07,08

Морфологические особенности поверхности иглоподобных кристаллитов алмаза

© В.И. Клещ[1], Р.Р. Исмагилов[1], И.В. Сапков[1], Е.А. Образцова[2], Т. Лим[1], А.Б. Логинов[1], А.Н. Образцов[1]

[1] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[2] Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

E-mail: klesch@polly.phys.msu.ru, obraz@polly.phys.msu.ru

Поступила в Редакцию 3 сентября 2026 г.
В окончательной редакции 25 сентября 2026 г.
Принята к публикации 2 октября 2026 г.

Исследованы особенности морфологии поверхности алмазных кристаллитов иглоподобной формы, полученных в результате термического окисления на воздухе поликристаллических алмазных пленок, выращенных методом газофазного химического осаждения. Морфология поверхности кристаллитов изучена с помощью просвечивающей и растровой электронной микроскопии. Проведены исследования алмазных игл методами комбинационного рассеяния света и фотолюминесценции, а также выполнен анализ с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Обнаружено, что алмазные иглы представляют собой монокристаллы пирамидальной формы с базовой плоскостью, имеющей гладкую на атомарном уровне поверхность и кристаллографическую ориентацию (100). Установлено, что боковые грани имеют кристаллографическую ориентацию близкую к (110) и значительную шероховатость, вызванную отклонением от идеальной кристаллографической ориентации и образованием многочисленных центров вторичной нуклеации в процессе формирования при осаждении из газовой фазы. Показано, что нагрев полученных алмазных иглоподобных кристаллитов на воздухе при температуре 690 °C и длительности от 1 до 25 h приводит к уменьшению их длины и изменению морфологии их боковых граней, которое объясняется спонтанным фасетированием в результате термоактивированной поверхностной диффузии атомов.

Ключевые слова: алмаз, химическое осаждение из газовой фазы, термическое окисление, фасетирование.

DOI: 10.61011/FTT.2026.10.64094.10601

1. Введение

Алмаз служит предметом многочисленных научных исследований, а также привлекает к себе внимание уникальным набором физических свойств, многие из которых имеют рекордные показатели. В последнее время особый интерес вызывает изучение и использование алмазных кристаллитов небольшого размера (микрометрового и нанометрового), для которых вклад разнообразных эффектов и структурно-морфологических особенностей, связанных с поверхностью, увеличивается по сравнению с более крупными кристаллами [1,2]. Влияние состояния поверхности проявляется как в отдельных кристаллитах алмаза [2], так и в структурах, полученных травлением монокристалла большого размера [3]. При этом одним из таких проявлений может быть спонтанная реконструкция поверхностей, характеризующихся высокими значениями индексов Миллера. Это явление носит общий характер [4], однако особенности, обусловленные составом и структурой кристаллов, могут приводить к существенным вариациям его проявления. Так, например, в работе [5] показано, что реконструкция поверхности алмаза, кремния, германия (относящихся к элементам IV группы таблицы Менделеева) приводит к различным равновесным формам, сильно зависящим от абсолютных значений поверхностной энергии.

В случае алмаза реконструкция морфологии поверхности, как правило, изучается для процессов формирования кристаллитов, которые могут сопровождаться частичным травлением в результате взаимодействия с окружающей средой [6–8]. С другой стороны, для практических применений более важным представляется изучение закономерностей изменений структурно-морфологических характеристик и физико-химических свойств, происходящих в результате воздействия окружающей среды и факторов, связанных с условиями использования алмазных кристаллитов. Примерами такого рода могут служить эффекты, приводящие к разогреву и поверхностной диффузии атомов под действием сильного электрического поля [9] или мощного лазерного излучения [10]. Изучение возможности изменения профиля поверхности имеет важное значение при использовании алмаза в зондовой микроскопии, профилометрах и аналогичных устройствах [11]. Использованные в работах [9–11] алмазные кристаллиты представляют собой иглоподобные образования, формирующиеся в ходе осаждения из газовой фазы (chemical vapor deposition — CVD). В данной работе изучалось изменение морфоло-

гии поверхности таких иглоподобных кристаллитов при их нагреве в воздушной атмосфере.

2. Материалы и условия эксперимента

Детальное описание методик и оборудования, использовавшихся для изготовления алмазных иглоподобных кристаллитов, представлено в работе [12]. Описание механизма формирования кристаллитов и их выделения из состава CVD пленок посредством селективного окисления представлено в работах [12–16]. В данной работе осаждение поликристаллической алмазной пленки производилось на подложке, изготовленной из стандартной пластины кремния (Si (100) n-типа, толщина 500 μm). Для осаждения использовалась смесь водорода и метана (концентрация метана составляла 4 %) при общем давлении 9.5 kPa. Температура подложки в процессе осаждения составляла 900 °C. Активация газовой смеси происходила в результате возбуждения и поддержания разряда постоянного тока. Длительность осаждения составляла 60 h. Полученные таким образом поликристаллические пленки подвергались нагреву в нормальной воздушной атмосфере до температуры 650 °C в трубчатой печи (ПТК-1.2-40 НПО „Теплоприбор“). Длительность выдержки в печи при заданной температуре составляла 20 h. Полученный материал представляет собой порошок на поверхности кремниевой пластины, состоящий из алмазных кристаллитов. Отдельные иглы извлекались непосредственно из этого порошка, а также из суспензий, приготовленных на его основе с использованием воды, ацетона или изопропилового спирта. В зависимости от типа исследований иглы размещались на держателях для просвечивающей электронной микроскопии или подложках из кремния, стекла и т. п. После размещения на подложках некоторые алмазные иглы подвергались дополнительной обработке в виде нагрева на воздухе при температуре 690 °C длительностью от 1 до 25 h.

Исследования проводились с использованием просвечивающего электронного микроскопа (TEM) TITAN 80-300 (FEI), оборудованного Cs корректором при ускоряющем напряжении 300 kV, а также с помощью растрового электронного микроскопа (SEM) LEO 15500 (Zeiss). Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) и фотолюминесценции (ФЛ) регистрировались с помощью спектрометра Horiba LabRAM HR Evolution UV–VIS–NIR–Open с возбуждением на длине волны 532 nm. Анализ с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) производился с использованием SEM Zeiss Merlin (Zeiss), оборудованного соответствующей приставкой на основе кремниевых дрейфовых детекторов (SDD) X-MaxN 150 (Oxford Instruments). Для получения SEM-изображений были использованы ускоряющие напряжения в диапазоне 1–10 kV. Для записи данных энергодисперсионной спектроскопии было использовано ускоряющее напряжение 10 kV. Для обработки полученных данных EDX было использовано программное обеспечение AztecEnergy EDX v. 3.0.

3. Результаты и их обсуждение

Алмазные иглы, полученные в результате селективного окисления поликристаллических пленок, выращенных методом CVD, с использованием указанных параметров, имели форму пирамид с геометрически правильным квадратным основанием. Общий анализ кристаллографических и морфологических характеристик иглоподобных алмазных кристаллитов был представлен ранее в работах [12,16]. В частности, было показано, что основание пирамидальных кристаллитов совпадает с плоскостью (100) алмаза. Боковые грани пирамид соответствуют кристаллографическим плоскостям с большими индексами Миллера, величина которых и длина кристаллитов определяются длительностью процесса осаждения. При этом оценочное значение скорости роста при использованных параметрах процесса составляет $\sim 1\,\mu$m/h. Порошкообразный материал, полученный в результате окисления исходной поликристаллической пленки на воздухе, содержит иглы с различными размерами, из которых максимальную длину имеют те кристаллиты, центры нуклеации которых были расположены непосредственно на поверхности подложки. Зарождение алмазных игл, длина которых в процессе формирования поликристаллической пленки не достигла максимального размера, происходило на боковой поверхности ранее сформированных кристаллитов в результате вторичной нуклеации (подробное описание этого механизма представлено в работе [15]). На рис. 1 представлены типичные электронно-микроскопические изображения образцов таких игл, исследованных в данной работе.

Представленные на рис. 1 TEM-изображения показывают морфологию иглоподобных алмазных кристаллитов в области их вершин (рис. 1, a) и основания (рис. 1, b). На рис. 1, a в качестве вставки показано электронно-дифракционное изображение, полученное при близком к нормальному направлению электронного пучка к боковой поверхности иглы. Дифракционная картина соответствует оси зоны [110], что свидетельствует о том, что боковая поверхность иглы близка по ориентации к плоскости (110). Изображения, представленные на рис. 1, a и b, получены для игл, извлеченных из порошкообразного материала непосредственно после его изготовления. Видимо, по этой причине у поверхности алмазных кристаллитов наблюдается большое количество мелких фрагментов углеродного материала, оставшегося после процедуры длительного термического окисления на воздухе. Особенно большое количество такого недоокисленного материала наблюдается около плоского основания алмазных игл. После механического воздействия (в процессе сбора образовавшегося порошка,

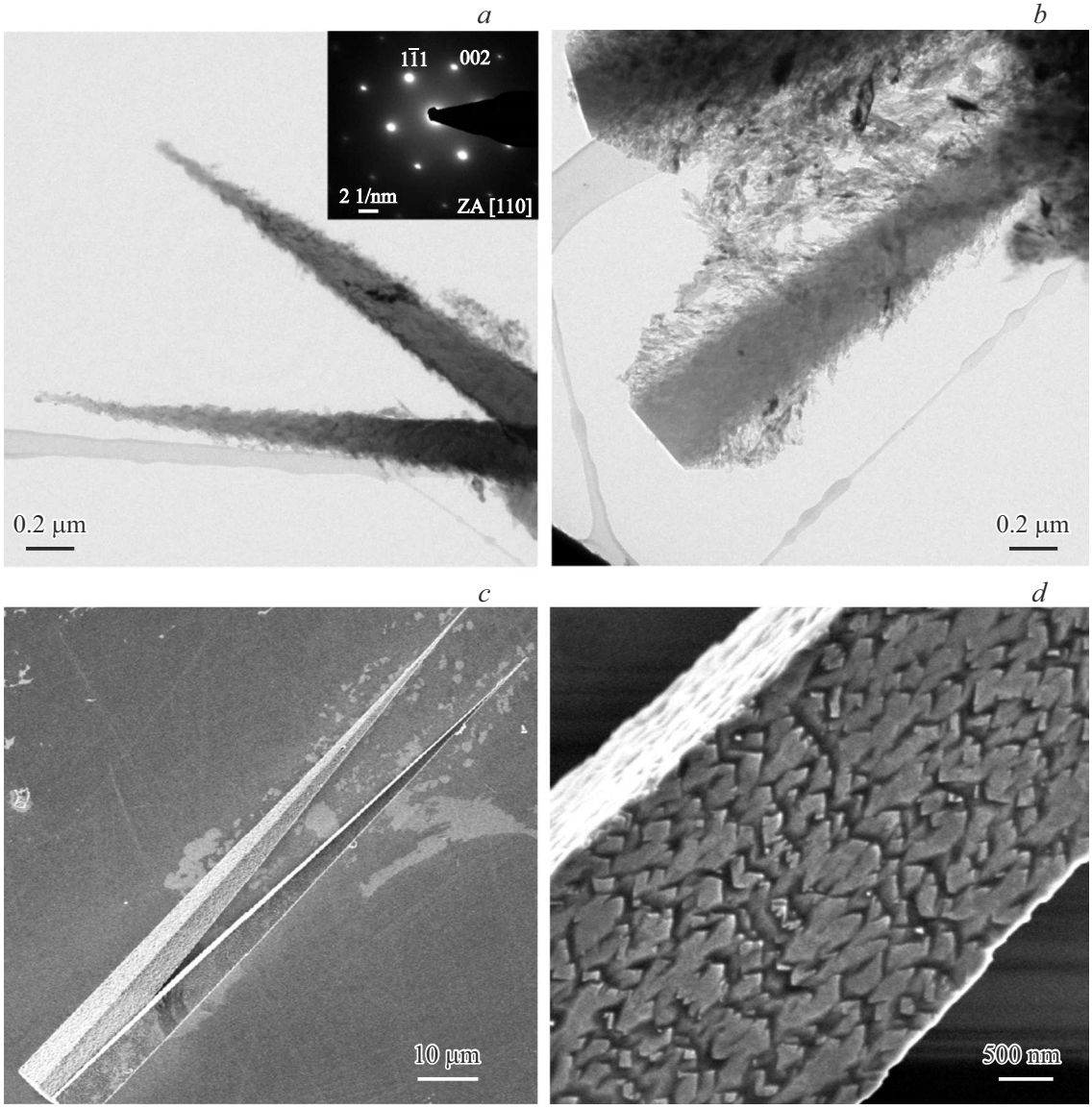


Рис. 1. Типичные примеры изображений алмазных игл, полученных с помощью TEM (a, b), электронной дифракции (вставка на рис. 1, a) и изображений, полученных с помощью SEM (c, d).

приготовления суспензии, ее переноса и высушивания на поверхности подложки для получения и изучения изолированных игл) количество недоокисленного материала существенно уменьшается, что демонстрируют SEM-изображения, представленные на рис. 1, c и d. Из этих изображений видно, что алмазные иглы представляют собой четырехугольные пирамиды с квадратным основанием. При достаточном увеличении видно, что боковая поверхность игл имеет довольно сложную морфологию с характерным размером составляющих элементов в десятки нанометров.

Пространственная разрешающая способность при исследовании оптическими методами КРС и ФЛ ограничена размерами лазерного пучка на поверхности (т.е. составляет около $1-2\,\mu$m). С учетом этого ограничения, а также статистического разброса, спектры КРС и ФЛ были примерно одинаковы как для различных игл, так и для различных областей в пределах каждой иглы по отдельности. На рис. 2 приведен типичный пример спектра, содержащий узкую линию КРС на частоте 1332 cm^{-1} (~ 572 nm), соответствующую монокристаллическому алмазу. В спектре на рис. 2 также присутствуют несколько более широких полос, соответствующих бесфононным линиям люминесценции азотно-вакансионных центров NV^0 (575 nm) и NV^- (637 nm), их фононным повторениям, а также бесфононной линии люминесценции кремний-вакансионных центров SiV (738 nm). Изучению особенностей спектров КРС и ФЛ алмазных иглоподобных кристаллитов посвящено несколько ранее опубликованных работ (см., например, [17]). Для данного исследования существенным является то, что спектры оставались неизменными (в пределах обычного

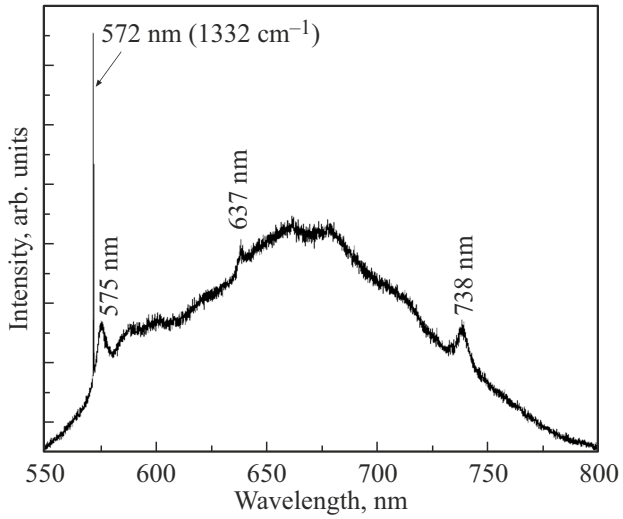


Рис. 2. Типичный спектр от алмазного иглоподобного кристаллита, зарегистрированный при возбуждении лазером на длине волны 532 nm. В спектре присутствует узкая линия на 572 nm, соответствующая линии КРС алмаза с частотой 1332 cm^{-1}. Также в спектре присутствуют линии на 575 nm и 637 nm, соответствующие бесфононным полосам ФЛ центров NV^0 и NV^-, их фононным повторениям и бесфононная линия центров SiV на 738 nm.

статистического разброса) при дополнительном прогреве алмазных игл на воздухе при 690 °C длительностью до 25 h. Такая дополнительная обработка использовалась, в частности, для уменьшения размеров острия (заострения) алмазных игл и их стандартизации по этому параметру. Необходимость такой процедуры была вызвана, в частности, тем, что получаемые алмазные кристаллиты имеют большой разброс в размерах острия (от 2 до 200 nm), что является результатом их образования из случайным образом ориентированных центров нуклеации, расположенных на кремниевой подложке, а также из-за механических разрушений наиболее тонкой и хрупкой части при механическом отделении и манипуляциях. Дополнительная выдержка на воздухе при температуре около 690 °C в течение нескольких часов приводит к постепенному окислению алмазных кристаллитов, что сопровождается уменьшением их длины, поперечного сечения и размеров острия. Выбор уровня температуры (690 °C) для такой обработки определялся тем, что он гарантирует удаление разупорядоченных форм углерода и при этом остается ниже порога окисления кристаллического алмаза [12–16]. Результат обработки наглядно представлен на рис. 3, на котором показаны полученные с помощью оптической микроскопии изображения одной и той же алмазной иглы, расположенной на кремниевой подложке, до и после выдержки при температуре 690 °C, а также SEM-изображение для алмазных игл после аналогичной процедуры.

На оптических микрофотографиях (рис. 3, *a*) видно, как уменьшается длина алмазной иглы в результате прогрева на воздухе при температуре 690 °C. При этом на подложке остаются фрагменты материала, который, видимо, входил в состав иглы в ее исходном состоянии. Более заметны такие остаточные следы на SEM-изображениях (рис. 3, *b*). Однако в случае SEM оказывается технически затруднительно получить изображения одной и той же иглы до и после нагрева на воздухе. Кроме фрагментов остатков материала на подложке на SEM-изображениях видно, что морфология поверхности игл изменяется. Эти изменения наглядно представлены на SEM-изображениях, показанных на рис. 4.

Как видно из SEM-изображений, после прогрева на воздухе при температуре 690 °C поверхность алмазных игл становится гладкой и содержит пирамидальные структуры с субмикронными размерами (поперечные размеры вдоль и высота над поверхностью). Характерной особенностью является наличие на вершинах пирамидальных структур образований в виде сфероподобных частиц нанометрового размера. Анализ с помощью EDX показал, что также, как и фрагменты материала, оставшегося на кремниевой подложке после выдержки алмазной иглы при 690 °C (рис. 3 и рис. 4, *b*), эти частицы состоят из углерода. Сфероподобная форма и отсутствие признаков кристаллического упорядочения указывают на аморфную структуру частиц на вершинах пирамидальных образований и фрагментов материала, оставшегося на подложке после прогрева алмазной иглы при 690 °C.

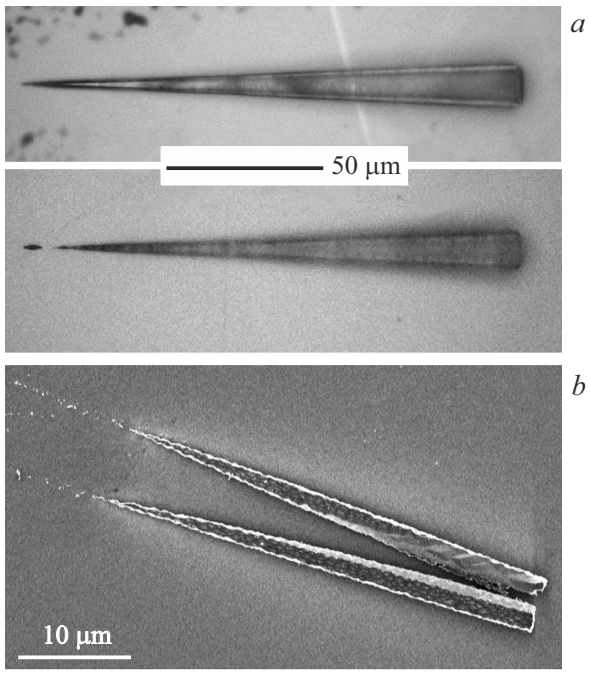


Рис. 3. Оптические микрофотографии (*a*) одной и той же алмазной иглы до (сверху) и после (снизу) выдержки на воздухе при температуре 690 °C в течение 3-х часов и SEM-изображение (*b*) алмазных игл после выдержки на воздухе при температуре 690 °C в течение 25 h.

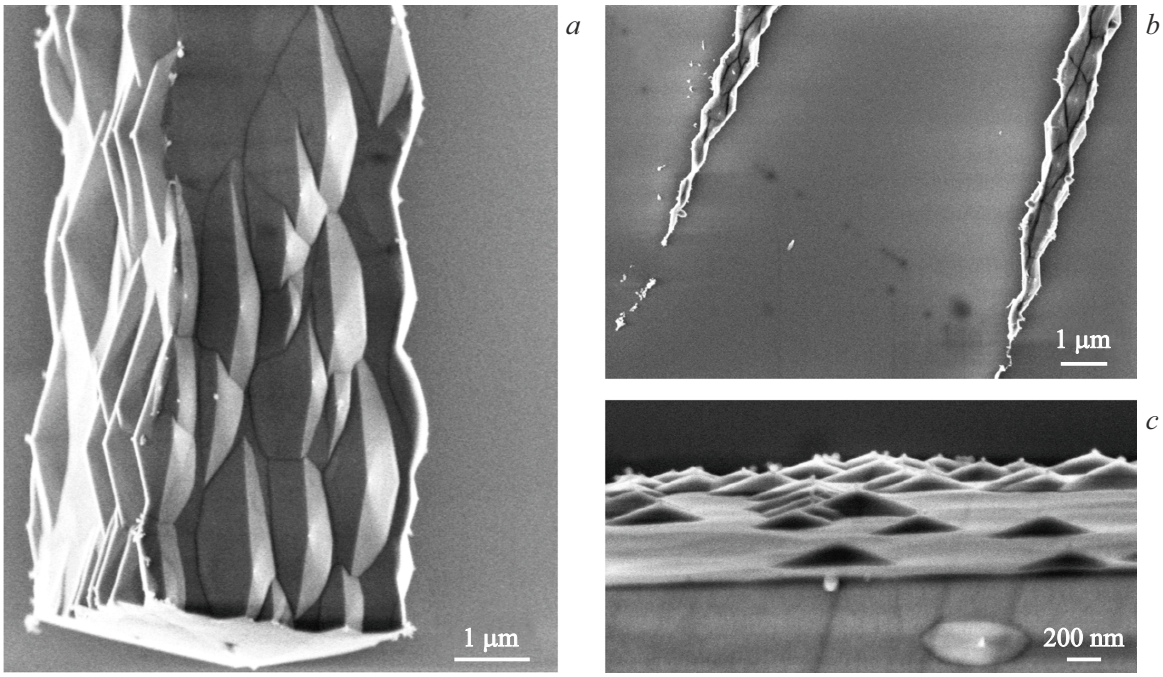


Рис. 4. SEM-изображения участков поверхности алмазных игл после их прогрева на воздухе при температуре 690 °C в течение 25 h: *a* — основание и область, прилегающая к основанию; *b* — острия игл и прилегающие к ним области; *c* — участок поверхности с отдельно расположенными пирамидальными структурами.

Пирамидальные образования на поверхности игл (рис. 4) содержат 6 граней и имеют вытянутую вдоль оси иглы (совпадающей с кристаллографическим направлением [100]) форму с длиной, примерно вдвое превышающей их ширину. При этом основание пирамиды лежит в плоскости, совпадающей или близкой к кристаллографической плоскости (110). Размеры и форма пирамид имеют некоторые различия, появляющиеся, в том числе, при соприкосновении пирамид в случае их плотного расположения (рис. 4, *a*). В области острия алмазного кристаллита, где его поперечные размеры и толщина становятся сопоставимыми с размером пирамидальных образований, профиль иглы заметно отличается от исходного в виде правильной четырехугольной пирамиды (рис. 1, *c*), приобретая характерный волнообразный вид (рис. 4, *b*). На некоторых участках поверхности пирамидальные образования располагаются достаточно изолированно друг от друга, как это видно, например, на левой части рис. 4, *a*, а также на рис. 4, *c* в верхней части изображения (для вида „сбоку“) и в его нижней части (вид „сверху“). Для наглядности на рис. 5, *a* представлены аналогичные SEM-изображения сбоку и сверху для отдельных пирамидальных образований. На рис. 5, *b* представлены схематические изображения морфологии этих пирамидальных образований. Средняя величина характерного угла между ребрами шестигранной пирамиды вблизи вершины по данным измерений, выполненных используя SEM-изображения, составляет $\alpha = 143 \pm 5°$. Боковые грани пирамид отличаются от идеально плоских и имеют некоторую кривизну поверхности, что особенно заметно для больших боковых граней. Для интерпретации наблюдаемой морфологии поверхности игл было проведено кристаллографическое моделирование с использованием программного пакета VESTA. Было установлено, что пирамидальные образования аналогичной формы могут быть сформированы пересечением высокоиндексных плоскостей (321) и (412) кубической решетки алмаза (рис. 5, *c*). Расчетное значение угла при вершине такой пирамиды составляет $\alpha = 141.8°$, что в пределах погрешности совпадает с экспериментальным значением $143 \pm 5°$.

Представленные наблюдения согласуются с общими представлениями о спонтанном фасетировании высокоиндексных плоскостей кристаллов [18,19], которое может происходить, в частности, в результате поверхностной диффузии атомов [20]. Анализ особенностей этого процесса для алмаза показывает возможность его реализации при относительно небольшом нагреве, сопоставимом с 690 °C, использованном в данном исследовании [4,5,21]. Особую роль в спонтанной реконструкции поверхности алмаза играет кристаллографическая плоскость (110), благодаря анизотропному расположению атомов и более высокой поверхностной энергии [8]. Именно для поверхности алмазных кристаллитов с ориентацией близкой к (110) наблюдаются морфологические изменения, обнаруженные в данной работе, что указывает на их вероятный механизм.

Выявленное в ходе проведенных исследований образование гексагональных структур на поверхности алмазных иглоподобных кристаллитов может объясняться

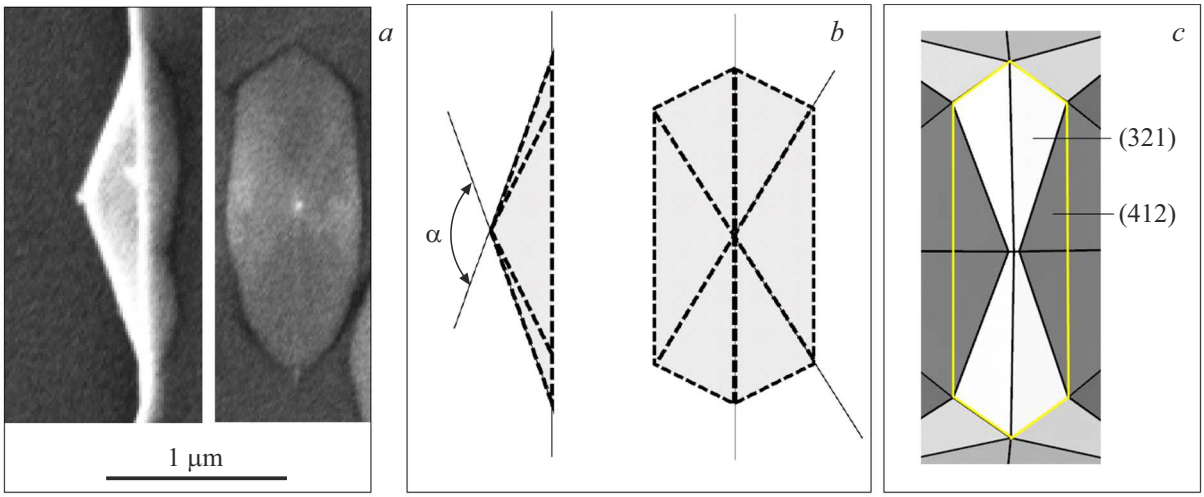


Рис. 5. *a* — SEM-изображения отдельных пирамидальных образований „сбоку“ (изображение слева) и „сверху“ (изображение справа); *b* — схематическое представление морфологии пирамидальных образований с указанием характерного угла при вершине; *c* — кристаллографическая модель огранки пирамидального образования, построенная в программе VESTA, с использованием плоскостей (321) и (412) алмаза.

возникновением на их поверхности взаимопроникающих двойников. Такой механизм был предложен ранее для объяснения морфологических особенностей алмазных кристаллов природного происхождения [22,23]. В отличие от природных алмазов, для которых двойникование проявляется на поверхности кристаллов в результате их травления, для алмазных иглоподобных кристаллитов, полученных методом CVD, это может быть, как результатом поверхностной диффузии атомов, активированной нагревом, так и результатом химического травления при взаимодействии с кислородом воздушной атмосферы. Однако, с учетом относительно невысокой температуры (690 °C) последнее представляется маловероятным. Другим объяснением экспериментальных наблюдений может быть формирование гексагонального алмаза (лонсдейлита). Обсуждение механизмов получения и свойств такой разновидности алмаза составляет предмет многочисленных научных исследований в течение десятилетий [24]. Как правило, в качестве метода получения гексагонального алмаза рассматривается использование высоких давлений (см., например, [25–28]) и обнаружение возможности его получения CVD методом, с одной стороны, может выступать в качестве уникального результата данной работы, но, с другой стороны, требует дополнительных тщательных исследований.

4. Заключение

В ходе проведенных исследований были выявлены характерные особенности в морфологических свойствах алмазных иглоподобных кристаллитов и изменения этих свойств в результате выдержки при температуре 690 °C на воздухе. Монокристаллические алмазные иглы формировались при осаждении из газовой смеси метана и водорода, активированной разрядом постоянного тока, в составе поликристаллических пленок, которые затем подвергались селективному окислению на воздухе для удаления разупорядоченного углеродного материала. Полученные этим способом индивидуальные алмазные иглы имели форму правильных пирамид с квадратным основанием с кристаллографической ориентацией (100) и боковыми гранями с кристаллографической ориентацией близкой к (110). В отличие от гладкой поверхности основания боковые грани имели значительную шероховатость поверхности. После выдержки при температуре 690 °C на воздухе в течение 1–25 h происходило заметное уменьшение размеров алмазных кристаллитов, в том числе уменьшался характерный размер их острия, а также изменялась морфология их боковых граней, исходно шероховатая поверхность которых преобразовывалась в относительно гладкую с расположенными на ней гексагональными образованиями субмикрометрового размера. Наблюдаемые изменения морфологии алмазных иглоподобных кристаллитов могут объясняться частичным удалением разупорядоченного углерода в результате его окисления и поверхностной диффузией атомов, активированной нагревом, приводящей к спонтанному фасетированию из-за возникновения в приповерхностной области взаимопроникающих двойников или из-за формирования гексагонального алмаза. Таким образом, полученные результаты позволили выявить новые особенности процессов трансформации структурно-морфологических свойств алмаза при термическом воздействии и могут быть использованы при разработке методов управления морфологией алмазных микро- и наноструктур для расширения возможностей их практического применения.

Благодарности

Авторы выражают благодарность А.Л. Чувилину за помощь в проведении TEM и SEM исследований. В работе использовалось оборудование Учебно-методического центра литографии и микроскопии МГУ имени М.В. Ломоносова.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-12-00068, https://rscf.ru/project/25-12-00068/).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] А.Е. Воробьев, К.А. Воробьев. Наноалмазы. Мир науки, М. (2018). 161 с.
[2] X. Wang, J. Xu, S. Ge, L. Zou, D. Sang, J. Fan, Q. Wang. APL Mater. **11**, *9*, 090603 (2023). DOI: 10.1063/5.0170145
[3] M. Kiss, T. Graziosi, A. Toros, T. Scharf, C. Santschi, O.J.F. Martin, N. Quack. Opt. Express **27**, *21*, 30371 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.030371
[4] C. Misbah, O. Pierre-Louis, Y. Saito. Rev. Mod. Phys. **82**, *1*, 981 (2010). DOI: 10.1103/RevModPhys.82.981
[5] A.A. Stekolnikov, F. Bechstedt. Phys. Rev. B **72**, *12*, 125326 (2005). DOI: 10.1103/PhysRevB.72.125326
[6] M. Wolfer, J. Biener, B.S. El-Dasher, M.M. Biener, A.V. Hamza, A. Kriele, C. Wild. Diam. Relat. Mater. **18**, *5–8*, 713 (2009). DOI: 10.1016/j.diamond.2008.11.034
[7] Н.А. Феоктистов, С.А. Грудинкин, В.Г. Голубев, М.А. Баранов, К.В. Богданов, С.А. Кукушкин. ФТТ **57**, *11*, 2125 (2015).
[8] X. Li, J. Wei, J. Gao, Y. Wang, Y. Ma, P. An, S. Yu, K. Zheng. Coatings **16**, *2*, 218 (2026). DOI: 10.3390/coatings16020218
[9] V.I. Kleshch, A.S. Orekhov, A.E. Pishchulina, I.V. Sapkov, D.N. Khmelenin, A.B. Loginov, R.R. Ismagilov, A.N. Obraztsov. Carbon **221**, 118936 (2024). DOI: 10.1016/j.carbon.2024.118936
[10] L. Arnoldi, M. Spies, J. Houard, I. Blum, A. Etienne, R. Ismagilov, A. Obraztsov, A. Vella. Appl. Phys. Lett. **112**, *14*, 143104 (2018). DOI: 10.1063/1.5019672
[11] Б.А. Логинов, В.А. Беспалов, А.Н. Образцов, А.Б. Логинов, В.Б. Логинов, Ю.В. Хрипунов, М.А. Щербина, Д.А. Севостьянова, Д.С. Богданова, Р.Г. Горбачев, К.Е. Кондратьева, М.А. Лебедева, А.А. Мульгин, Д.А. Шевченко. Наноиндустрия **17**, *5*, 248 (2024). DOI: 10.22184/1993-8578.2024.17.5.248.258
[12] A.N. Obraztsov, P.G. Kopylov, A.L. Chuvilin, N.V. Savenko. Diam. Relat. Mater. **18**, *10*, 1289 (2009). DOI: 10.1016/j.diamond.2009.05.001
[13] A. Zolotukhin, P.G. Kopylov, R.R. Ismagilov, A.N. Obraztsov. Diam. Relat. Mater. **19**, *7–9*, 1007 (2010). DOI: 10.1016/j.diamond.2010.03.005
[14] A.A. Zolotukhin, M.A. Dolganov, A.N. Obraztsov. Diam. Relat. Mater. **37**, 64 (2013). DOI: 10.1016/j.diamond.2013.04.003
[15] A.A. Zolotukhin, M.A. Dolganov, A.M. Alekseev, A.N. Obraztsov. Diam. Relat. Mater. **42**, 15 (2014). DOI: 10.1016/j.diamond.2013.09.003
[16] А.М. Алексеев, Р.Р. Исмагилов, А.Н. Образцов. Кристаллография **65**, *1*, 152 (2020). DOI: 10.31857/S0023476120010026
[17] S.A. Malykhin, R.R. Ismagilov, F.T. Tuyakova, E.A. Obraztsova, P.V. Fedotov, A. Ermakova, P. Siyushev, K.G. Katamadze, F. Jelezko, Yu.P. Rakovich, A.N. Obraztsov. Opt. Mater. **75**, 49 (2018). DOI: 10.1016/j.optmat.2017.10.019
[18] R. Ubic. Crystallography and Crystal Chemistry. Springer, Cham (2024). 442 p. DOI: 10.1007/978-3-031-49752-0
[19] V.A. Shchukin, D. Bimberg. Rev. Mod. Phys. **71**, *4*, 1125 (1999). DOI: 10.1103/RevModPhys.71.1125
[20] T.V. Savina, A.A. Golovin, S.H. Davis, A.A. Nepomnyashchy, P.W. Voorhees. Phys. Rev. E **67**, *2*, 021606 (2003). DOI: 10.1103/PhysRevE.67.021606
[21] J.I.G. Enriquez, H.H. Halim, T. Yamasaki, M. Michiuchi, K. Inagaki, M. Geshi, I. Hamada, Y. Morikawa. Carbon **226**, 119223 (2024). DOI: 10.1016/j.carbon.2024.119223
[22] A. Pavlushin, D. Zedgenizov, E. Vasil'ev, K. Kuper. Crystals **11**, *1*, 17 (2021). DOI: 10.3390/cryst11010017
[23] А.Д. Павлушин. Геохимия **70**, *2*, 146 (2025). DOI: 10.31857/S0016752525020032
[24] M. Peplow. Nature **651**, *8105*, 290 (2026). DOI: 10.1038/d41586-026-00711-9
[25] S. Lai, X. Yang, J. Shi, S. Liu, Y. Guo, L. Yan, J. Zang, Z. Zhang, Q. Jia, J. Sun, S. Cheng, C. Shan. Nature **651**, *8106*, 621 (2026). DOI: 10.1038/s41586-026-10212-4
[26] T. Yu, S. Zhu. Matter Radiat. Extremes **11**, *3*, 033801 (2026). DOI: 10.1063/5.0310909
[27] S.-C. Zhu, G.-W. Chen, X.-H. Yuan, Y. Cheng, M.-H. Wan, B. Xu, M.-S. Wang, H. Tang, Y. Hou. J. Am. Chem. Soc. **147**, *2*, 2158 (2025). DOI: 10.1021/jacs.4c16312
[28] В.А. Грешняков. Письма в ЖЭТФ **117**, *4*, 306 (2023). DOI: 10.31857/S1234567823040109

Редактор А.Н. Смирнов