих все промежуточные стадии.

Поскольку процессы травления обычно охватывают приповерхностную область кристаллов с размерами до десятка микрон, контактные методы исследования не применимы. В этом случае наиболее информативным является использование бесконтактных методов, основанных на анализе электромагнитного излучения с исследуемой поверхностью [1, 2]. В частности, в работе [1] авторами продемонстрирована возможность «in situ» исследований процессов трансформации поверхности сапфира. Несмотря на широкое применение сапфировых кристаллов в оптоэлектронике и фотонике, эти исследования носят единичный характер, поскольку требуют использования синхротронных источников излучения. Нам представляется перспективной возможность изучения кинетики процессов травления по-

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

Каневский Владимир Михайлович<sup>2</sup>, гл.н.с., д.ф.-м.н.  
<sup>1</sup> Дагестанский государственный университет.

Россия, 367000, Республика Дагестан, г. Махачкала,  
ул. Гаджиева, 43-а.

<sup>2</sup> ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.  
Россия, 119333, Москва, Ленинский просп., 59.

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2021 г.

© Исмаилов А. М., Муслимов А. Э., Каневский В. М.,  
2021

верхности сапфира с использованием катодолюминесцентного (КЛ) анализа. Развитию этой методики способствовал ранее обнаруженный эффект резкого усиления катодолюминесценции в ультрафиолетовой (УФ) области спектра излучения сапфира, покрытого нанокластерами золота, предположительно связанный с травлением поверхности сапфира [3]. Центры свечения в УФ-области спектра традиционно связывают с кислородными вакансиями в сапфире [4]. В том же исследовании показано, что отжиг при температуре 1200 °С в атмосферных условиях подавляет полосы фотолуминесценции, связанные с вакансиями кислорода. Следовательно, повторное появление этих полос в спектрах катодолюминесценции свидетельствует об их формировании вследствие радиационно-индуцированного повреждения поверхности сапфира. В литературе [5] приводятся значения энергии электронов 4–5 кэВ, при которых начинается интенсивное формирование кислородных вакансий и наблюдаются  $F^+$  (вакансия, захватившая 1 электрон) и  $F$  (вакансия, захватившая 2 электрона) полосы свечения в области 330 и 415 нм соответственно. Вместе с тем, могут формироваться агрегатные центры  $F_2^{2+}$  (свечение в области 571 нм [6]),  $F_2$  (либо  $Al_i^+$  в области 515–521 нм [6]), т. е. центры, которые являются кислородными дивакансиями, захватившими 2 и 4 электрона соответственно. Интересно, что при нагревании или увеличении флюэнса усиливается интенсивность свечения в УФ-области спектра излучения сапфира, в то время как зависимость от энергии электронов имеет максимум [7], после которого наблюдается спад.

Предлагаются различные механизмы воздействия электронов на поверхность сапфира, и наиболее распространенной является идея радиационного Оже-распада сапфира с интенсивной десорбцией кислорода [8]. Процесс Оже-распада весьма чувствителен к температуре, поэтому возникает необходимость в оценке температуры приповерхностного слоя в процессе облучения электронами. В работе [7] авторы отмечают отсутствие скачков температуры в приповерхностной области сапфира в процессе бомбардировки электронами. Они связывают это с высокой теплопроводностью сапфира. Другим способом оценки температуры поверхности сапфира является люминесцентный анализ. Дело в том, что в

длинноволновой части спектра излучения сапфира традиционно наблюдаются полосы, связанные с примесными атомами Cr и Ti. В частности, узкая линия в области 694 нм и широкая полоса с максимумом при 780 нм связаны с  ${}^2E-{}^4A_2$  и  ${}^2E-{}^2T_2$  переходами в  $Cr^{3+}$  и  $Ti^{3+}$  [9] соответственно. Также может присутствовать свечение в области 435 нм, связанное с изолированными ионами  $Ti^{4+}$ . Уширение линии хрома, соответствует повышению температуры ударно смещенных люминесцирующих ионов хрома над стационарной температурой кристалла [10]. Аналогичное уширение можно ожидать и для широкой полосы, связанной с  $Ti^{3+}$ .

Приведенный анализ литературы позволяет оценить перспективность метода катодолюминесцентного анализа в процессах термо- и радиационно-индуцированной перестройки поверхности сапфира. Более того, центры окраски связаны с дефектами различной природы и позволяют провести комплексный анализ поверхности.

Целью данной работы является рассмотрение возможности изучения кинетики процессов радиационно-индуцированной перестройки поверхности сапфира с нанокристаллами золота с использованием временной зависимости спектров катодолюминесценции.

## Эксперимент

В качестве подложек использовались сапфировые пластины диаметром 50,8 мм и толщиной 0,43 мм. Целенаправленного легирования кристаллов сапфира ионами  $Cr^{3+}$  и  $Ti^{3+}$  не проводилось, и можно предполагать, что содержание примеси в исходной корундовой шихте не более  $\sim 10$  млн<sup>-1</sup>. Одна сторона поверхности пластин полировалась химико-механическим способом для получения предельно низкой величины шероховатости порядка 0,2 нм. После этого пластина отжигалась на воздухе при температуре 1200 °С в течение 2 часов для снижения концентрации дефектов приповерхностного слоя, привнесенных в процессах синтеза, механической обработки и полировки. На поверхность пластин наносился подслои золота методом термовакуумного испарения, после чего пластины отжигались на воздухе при температуре 800 °С в течение 2 часов для кристаллизации покрытия золота.

Возбуждение катодolumинесценции (КЛ) в образцах осуществлялось электронным пучком в электронографе ЭГ-75. Энергия электронов составляла 50 кэВ, угол падения пучка электронов к плоскости подложки –  $45^\circ$ , ток электронного пучка – 80 мкА, плотность потока электронов –  $10^{21}$  см $^{-2}$  с $^{-1}$ . Использовался режим с фокусировкой электронного луча (диаметр пятна 0,5 мм) и без фокусировки (диаметр пятна 1,5 мм).

Временная зависимость спектров КЛ исследовалась с использованием оптоволоконного спектрофотометрического комплекса AvaSpec-ULS2048x64-USB2 (Avantes, Голландия). В каждом эксперименте снималось 45 спектров с интервалом между ними – 8 с. Микроскопические исследования поверхности образцов проводились на растровом электронном микроскопе SEM Leo-1450 и атомно-силовом микроскопе Ntegra Aura (НТ-МДТ, г. Зеленоград).

### Результаты и их обсуждение

На первоначальном этапе исследовалась микроморфология поверхности сапфира с нанокристаллами золота до и после облучения электронами. На поверхности образца до облучения (см. рис. 1, а) наблюдались ограниченные нанокристаллы золота высотой до 300 нм, однородно распределенные вдоль поверхности. На следующем этапе изучалась временная зависимость спектра КЛ с поверхности сапфира с нанокристаллами золота. В результате, в области облучения пучком электронов обнаружили следующий морфологический переход: нанокристаллы золота округлились, а в прилегающей к нанокристаллам области по-

верхности сапфира образовались кратеры травления (рис. 1, б). Максимальная глубина кратеров была порядка 70–80 нм.

В ультрафиолетовой области спектра КЛ анион-дефицитного сапфира традиционно наблюдается интенсивная F- и слабая F $^+$ -полоса. В нашем эксперименте при расфокусированном пучке электронов наблюдались интенсивная F $^+$  и слабая F-полосы, а после фокусировки происходила практически полная конверсия F $\rightarrow$ F $^+$ . Это косвенно доказывает заполнение вакансий кислорода в процессе высокотемпературного отжига в атмосферных условиях.

Можно полагать, что наблюдаемое в эксперименте окрашивание сапфира имеет радиационную природу. Снималась временная зависимость люминесценции F $^+$ -полосы (340,7 нм) (см. рис. 2, а). Начальный этап характеризуется небольшим повышением интенсивности излучения, после которого временная зависимость люминесценции приобретает почти стационарный характер. По истечении времени порядка 150 с инициируются переходные процессы: обнаружен резкий рост интенсивности люминесценции F $^+$ -полосы, далее достижение максимума интенсивности на 220 с, медленный переход к стационарной люминесценции. Для полосы в области 430 нм, связанной с примесью Ti $^{4+}$ , на начальном этапе обнаружено уменьшение интенсивности люминесценции (рис. 2, а), которая на 140-й секунде переходит в режим усиления и через 20–25 с достигает максимума. В дальнейшем полоса в области 430 нм начинает снижаться. Аналогичное поведение обнаружено и для полосы Cr $^{3+}$  (694,7 нм). Отличие полосы Ti $^{3+}$  (780 нм) состояло только в стационарном характере свечения на начальном этапе.

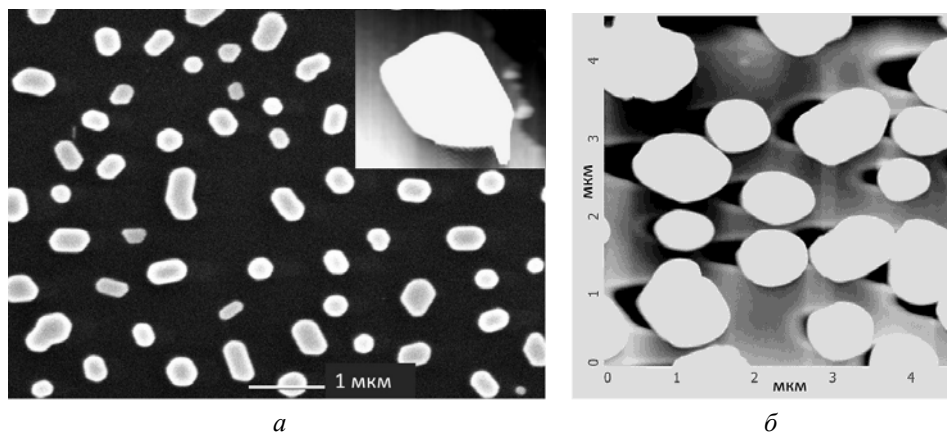


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения поверхности сапфира с нанокристаллами золота: а) до облучения; б) и после облучения потоком электронов. На врезке: изображение отдельного кристаллита, полученное методом атомно-силовой микроскопии.

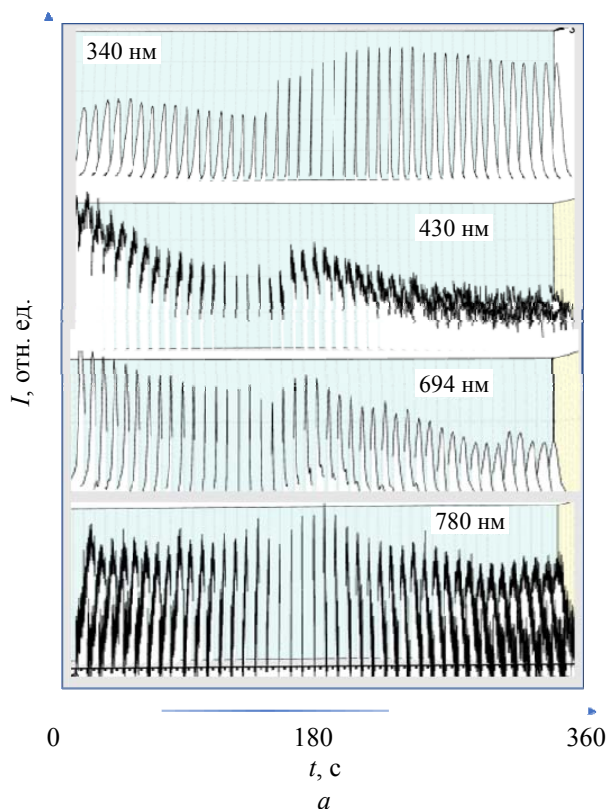
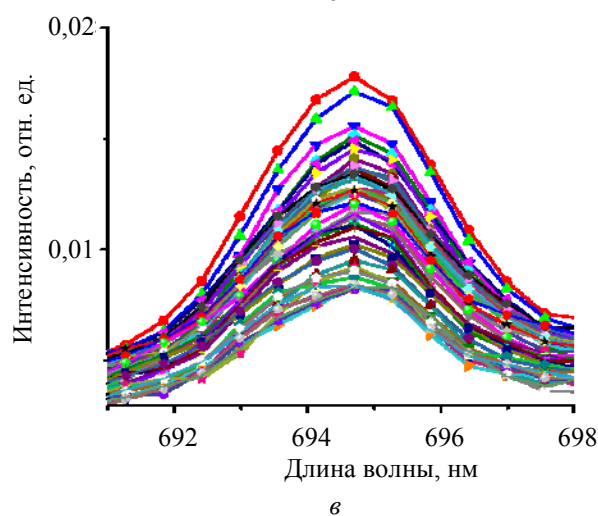
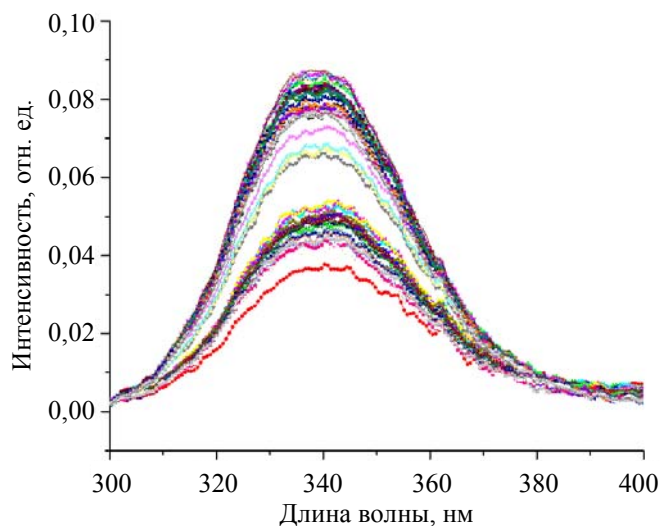


Рис. 2. Временная зависимость катодолюминесценции сапфира с нанокристаллами золота: а) интенсивность основных полос; б)  $F^+$ -полосы; в) линии  $Cr^{3+}$ .



Следует обратить внимание на существенную долю поверхности, покрытой нанокристаллами золота (см. рис. 1, а), поскольку процессы радиационно-индуцированной перестройки чистой поверхности сапфира и поверхности вдоль границы раздела «нанокристалл золота–подложка» будут сильно различаться.

Более того, доля покрытой нанокристаллами поверхности увеличивается после электронной обработки (см. рис. 1, б). Пороговая энергии для смещения атомов алюминия и кислорода в сапфире [11] порядка 18 и 75 эВ соответственно. Максимально передаваемая энергия при столкновении электрона с энергией 100 кэВ с атомами алюминия и кислорода, по оценкам той же работы, соответствует 9 и 15 эВ. В нашем эксперименте энергия электронов значительно меньше (50 кэВ) и, тем не менее, наблюдается десорбция кислорода. Декомпозиция поверхности с образованием кис-

лородных вакансий, по всей видимости, протекает в соответствии с моделью радиационного Оже–распада сапфира [8]. При отсутствии нанокристаллов золота временная зависимость интенсивности КЛ сапфира после начального усиления приобретает стационарный характер [7]. Это связано с совокупностью процессов, происходящих на поверхности сапфира в процессе облучения, определяемых поперечным сечением упругого рассеяния, ионизации, захвата, возбуждения, а также рекомбинацией и кластеризацией дефектов.

Тушение (рис. 2, а) люминесценции  $F^+$ -полосы при временах экспозиции в потоке электронов более 300 с не наблюдается, что свидетельствует об отсутствии этапа поверхностного подплавления сапфира. Следовательно, резкий скачок (рис. 2, а) интенсивности по истечении 140 с после начала облучения электронами не связан с экстремальным

увеличением концентрации вакансий кислорода вблизи фазового перехода. Кроме того, известно по данным работы [12], что гашение люминесценции во всех полосах сапфира происходит при температурах 700–900 °С, и это намного меньше температуры плавления сапфира (2040 °С).

Как было сказано выше, природа примесных центров окраски  $\text{Cr}^{3+}$  и  $\text{Ti}^{3+}$  иная, нежели вакансионных центров, и требует отдельного рассмотрения. Энергетические уровни примесных атомов  $\text{Cr}^{3+}$  и  $\text{Ti}^{3+}$  лежат близко друг к другу, и это способствует резонансно-безызлучательному переносу энергии. Как можно видеть из рис. 2, а, интенсивность линии  $\text{Cr}^{3+}$  при неизменных параметрах экспозиции со временем снижается, что ранее наблюдалось и другими авторами [7] даже при больших энергиях электронов. По всей видимости, радиационное повреждение поверхности сапфира приводит к снижению интенсивности линий  $\text{Cr}^{3+}$ . Увеличение концентрации дефектов увеличивает вероятность безызлучательной рекомбинации. Следует заметить, что смещения максимума линии  $\text{Cr}^{3+}$  не наблюдалось, и это, в соответствии с результатами [13], свидетельствует о незначительных локальных изменениях температуры поверхности сапфира. Кроме того, было замечено, что при расфокусировке резко возрастает интенсивность линии  $\text{Cr}^{3+}$ . Аналогично ведут себя и полосы, связанные с  $\text{Ti}^{3+}$  и  $\text{Ti}^{4+}$ , что свидетельствует об идентичности примесных центров окраски. Несмотря на различную природу вакансионных и примесных центров окраски, увеличение интенсивности люминесценции происходит (см. рис. 2, а) практически одновременно через 140–150 с после начала облучения. В то же время, примесные центры окраски достигают максимума значительно раньше (на 55–60 с), чем вакансионные.

Не менее интересные результаты были получены при анализе уширения полос люминесценции. Вообще говоря, уширение F- и  $\text{F}^+$ -полос связано с искажением решетки вокруг дефектов, вызванным смещением атомов из регулярных позиций кристаллической решетки. Каждый ион  $\text{Cr}^{3+}$ , замещая в кристалле позицию  $\text{Al}^{3+}$ , находится в окружении 6 ионов кислорода. Сильное электрическое поле, создаваемое ионами  $\text{O}^{2-}$ , расщепляет энергетические уровни  $\text{Cr}^{3+}$ . В этой связи, образование

кислородных вакансий должно сказываться на положении пика люминесценции  $\text{Cr}^{3+}$ . Следует заметить также, что смешение пика люминесценции  $\text{Cr}^{3+}$  может быть связано с механическими напряжениями в решетке.

Из временной зависимости  $\text{F}^+$ -полосы (рис. 2, б), снятой на всем протяжении процесса перестройки поверхности образца, следует, что положение максимума претерпевает лишь незначительные отклонения как в длинноволновую, так и коротковолновую сторону относительно значения 340,7 нм. Наибольшие смещения наблюдаются в процессе прохождения системой переходного этапа (в период 150–230 с). На этот же промежуток времени приходится также и максимальное уширение УФ-полосы свечения. Аналогичная зависимость наблюдается и для линии  $\text{Cr}^{3+}$  (рис. 2, в). Наибольшее отклонение пика 694,7 нм имеет место в период усиления свечения линии  $\text{Cr}^{3+}$ , однако кинетика характеризуется несимметричным уширением в длинноволновую область, что обычно связано с сжимающими напряжениями в решетке. По всей видимости, процессы, связанные с диффузией атомов кислорода, приводит к образованию метастабильного поля механических напряжений в решетке сапфира, что и отражается в отклонении основных полос свечения. Кроме того, смешение линии  $\text{Cr}^{3+}$  может быть связано с внедрением золота в решетку сапфира. Однако совпадение положений данной линии на начальном и конечном этапах исследования свидетельствует о низкой диффузионной активности золота в сапфире.

Таким образом, можно предложить модель перестройки поверхности сапфира с нанокристаллами золота в процессе электронной обработки. На первоначальном этапе, в процессе облучения потоком электронов, инициируется процесс десорбции кислорода с образованием анионных вакансий, ответственных за центры окраски в УФ-области. Концентрация вакансий возрастает, и через 16–20 с процесс приобретает стационарный характер (рис. 2, а). Избыточная концентрация электронов в приповерхностном слое также способствует диффузионной активности кислорода, что связано с требованием локальной компенсации заряда. Тем не менее, активная диффузия и десорбция кислорода не приводит к существенной де-

композиции приповерхностного слоя сапфира, что подтверждается отсутствием смещения максимумов основных полос люминесценции сапфира и их незначительного уширения. Десорбция кислорода, в основном, затрагивает свободную от нанокристалликов золота часть поверхности сапфира. С другой стороны, заметное повышение температуры возможно в покрытой нанокристалликами золота части сапфира, поскольку золото обладает низкой теплоемкостью. Благодаря высокой теплопроводности сапфира, температурный фронт будет расширяться как в глубину, так и вдоль поверхности сапфира. Поскольку скорость радиационного Оже-распада напрямую определяется температурой образца, а процесс десорбции кислорода носит активационный характер, через время 140–150 с начинается процесс декомпозиции поверхности с формированием областей с избыточным содержанием алюминия. В этот момент формируется ямка травления (рис. 1, б), которая постепенно увеличивается в размерах. Вместе с этим начинает увеличиваться активная площадь поверхности сапфира, что отражается в увеличении интенсивности свечения примесных центров окраски (рис. 2, а). В какой-то момент времени это приводит к интенсивному выведению кислорода с границы раздела «нанокристалл золота-сапфир». При этом освободившиеся атомы алюминия проявляют высокую химическую активность и образуют на границе раздела интерметаллические фазы в системе Au-Al. Реакция образования интерметаллидов является экзотермической, и выделяемое тепло делает механизм десорбции кислорода самоподдерживающимся. Поскольку атомы алюминия вступают в реакцию с нижними слоями золота, а дальнейшая диффузия алюминия сквозь слой интерметаллида замедлена, наблюдается максимум на временной зависимости интенсивности свечения  $F^+$  центров (рис. 2, а). С этими же процессами связано наблюдаемое отставание максимума свечения вакансионных центров окраски от примесных центров. Декомпозиция поверхности сапфира сопровождается расширением основания нанокристаллов золота за счет прироста фазы интерметаллида. Тем самым, уменьшается площадь поверхности сапфира и концентрация примесных центров окраски

способных высвечивать. Не стоит забывать и про возможный нагрев поверхности сапфира. В этих условиях даже незначительный нагрев может приводить к температурному гашению люминесценции, связанному с низкой энергией активации процессов безызлучательного распада примесных центров окраски.

### Заключение

В представленной работе рассмотрена возможность изучения кинетики процессов радиационно-индуцированной перестройки поверхности сапфира с нанокристаллами золота с использованием временной зависимости спектров катодолуминесценции. Показано, что основными центрами окраски в УФ-области спектра люминесценции сапфира являются  $F^+$ -центры, а  $F$ -полоса подавлена. Исследование временной зависимости интенсивности  $F^+$ -центров подтверждает отсутствие этапа поверхностного плавления сапфира в процессе облучения потоком электронов с ускоряющим напряжением 50 кэВ. Совпадение спектрального положения линии  $Cr^{3+}$  на начальном и конечном этапах исследования может свидетельствовать о низкой диффузионной активности золота в сапфире. Малая величина уширения линии  $Cr^{3+}$  в процессе исследования соответствует незначительным отклонениям температуры на поверхности сапфира в процессе электронного облучения.

Предложена качественная модель, описывающая травление поверхности сапфира с нанокристаллами золота в процессе воздействия электронов. В основе модели лежит радиационно-индуцированный Оже-распад сапфира и формирование в процессе протекания экзотермической реакции интерметаллических фаз в системе Au-Al.

---

*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 № 20-21-00068 Росатом).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Thune E., Fakih A., Matringe C., Babonneau D., Guinebretière R. // J. Applied Physics. 2017. Vol. 21 (1). P. 015301.
2. Thapa J., Liu B., Woodruff S. D., Chorpening B. T., Buric M. P. // Applied Optics. 2017. Vol. 56 (31). P. 8598.
3. Исмаилов А. М., Муслимов А. Е. // Прикладная физика. 2020. № 5. С. 86.
4. Ananchenko D. V., Nikiforov S. V., Kuzovkov V. N., Popov A. I., Ramazanova G. R., Batalov R. I., Novikov H. A. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2020. Vol. 466. P. 1.
5. Ghamnia M., Jardin C., Bouzlama M. // J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena. 2003. Vol. 133. P. 55.
6. Ghamdi Al., Townsend P. D. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 1990. Vol. 46. Is. 1–4. P. 133.
7. Costantini J.-M., Watanabe Y., Yasuda K., Fasoli M. // J. Applied Physics. 2017. Vol. 121 (15). P. 153101.
8. Zykova E. Y., Khaidarov A. A., Ivanenko I. P., Gainullin I. K. // J. Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2012. Vol. 6 (6). P. 877.
9. Molnár G., Benabdesselam M., Borossay J., Lapraz D., Iacconi P., Kortov V., Surdo A. // Radiation Measurements. 2001. Vol. 33. P. 663.
10. Gibson U. J., Chernuschenko M. // Optics Express. 1999. Vol. 4. № 11. P. 443.
11. Pells G. P., Phillips D. C. // J. Nuclear Materials. 1979. Vol. 80 (2). P. 207.
12. Соловьев С. В., Мильман И. И., Сурдо А. И. // ФТТ. 2012. Т. 54. Вып. 4. С. 683.
13. Ragan D. D., Gustavsen R., Schiferl D. // J. Applied Physics. 1992. Vol. 72 (12). P. 5539.

PACS: 81.15.Cd

## Luminescent analysis etching processes of sapphire with gold nanocrystals in electron beam

A. M. Ismailov<sup>1</sup>, A. E. Muslimov<sup>2</sup>, and V. M. Kanevsky<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> FSRC “Crystallography and Photonics”, RAS  
59 Leninskii Ave., Moscow, 119333, Russia

Received February 15, 2021

*The presented work considers the possibility of studying the processes of radiation-induced kinetics restructuring of the sapphire surface with gold nanocrystals using the time dependence intensity of cathodoluminescence spectra. It was shown that the main of color centers in the UV region of the spectrum of cathodoluminescence of sapphire are  $F^+$  centers, and the F-band is suppressed. The study of the time dependence of the intensity of  $F^+$  centers confirms the absence of the surface melting stage of sapphire during irradiation with a beam of electrons with an accelerating voltage of 50 keV. The small line widening value  $Cr^{3+}$  corresponds to minor temperature deviations on the sapphire surface during electronic irradiation. A qualitative model describing etching of sapphire surface with gold nanocrystals during electron action is proposed. The model considered is based on radiation-induced Auger decay of sapphire and formation of intermetallic phases in the process of the exothermic reaction in the Au-Al system.*

*Keywords:* sapphire, gold nanoclusters, cathodoluminescence, electron flux.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-2-22-29

**REFERENCES**

1. E. Thune, A. Fakih, C. Matringe, D. Babonneau, and R. Guinebretière, *J. Appl. Phys.* **21** (1), 015301 (2017).
2. J. Thapa, B. Liu, S. D. Woodruff, B. T. Chorpeneing, and M. P. Buric, *Applied Optics* **56** (31), 8598 (2017).
3. A. M. Ismailov and A. E. Muslimov, *Applied Physics*, No. 5, 86 (2020) [in Russian].
4. D. V. Ananchenko, S. V. Nikiforov, V. N. Kuzovkov, A. I. Popov, G. R. Ramazanov, R. I. Batalov, and H. A. Novikov, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **466**, 1 (2020).
5. M. Ghamnia, C. Jardin, and M. Bouslama, *J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena* **133**, 55 (2003).
6. Al Ghamdi and P. D. Townsend, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **46**, 133 (1990).
7. J.-M. Costantini, Y. Watanabe, K. Yasuda, and M. Fasoli, *J. Appl. Phys.* **121** (15), 153101 (2017).
8. E. Y. Zykova, A. A. Khaidarov, I. P. Ivanenko, and I. K. Gainullin, *J. Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques.* **6** (6), 877 (2012).
9. G. Molnar, M. Benabdesselam, J. Borossay, D. Lapraz, P. Iacconi, V. Kortov, and A. Surdo, *Radiation Measurements.* **33**, 663 (2001).
10. U. J. Gibson and M. Chernuschenko, *Optics Express.* **4** (11), 443(1999).
11. G. P. Pells and D. C. Phillips, *J. Nuclear Materials* **80** (2), 207 (1979).
12. S. B. Soloviev, I. I. Milman, and A. I. Syurdo, *Phys. Solid State* **54**, 683 (2012).
13. D. D. Ragan, R. Gustavsen, and D. Schiferl, *J. Appl. Phys.* **72** (12), 5539 (1992).