

08

Цепочки композитных наночастиц графен : h-BN и фторированный графен : V₂O₅ на наноструктурированной поверхности полимера

© И.В. Антонова^{1,2}, В.А. Селезнев¹, Н.А. Небогатикова¹, А.И. Иванов¹, В.С. Тумашев¹

¹ Институт физики полупроводников им. Ржанова СО РАН,
Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, Россия

E-mail: antonova@isp.nsc.ru

Поступила в Редакцию 7 декабря 2023 г.

В окончательной редакции 15 января 2024 г.

Принята к публикации 28 января 2024 г.

Исследованы структуры, сформированные при нанесении суспензий композитных наночастиц на решетки из массива протяженных канавок, сформированных с помощью импринт-нанолитографии на поверхности полимера. Наночастицы V₂O₅, покрытые фторированным графеном (FG), или композитные наночастицы графен (G):h-BN были нанесены на полимер с помощью 2D-печати. Показано, что обработка полимерных решеток кислородной плазмой, дополнительное напыление и удаление слоя золота модифицируют свойства поверхности и позволяют организовать различные варианты сборки наночастиц на структурированной поверхности полимера. Без обработки поверхность решетки гидрофобная и наночастицы практически с ней не взаимодействуют. Обработка кислородной плазмой приводила к формированию слоя из наночастиц по всей поверхности решетки, с заполнением в первую очередь наноканавок. Долговременная активация была получена путем напыления золота с последующим его механическим удалением с использованием метода адгезивного переноса. В случае долговременной активации поверхности наночастицы располагаются исключительно на верхней части полимерных полос, практически не уменьшая глубину рельефа решетки. Частицы FG:V₂O₅ располагаются в середине полимерных полос (наногребня), тогда как G:h-BN формировали две цепочки наночастиц вдоль ребер гребня.

Ключевые слова: импринт-литография, полимерная решетка, долговременная активация, наночастицы, 1D-цепочки, электрические свойства.

DOI: 10.61011/FTT.2024.03.57481.270

1. Введение

Гибкая (растягиваемая, носимая) электроника включает в себя целый класс различных электронных устройств, которые могут быть подвергнуты механическим воздействиям в определенных рамках (согнуты, свернуты, растянуты) без ущерба для их функциональных свойств. Ожидается, что гибкая электроника в ближайшем будущем позволит создавать всевозможные гаджеты, сенсорные экраны, сенсоры, огромный спектр медицинских приложений, устройств связи и Интернета [1–5]. Развитие гибкой электроники сопряжено с интенсивным развитием стрейнтроники, относительно нового направления в физике конденсированного состояния вещества, использующего методы деформационной инженерии и физические эффекты, наведённые механическими деформациями в твёрдых телах, для реализации нового поколения устройств информационных, сенсорных и энергосберегающих технологий [5,6].

Наноструктурированные подложки обеспечивают уникальную возможность для создания структур из наночастиц с контролируемым распределением и свойствами. Выбирая сочетание подложка/наночастица, технологию обработки и создания структур, можно задать

потенциал применения получаемых структур для нанoeлектроники (метаматериалы, плазмонные материалы), биосенсорики или медицины [7–9]. Нужно отметить, что наноструктурирование подложек позволяет создавать различающиеся с точки зрения химической активности области, в частности, благодаря введению локальной деформации. Кроме того, деформации зачастую способствуют увеличению адсорбционной способности локальных областей за счет снижения энергетических барьеров [10]. Так, селективное осаждение тонкого переходного слоя металла, создающего деформации и стимулирующие рост островков плазмонных металлических наночастицах обсуждается в работе [11], представляет собой новую стратегию создания уникальных морфологий, которые трудно достичь с помощью традиционных процессов. Аналогичный простой, экономически эффективный метод создания селективного осаждения наночастиц был использован для производства сенсоров на основе углеродного нановолокна [12].

В данной работе найдены условия формирования и свойства одномерных цепочек из функциональных наночастиц на решетке из полимерного материала на основе поликарбоната: частицы V₂O₅ декорированные фторированным графеном для мемристоров и композит-

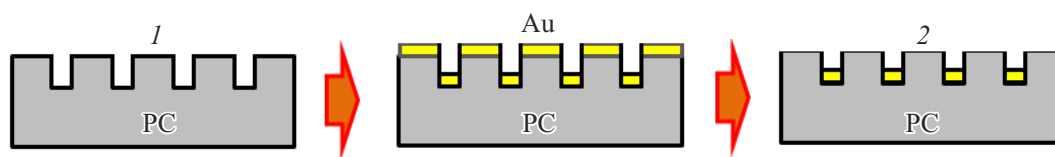


Рис. 1. Схематическое изображение: 1 — решетки создаваемой с помощью импринт-литографии на подложке из материала на основе поликарбоната и 2 — изображение решетки с активированной поверхностью за счет напыления и механического удаления слоя золота.

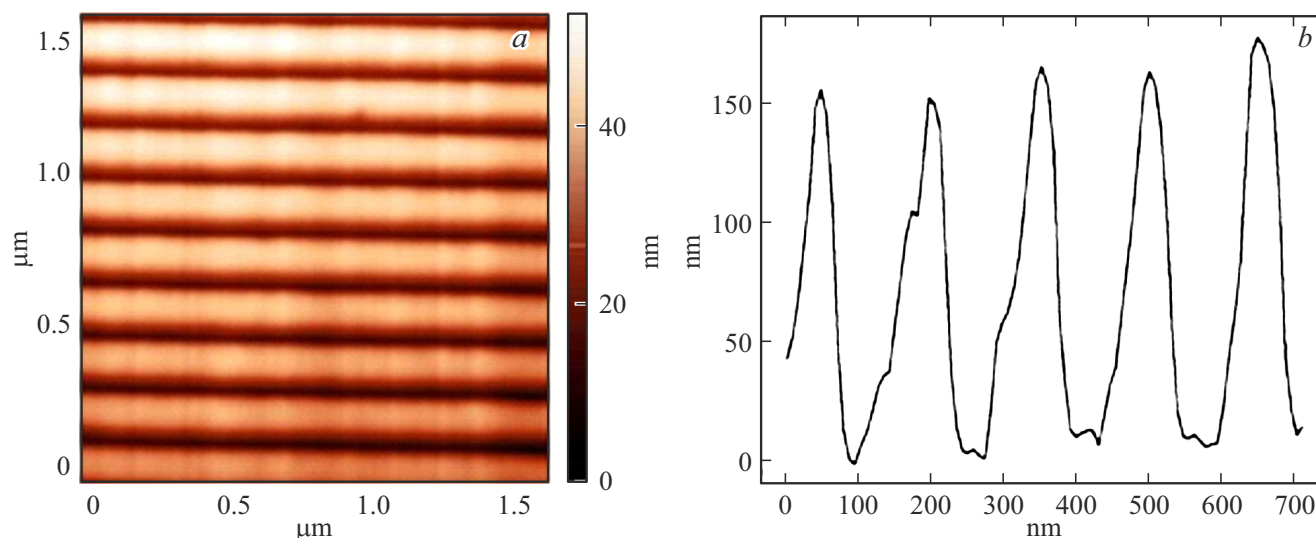


Рис. 2. *a* — AFM-изображение поверхности полимерной решетки после напыления слоя Au толщиной 30 нм и его удаления с верхней части (гребней) решетки (глубина канавок 150 нм, период 180 нм), *b* — рельеф поверхности в направлении поперек канавок решетки, подтверждающий ожидаемые параметры решетки.

ные частицы из графена и гексагонального нитрида бора (h-BN) формировали цепочки на наногребнях решетки (V₂O₅/FG — цепочки по центру гребня, а G:h-BN — вдоль ребер гребня).

2. Методы получения и исследования структур

С помощью наноимпринт-литографии на поверхности полимерной подложки (IPS, материал на основе поликарбоната, Obducat, Швеция) были изготовлены решетки из массивов наноканавок шириной 80 нм, глубиной 150 нм и периодом 180 нм. Более подробно технология изготовления описана в работе [13].

В работе использованы два способа активации поверхности для изменения адгезии между полимерными решетками и наночастицами. В первом случае использовалась обработка в кислородной плазме мощностью 100 W длительностью 12 и 30 с.

Для реализации второго способа активации на решетку был напылен слой золота толщиной ~ 30 нм. Затем с помощью адгезивного переноса [13] золото было удалено с поверхности верхней части решетки —

наногребней (рис. 1). Исследование проводимости полученной таким образом решетки показано, что верхняя часть решетки не обладает проводимостью, тогда как нанополоски золота на дне канавок имеют сопротивление 150–300 Ом/□ при измерении вдоль нанополосок. Т.е. удаление золота с верхней части решетки происходит полностью с точки зрения электропроводности. В дальнейшем будем называть такие подложки активированными. Изображение такой решетки, полученное с использованием атомно-силовой микроскопии (AFM) представлено на рис. 2. Обнаружено, что свойства таких подложек с точки зрения активации поверхности остаются неизменными на протяжении нескольких месяцев и это позволяет использовать их для нанесения наночастиц.

Наночастицы двух типов были использованы в данной работе (1) Методом золь-гель были синтезированы наночастицы V₂O₅ размером ~ 5 нм [14]. Фторированный графен был получен путем фторирования частиц графена (размер 100–300 нм и толщина до 5 нм), созданных путем расслоения частиц природного очищенного графита в водном растворе плавиковой кислоты [15]. В процессе фторирования происходит дополнительное расслоение и уменьшение частиц, результирующий раз-

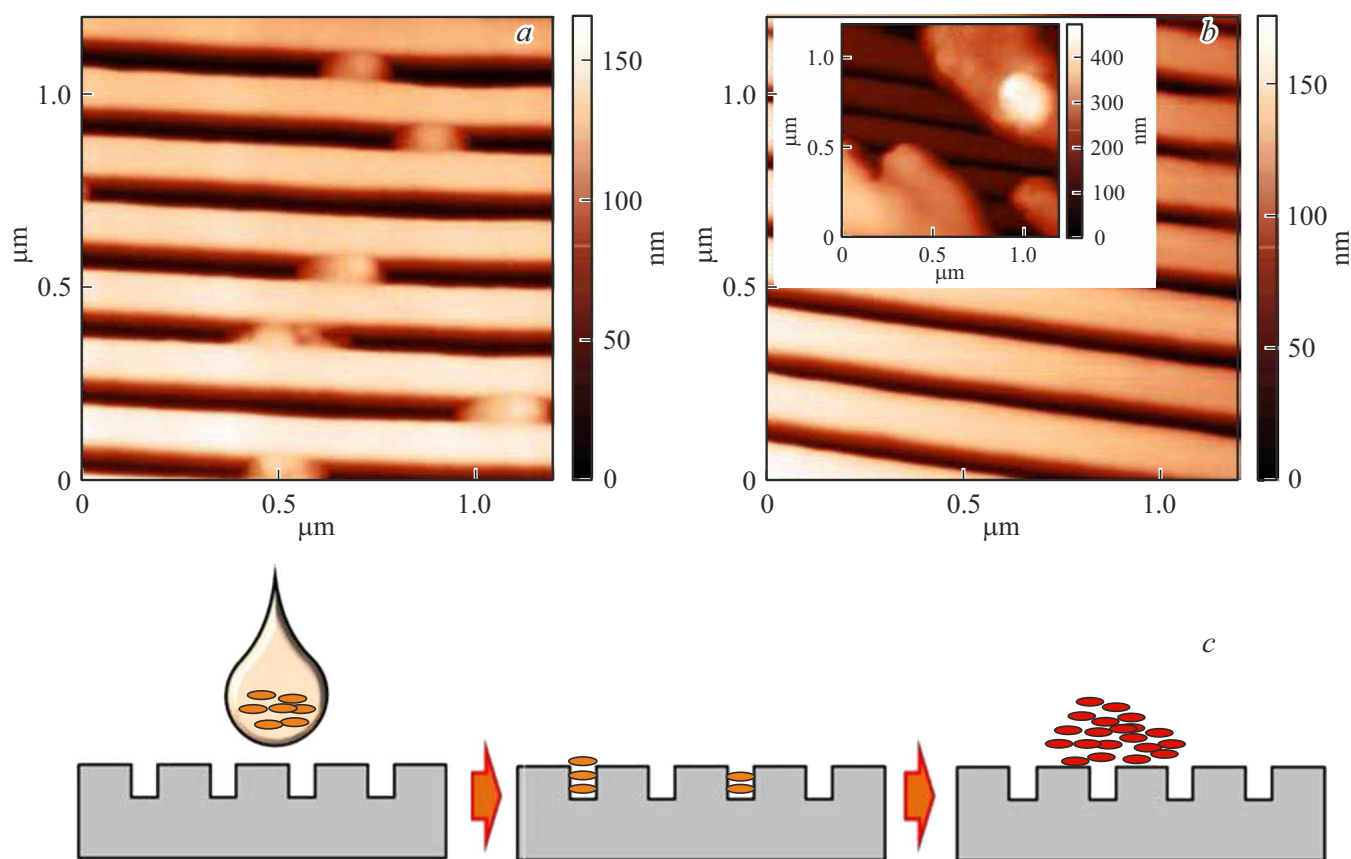


Рис. 3. AFM-изображение: *a* — частиц FG:V₂O₅ в канавках неактивированной решетки и *b* — частиц G:h-BN на этой исходной решетке. На вставке — AFM-изображение с другим масштабом и крупными кластерами частиц, *c* — схематичное изображение неактивированной решетки с нанесенными частицами.

мер FG составлял 30–50 nm при толщине до 2 nm [16]. Из частиц V₂O₅ и FG были созданы суспензии с содержанием частиц 1 mg/ml в водном растворе этилового спирта и воды в соотношении 70:30%. Соединение суспензий с частицами FG и V₂O₅ в соотношении 1:1 с последующей ультразвуковой обработкой позволили сформировать композитные наночастицы, когда фторированный графен декорирует благодаря хорошей адгезии частицу V₂O₅, приводя к созданию композитной наночастицы FG:V₂O₅ с гидрофильной поверхностью. Ранее было показано, что такие наночастицы демонстрируют резистивные переключения, перспективные для изготовления мемристоров [17].

Другой тип наночастиц был получен из частиц графена (размер 100–150 nm, толщина до 2 nm) и частиц гексагонального нитрида бора (размер 20–50 nm, толщина до 2 nm), синтезированных в плазме. Соотношение компонентов в композитной суспензии составляла 1:1, а массовая доля частиц в исходных суспензиях 1 mg/ml. Свойства таких частиц более подробно описаны в работе [18]. В частицах G:h-BN значительную роль играют полярные частицы гексагонального нитрида бора. Они определяют и быстрый процесс кластеризации и, скорее всего, взаимодействие с подложкой. Латеральный размер

композитных частиц составляет 80–90 nm, а их толщина — 10–15 nm.

С помощью 2D-печати на исходные и активированные наноструктурированные поверхности полимерных подложек были нанесены композитные частицы G:h-BN или FG:V₂O₅. Печать позволяла наносить тонкий ровный слой наночастиц. Количество печатных слоев варьровалось от 1 до 3. Для печати использовался струйный принтер Dimatix FUJIFILM DMP-2831. Размер капли, наносимой принтером, составлял ~ 50 μm, а площадь напечатанной области составляла несколько квадратных миллиметров.

Для получения изображений поверхностей исследуемых пленок и оценки рельефа поверхности использовалась атомно — силовой микроскоп Solver PRO NT-MDT. Измерения проводились в контактном и полуконтактном режимах. Электрические характеристики изготовленных пленок исследовались с использованием четырех зондового оборудования JANDEL и испытательной установки HM21 при комнатной температуре (Jandel Engineering Limited, Лимслейд, Великобритания). Вольт-амперные характеристики измерялись также пикоамперметром Keithley (модель 6485) на образцах, снабженных двумя контактами, изготовленными из серебра.

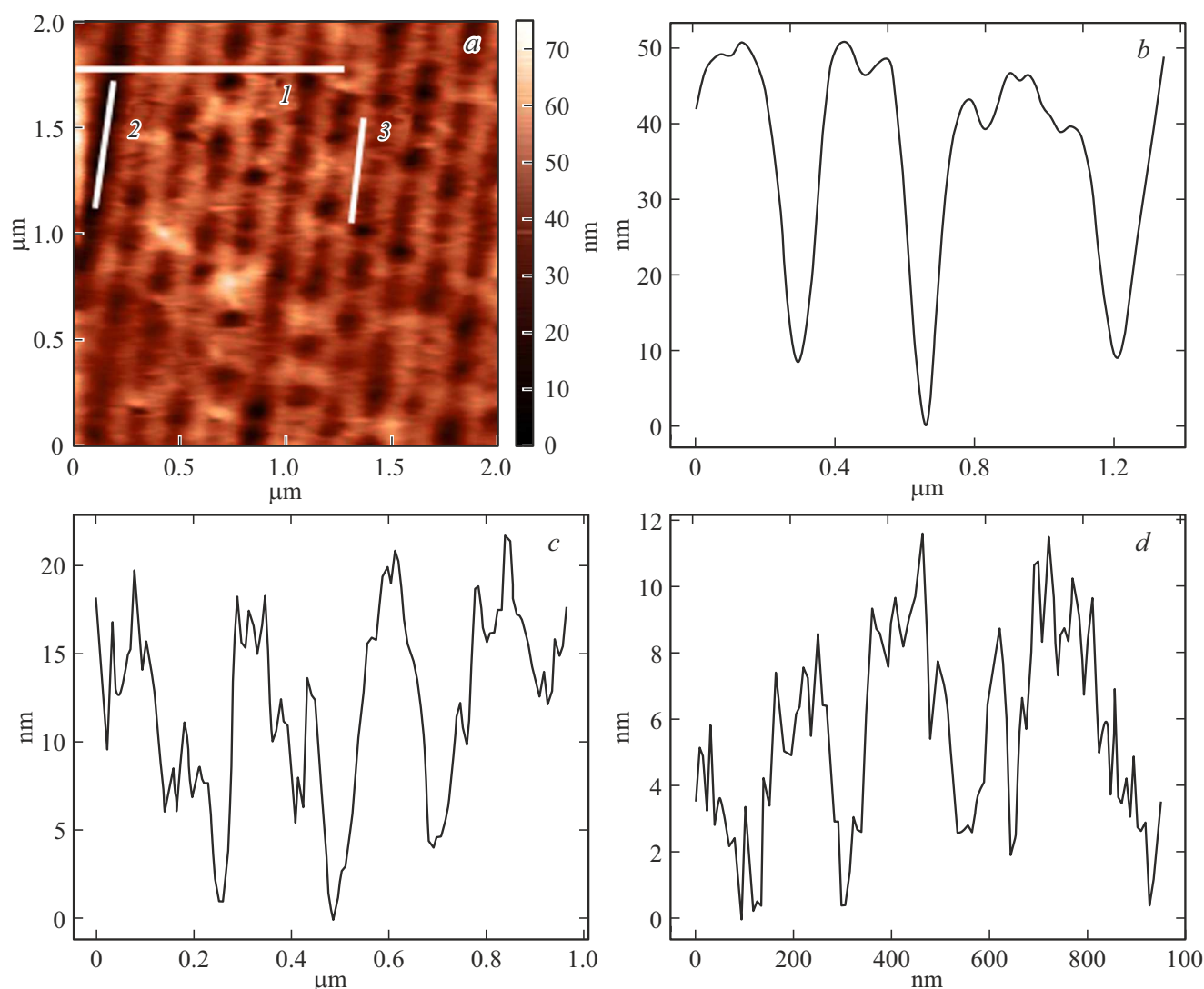


Рис. 4. *a* — AFM-изображение и *b, c, d* — рельеф поверхности решетки после активации в плазме (100 W, 30 s) и нанесения частиц FG: V_2O_5 . Рельеф поверхности *b* — вдоль линии 1, *c* — вдоль линии 2 и *d* — вдоль линии 3.

3. Экспериментальные результаты

Если взять исходную структурированную, но неактивированную подложку, и нанести частицы, то оказывается, что частицы не взаимодействуют с решеткой и можно наблюдать либо стекание капель суспензии в канавки (FG: V_2O_5), или просто образование относительно крупных частиц на поверхности решетки, которые не замечают ее структурирования. Данные АСМ представлены на рис. 3.

Основной особенностью нанесения наночастиц FG: V_2O_5 на поверхность, активированную кислородной плазмой, является взаимодействие частиц с решеткой и заполнение канавок решетки. Так, профиль, соответствующий линии 1 рис. 4, *a*, проведенной поперек наноканавкам решетки, показывает глубину 40–50 nm вместо исходной глубины 150 nm (рис. 4, *b*). Профили, соответствующие линиям 2 и 3 рис. 4, *a*, проведенным

по дну наноканавки и по вершине наногребня, имеют рельеф 15–20 nm и 6–8 nm соответственно. Наблюдаемый рельеф связан, скорее всего, с заполнением всей поверхности и, в первую очередь, канавок наночастицами. Исследование электрических свойств нанесенной пленки показало отсутствие проводимости. Использование второго более слабого режима обработки в плазме (100 W, 12 s) привел к аналогичному результату.

После активации полимерной решетки с помощью напыления и удаления слоя золота ситуация меняется. По данным AFM нанесенные 2D-печатью наночастицы располагаются исключительно на вершинах наногребней, не уменьшая глубину наноканавок решетки.

Рассмотрим более подробно результаты нанесения композитных частиц FG: V_2O_5 на наноструктурированную поверхность. В случае печати 1 слоя суспензии на AFM-изображении (рис. 5) видны отдельные наночастицы или их кластеры высотой 10 nm, которые рас-

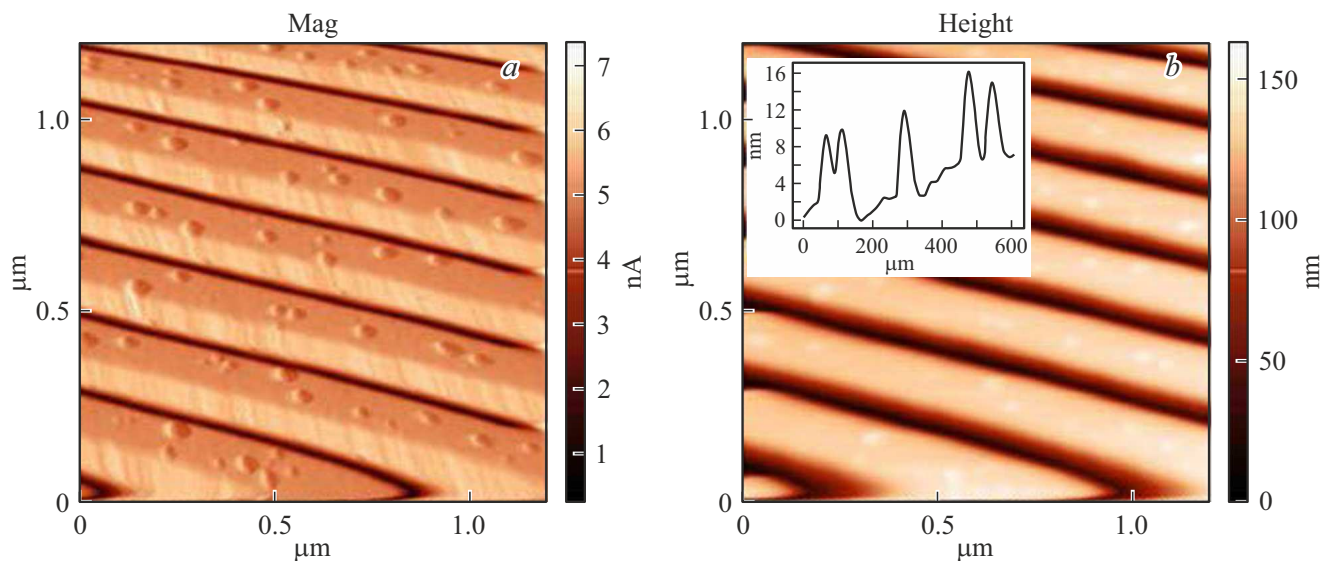


Рис. 5. AFM-изображения поверхности активированной решетки после нанесения 1 слоя наночастиц $FG:V_2O_5$ в режимах *a* — Mag и *b* — рельефа поверхности. На вставке характерный профиль, проведенный вдоль вершины отдельного гребня, различимы отдельные наночастицы высотой 10 нм.

полагаются на вершинах наногребней решетки. В случае печати 3 слоев частиц получается более плотный слой, покрывающий наногребни решетки (см. рис. 6). На профиле в поперечном направлении (рис. 6, *b*) видно, что высота наногребней или глубина наноканавок увеличились приблизительно на 10 нм. В результате зонд AFM хуже разрешает дно наноканавок. Профиль поверхности вдоль вершины наногребня решетки (рис. 6, *d*) позволяет сделать вывод, что наночастицы и их кластеры имеют латеральный размер 80–90 нм, толщину 8–12 нм и образуют одномерные цепочки на вершинах гребней.

На слоях $FG:V_2O_5$ наблюдаются резистивные переключения с низкими напряжениями 0.005–0.04 В и двухуровневыми переключениями (см. рис. 7). Аналогичные эффекты (снижение напряжения переключения до величин 0.1–0.5 В и появление 2–3 уровневого переключений) наблюдались для кроссбар структур с тонкими (1–2 монослоя из частиц) активными слоями $FG:V_2O_5$ на неструктурированных подложках. Структурирование подложек привело к дальнейшему уменьшению напряжения переключения, скорее всего, благодаря формированию 1D цепочек из $FG:V_2O_5$ частиц.

Далее рассмотрим нанесение композитных частиц G:h-BN с помощью печати на активированную поверхность решетки. Рис. 8 показывает изображения поверхности наноструктурированных подложек, с нанесенными методом 2D струйной печати слоями наночастиц G:h-BN. Профиль поперечного сечения наноструктурированной подложки, со слоем наночастиц G:h-BN, соответствующим трем проходам печати приведен на рис. 9. Как видно из рельефа поверхности поперек решетки частицы декорируют края выпуклых полимерных полос, формируя 1D-цепочки из композитных частиц. Такой результат был ожидаем, так как на краях ступенек из-за

локальных деформаций имеет место снижение барьера для физической адсорбции наночастиц [19].

Измерение проводимости с использованием четырех зондовой головки строго вдоль этих цепочек дало поверхностное сопротивление $R = 50\text{--}70 \text{ kOhm/sq}$, а незначительный разворот образца приводил к полной блокировке проводимости. На рис. 10 представлены вольт-амперные характеристики, измеренные между серебряными контактами на поверхности решетки (в проводимости участвовали несколько полосок решетки) в зависимости от расстояния между контактами, контакты отстояли друг от друга на расстоянии 2 мм. Сопротивление контактов составляло $R_c = 2\text{--}4 \text{ Ohm}/\square$.

Частицы G:h-BN на структурированной и активированной подложке демонстрируют существенно более высокую проводимость (10–20 мА при напряжении 1–2 В) по сравнению с наночастицами $FG:V_2O_5$. Это связано с тем, что при измерении на Ag контактах с диаметром $\sim 300 \text{ nm}$ участвовало $3 \cdot 10^3$ цепочек наночастиц и, соответственно, ток, протекающий по одной цепочке можно оценить как $\sim 1 \text{ mA}$.

4. Обсуждение

Активация полимерных подложек, как метод подготовки поверхности для нанесения наночастиц или пленок — хорошо известный подход. Так, обработка в плазме является стандартным методом активации поверхности, которая актуальна примерно в течение 30 мин, что не очень удобно в случае использования различных технологий для создания структур. Как показано выше, активация в кислородной плазме привело к нарушению

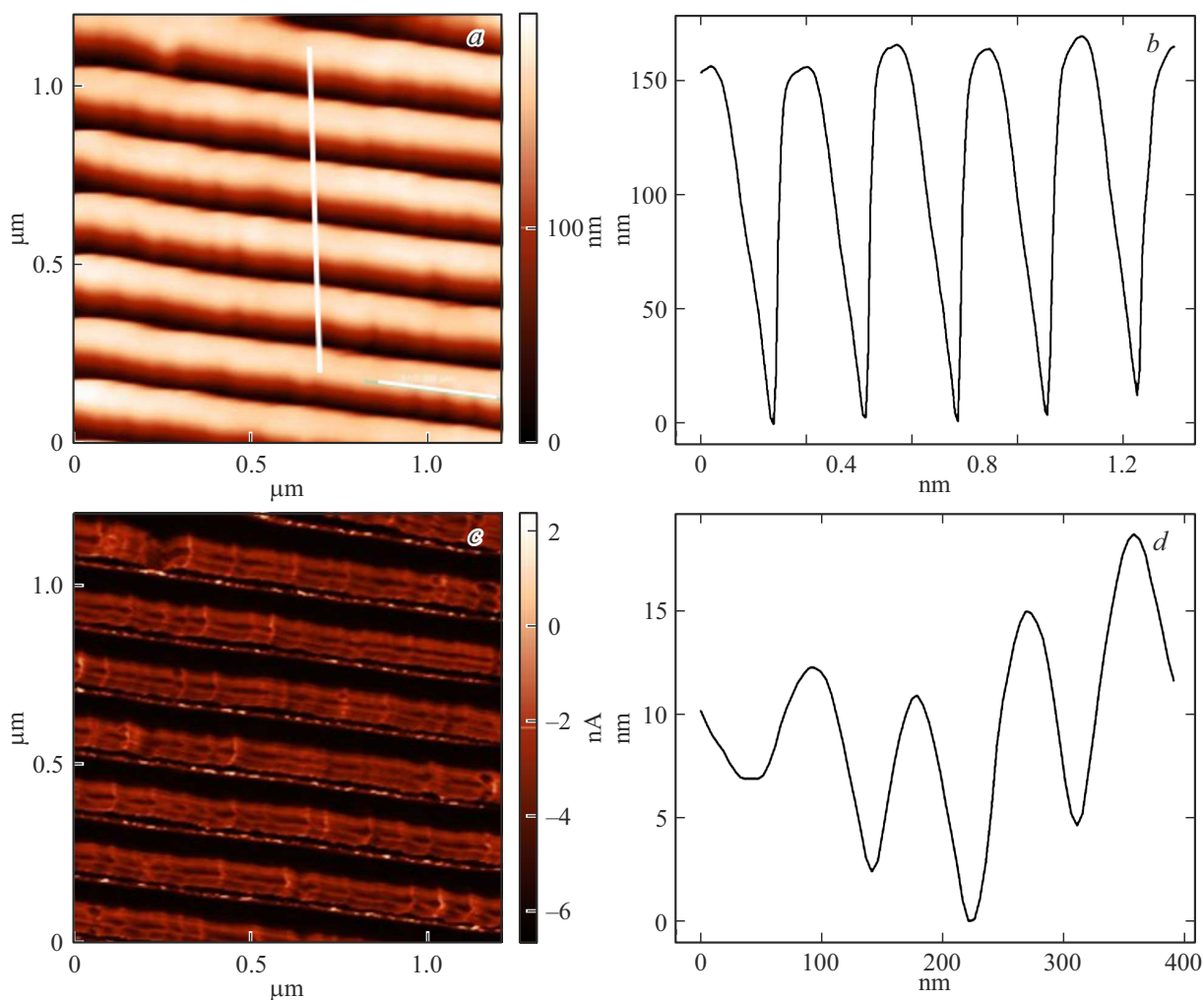


Рис. 6. *a* — AFM-изображение и *c* — MagSin-изображение поверхности наноструктурированной подложки с осажденными частицами FG:V₂O₅, (*b, d*) — профили поверхности поперек наноканавок (*b*) и вдоль вершины наногребня (*d*) соответствуют белым линиям на рис. 6, *a*.

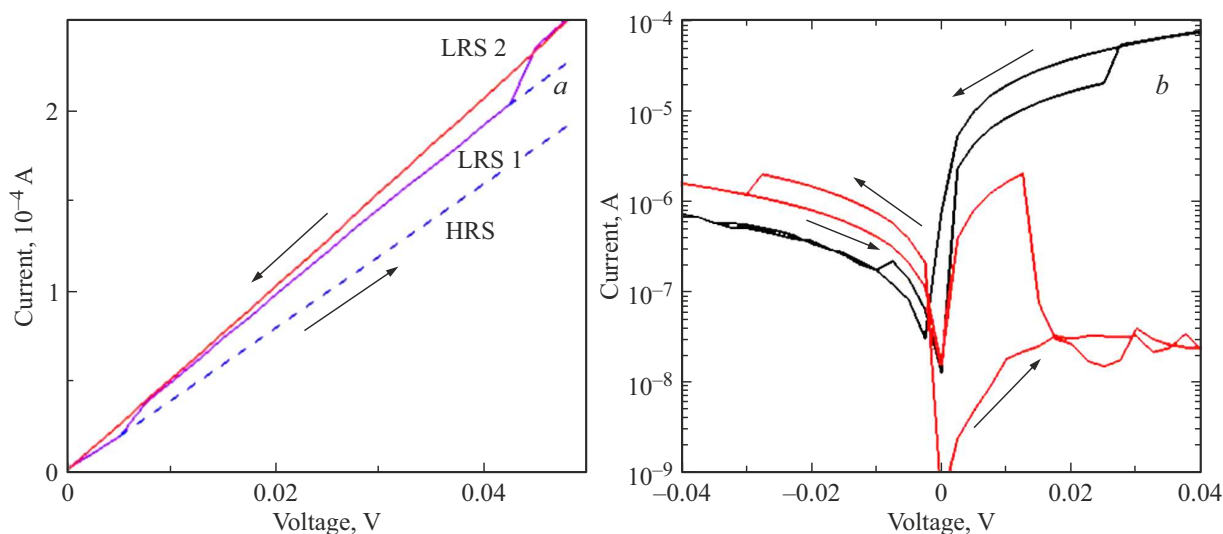


Рис. 7. Переключения, наблюдаемые для цепочек наночастиц FG:V₂O₅ вдоль цепочек, формирующихся при нанесении частиц на решетку с использованием 2D-печати: *a* — один проход печати наночастиц FG:V₂O₅, *b* — три прохода печати наночастицами FG:V₂O₅. Напряжение подавалось между контактами Ag на поверхности решетки, разные характеристики на *b* соответствуют разным контактам на поверхности.

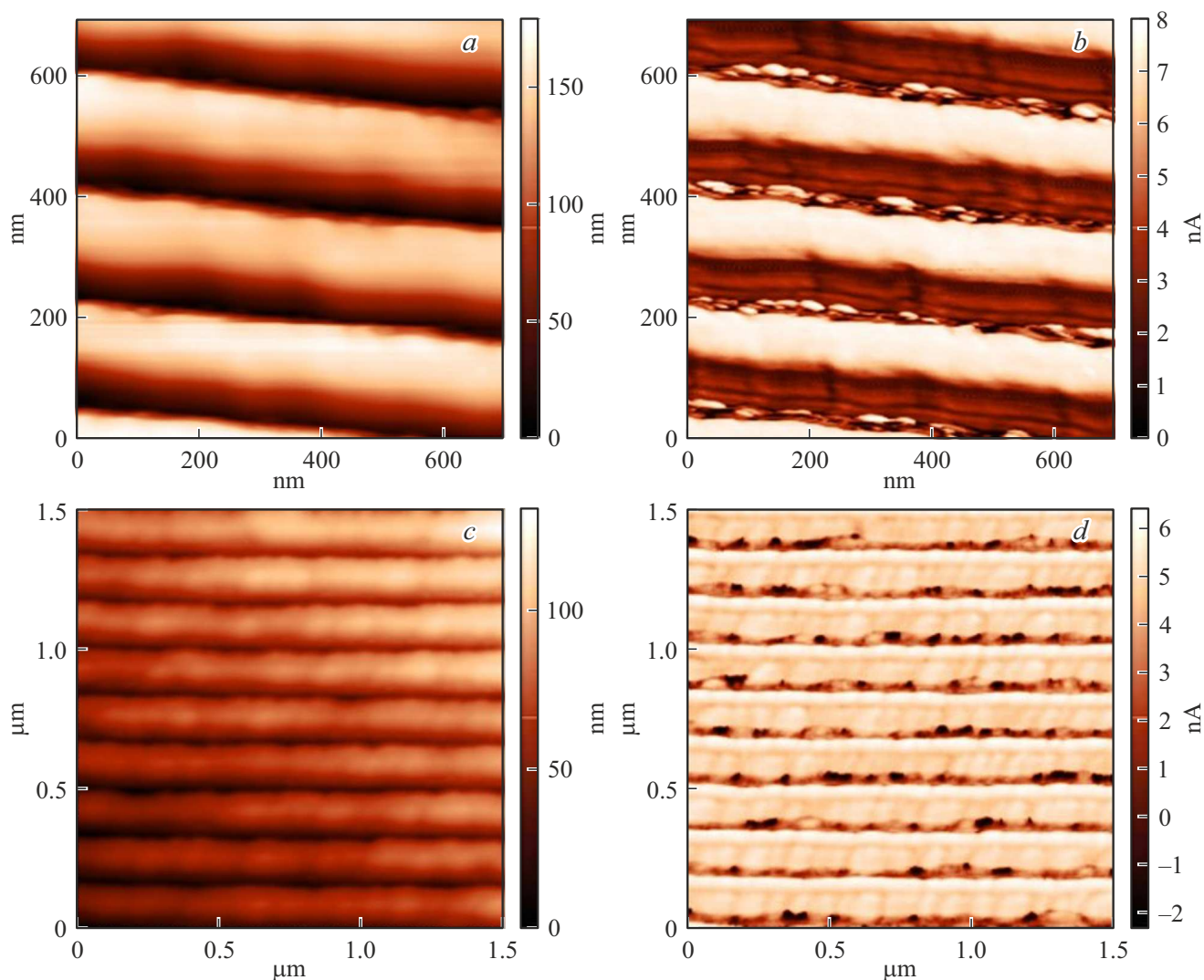


Рис. 8. *a, c* — AFM- и *b, d* — MagSin-изображения поверхности решеток с нанесенными методом 2D струйной печати наночастицами G:h-BN. *a, b* — один печатный слой, *c, d* — три печатных слоя.

решетки и заполнению канавок. Долговременная активация с помощью напыления — удаления золота представляет интерес для использования наноструктурированных подложек. Физическая причина активации поверхности, скорее всего, связана с присутствием следов золота на поверхности полимера после механического удаления слоя золота с верхней части решетки. Хранение таких подложек в течение, по крайней мере, нескольких месяцев сохраняло состояние активированной поверхности полимера, когда можно было наносить на поверхность наночастицы с формированием цепочек в центре или на ребрах решетки.

Разное расположение наночастиц (рис. 11) связано с разными типами взаимодействия наночастиц с подложкой. Характеризуя свойства наночастиц FG:V₂O₅ нужно отметить, что частицы имеют гидрофильную поверхность частиц, что определяется фторированным графеном, для пленок из FG характерна крайне низ-

кая плотность электрически активных центров N_e ($N_e < 10^{10} \text{ cm}^{-2}$) и возможность поляризации частиц V₂O₅, которые являются кристаллогидратами и содержат 2–3 молекулы воды [17]. Остаточное золото, скорее всего, создает электрически активные центры на поверхности подложки, с которым может взаимодействовать поляризованная частица FG:V₂O₅. На рис. 12 представлено условное изображение активированной поверхности полимера и стадии формирования цепочек из наночастиц. Распределение электрически активных центров по поверхности хаотично, что следует из рис. 5, где размещение наночастиц FG:V₂O₅, в случае их низкой концентрации, демонстрирует расположение этих центров. Нужно отдельно отметить, что толщина частиц FG, а соответственно, и толщина потенциального барьера составляет $\sim 2 \text{ nm}$. Закрепившиеся частицы поляризованы и, скорее всего, являются центрами формирования цепочек путем присоединения к ним других наночастиц.

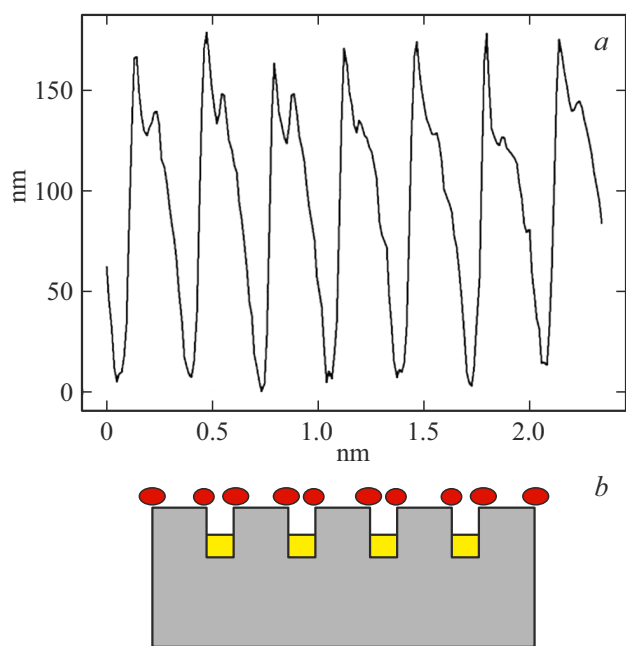


Рис. 9. *a* — профиль поперечного сечения наноструктурированной подложки, со слоем наночастиц G:h-BN, соответствующим трем проходам печати. *b* — соответствующее рисунку *a* схематичное изображение распределения наночастиц G:h-BN по поверхности активированной решетки.

Что касается второго типа частиц G:h-BN, мы также имеем мультибарьерную систему, в данном случае потенциальные барьеры связаны с h-BN и имеют примерно ту же толщину ~ 2 nm [16]. В данной системе нет накопления заряда, графен обеспечивает его уход, несмотря на присутствие барьеров. В такой ситуации при взаимодействии с подложкой на первое место выходит уменьшение

энергии адсорбции частиц на ребрах подложки благодаря локальным деформациям [18]. Другими словами, в деформированных местах имеет место более высокая реакционная способность атомов полимера. Такие изменения могли также быть связаны с локальными деформациями, возникающими в наночастице исходя из ее конкретной морфологии [19–21]. Композитные частицы G:h-BN формируются уже в суспензии и имеют определенную структуру [16]. Деформации на атомном уровне являются мощным инструментом для контроля и манипулирования структурными и функциональными свойствами наноматериалов, в целом, и энергией адсорбции и реакцией с поверхностью для наночастиц, в частности. В результате чего и формируется две цепочки наночастиц (см. рис. 8 и 9) на локально деформированных ребрах полосок.

5. Заключение

Исследованы структуры, сформированные при нанесении двух типов функциональных композитных наночастиц на решетку из промежуточного полимерного штампа (IPS), полученную с помощью импринт-литографии. С помощью 2D-печати на такие подложки были нанесены частицы V₂O₅, покрытые фторированным графеном, или композитные наночастицы G:h-BN. Без активации поверхности полимерной решетки наночастицы или скапливаются в канавки, или просто не взаимодействуют с решеткой, формируя свои кластеры. При активации решетки с помощью кислородной плазмы происходило формирование сплошного покрытия из наночастиц с заполнением канавок решетки и точечного слипания полос решетки. Для долговременной активации поверхности полимерной решетки на основе поликарбоната было использовано напыление золота с последующим

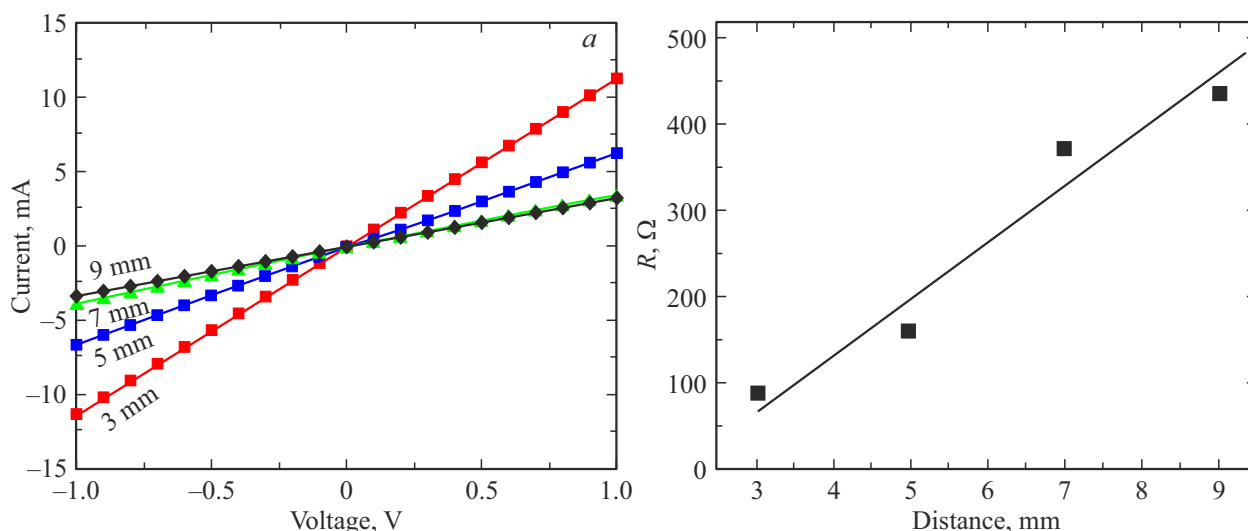


Рис. 10. *a* — вольт-амперные характеристики, измеренные между серебряными контактами на поверхности решетки с нанесенными наночастицами G:h-BN (3 печатных слоя) в зависимости от расстояния. Площадь контактов составляла 0.09 mm². *b* — зависимость сопротивления R от расстояния между контактами.

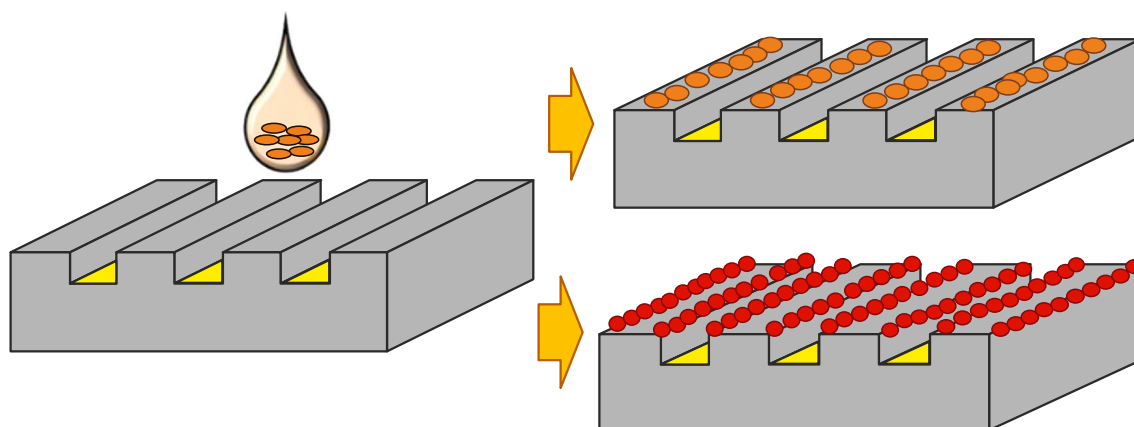


Рис. 11. Схематичное изображение распределения наночастиц наночастиц $FG:V_2O_5$ (верхнее изображение) $G:h-BN$ (нижнее изображение) по поверхности активированной решетки.

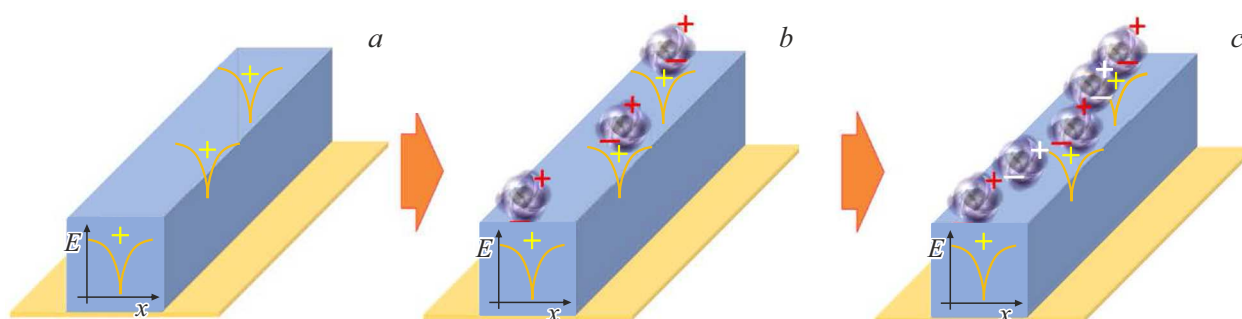


Рис. 12. *a* — схематичное изображение активированной поверхности полимера с электрически активными центрами и *b, c* — стадии формирования цепочек из наночастиц $FG:V_2O_5$.

его механическим удалением с использованием штампа импринт-литографии. В случае долговременной активации поверхности наночастицы располагаются исключительно на верхней части полимерных полос (наногребнях), не уменьшая глубину рельефа решетки. Частицы $FG:V_2O_5$ располагаются в середине полимерной полосы, тогда как $G:h-BN$ формировали две цепочки наночастиц вдоль ребер наногребней. Различие связано с разными свойствами наночастиц и, соответственно, разным взаимодействием наночастиц с полимерной подложкой.

Благодарности

Авторы благодарны М.Б. Шавелкиной из Объединенного института высоких температур РАН (Москва) за предоставления частиц графена и нитрида бора для изготовления одного из типов наночастиц.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 22-19-00191.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Wang, Y. Mei, G. Huang. *J Semicond.* **39**, 011002 (2018).
- [2] P. Cai, B. Hu, W.R. Leow, X. Wang, X.J. Loh, Y.-L. Wu, X. Chen. *Adv. Mater.* **30**, 1800572 (2018).
- [3] H. Heidari, N. Wacker, R. Dahiya. *Appl. Phys. Rev.* **4**, 031101 (2017).
- [4] T. Carey, S. Cacovich, G. Divitini, J. Ren, A. Mansouri, J.M. Kim, C. Wang, C. Ducati, R. Sordan, F. Torrisi. *Nature Commun.* **8**, 1202 (2017).
- [5] А.А. Бухарасв, А.К. Звездин, А.П. Пятаков, Ю.К. Фетисов. *УФН* **188**, 1288 (2018).
- [6] И.В. Антонова. *УФН* **192**, 609 (2022).
- [7] S. Zhou, J. Li, J. Lu, H. Liu, J.-Y. Kim, A. Kim, L. Yao, C. Liu, C. Qian, Z.D. Hood, X. Lin, W. Chen, T.E. Gage, I. Arslan, A. Travesset, K. Sun, N.A. Kotov, Q. Chen. *Nature C* **612**, 259 (2022).
- [8] O.F. Silvestre, A. Rao, L.M. Liz-Marzán. *Eur. J. Mater.* **3**, 2202676 (2023).
- [9] J. Dong, J.-F. Chen, M. Smalley, M. Zhao, Z. Ke, Y. Zhu, H.R. Tseng. *Adv. Mater.* **32**, 1903663 (2020).

- [10] M. Hildebrand, F. Abualnaja, Z. Makwana, N. M. Harrison. *J. Phys. Chem. C* **123**, 4475 (2019).
- [11] F. Yang, J. Feng, J. Chen, Z. Ye, J. Chen, D. K. Hensley, Y. Yin. *Nano Research* **16**, 5873 (2023).
- [12] S. Jambhulkar, W. Xu, D. Ravichandran, J. Prakash, A.N.M. Kannan, K. Song. *Nano Lett.* **20**, 3199 (2020).
- [13] V.A. Seleznev, V.S. Tumashev, H. Yamaguchi, V.Ya. Prinz. *Prec. Eng.* **82**, 316 (2023).
- [14] O. Berezina, D. Kirienko, A. Pergament, G. Stefanovich, A. Velichko, V. Zlomanov. *Thin Solid Films* **574**, 15 (2015).
- [15] N.A. Nebogatikova, I.V. Antonova, V.A. Volodin, V.Ya. Prinz. *Physica E* **52**, 106 (2013).
- [16] I.V. Antonova, M.B. Shavelkina, D.A. Poteryaev, N.A. Nebogatikova, A.I. Ivanov, R.A. Soots, A.K. Gutakovskii, I.I. Kurkina, V.A. Volodin, V.A. Katarzhis, P.P. Ivanov, A.N. Bocharov. *Adv. Eng. Mater.* **24**, 2100917 (2022).
- [17] A.I. Ivanov, V.Ya. Prinz, I.V. Antonova, A.K. Gutakovskii. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **23**, 20434 (2021).
- [18] Z. Wang, Y. Zhang, F. Liu. *Phys. Rev. B* **83**, 041403 (2011).
- [19] D. Nelli, C. Roncaglia, C. Minnai. *Adv. Phys. X*, **8**, 2127330 (2023).
- [20] M. Jørgensen, H. Grönbeck. *Top. Catal.* **62**, 660 (2019).
- [21] M. Dupraz, N. Li, J. Carnis, L. Wu, S. Labat, C. Chatelier, Rim van de Poll, Jan P. Hofmann, Ehud Almog⁶, Steven J. Leake, Yves Watier, Sergey Lazarev, Fabian Westemeier, Michael Sprung, Emiel J.M. Hensen, Olivier Thomas, Eugen Rabkin, Marie-Ingrid Richard. *Nature Commun.* **13**, 3003 (2022)

Редактор Т.Н. Василевская