

УДК 538.975

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ВЕРТИКАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК, ВЫРАЩЕННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ ОКСИДА ГАФНИЯ

© Д. В. Щеглов, С. В. Родякин, Д. А. Насимов, Н. Н. Курусь,
А. С. Боровик, В. А. Селезнев, Л. И. Федина, Д. И. Рогило,
О. И. Семенова, А. В. Латышев

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: sheglov@isp.nsc.ru*

Методом каталитического химического осаждения из газовой фазы впервые выращены массивы вертикально ориентированных углеродных нанотрубок (ВОУНТ) на поверхности Si/HfO₂/Fe высотой от 25 до 100 мкм и удельным сопротивлением от 1,5 до 4 Ом·см. Рост ВОУНТ на оксиде гафния наблюдается в интервале температур 625–725 °С, а при $T \geq 750$ °С не реализуется. При этом температурная зависимость скорости роста ВОУНТ характеризуется величиной ~1,5 эВ. С использованием высокоразрешающей сканирующей электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света показано доминирующее присутствие в массиве нанотрубок с диаметрами от 1 до 10 нм. Обнаружено, что нанокристаллизация HfO₂ при отжиге подложек затрудняет СЭМ-анализ каталитических частиц Fe, размер которых на поверхности исходного аморфного HfO₂ составляет 2–5 нм.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, рост, оксид гафния.

DOI: 10.15372/AUT20240405

EDN: LK0SEW

Введение. В последние годы направление исследований углеродных нанотрубок (УНТ) сместилось в сторону синтеза и применения вертикально ориентированных углеродных нанотрубок (ВОУНТ) [1–3]. В отличие от случайно ориентированных углеродных нанотрубок массивы ВОУНТ демонстрируют множество преимуществ, что делает их чрезвычайно востребованным наноматериалом для многих применений, таких как автоэмиссионные дисплеи [4, 5], электроды суперконденсаторов [6, 7], электрические межсоединения для вертикальных интегральных схем [8, 9], химические и биологические датчики [10, 11] и широкополосные оптические поглотители [12–15]. Данные преимущества связаны в первую очередь с чистыми ВОУНТ, не требующими дополнительной очистки после выращивания, по сравнению со случайно ориентированными трубками, выращенными промышленными методами. Другим важнейшим преимуществом массива ВОУНТ является его пластичность, возникающая благодаря многочисленным боковым взаимодействиям трубок при их самосогласованном вертикальном росте. Это обеспечивает возможность переноса массива ВОУНТ на соответствующие платформы и создания гибких покрытий. Однако перенос ВОУНТ сопряжён с определёнными трудностями, связанными в том числе с хорошей адгезией каталитических частиц к буферному слою, например Al₂O₃, который используется для роста высококачественных ВОУНТ [16]. Поэтому представляется интересным поиск других буферных слоёв, обеспечивающих меньшую адгезию каталитических частиц при сохранении качества трубок.

Наиболее распространённым методом синтеза ВОУНТ, как известно, является каталитическое химическое осаждение из газовой фазы (catalytic chemical vapor deposition —

CatCVD). Преимуществом этого метода является возможность прецизионного контроля и регулировки параметров реакции, определяющей рост ВОУНТ с заданными свойствами. К настоящему времени процесс CatCVD достаточно подробно исследован для роста ВОУНТ при использовании Al_2O_3 в качестве буферного (изолирующего) слоя. Его важная роль заключается в предотвращении взаимной диффузии железа и кремния и формирования при высоких температурах силицида железа, не способного быть катализатором роста ВОУНТ.

Целью представленной работы стало исследование роста с применением Fe в качестве катализатора и свойств ВОУНТ впервые на буферном слое из HfO_2 , который характеризуется более высокой температурой плавления ($2758\text{ }^\circ\text{C}$) по сравнению с Al_2O_3 ($2072\text{ }^\circ\text{C}$) и, соответственно, улучшенными диффузионно-изолирующими свойствами, как это было ранее показано при разработке изоляционных оболочек для вольфрамовых нитей [17]. Недавно HfO_2 был использован для предотвращения диффузии меди при создании солнечных элементов [18]. Попытка применения HfO_2 для выращивания случайно ориентированных трубок была предпринята ранее в [19], однако для их роста потребовался катализатор из смеси Fe и Ge.

Экспериментальная часть. Рост массивов ВОУНТ методом CatCVD осуществлялся на установке Advanced Deposition System VM Pro 6 inch (Германия). В качестве подложек использовались пластины кремния Si(100) после стандартной химической обработки, на которые при температуре $200\text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 30 Па был нанесён слой HfO_2 толщиной 10 нм. Для нанесения HfO_2 применялся реактор SI ALD LL (SENTECH, Германия), обеспечивающий плазменно-стимулированное атомно-слоевое осаждение с чередующимися импульсами тетраакис(диметиламино)гафния $\text{Hf}[\text{N}(\text{CH}_3)_2]_4$ (TDMAH) в качестве прекурсора гафния и плазмы кислорода в качестве окислителя. Далее с помощью термического напыления из высокочистой мишени в вакууме на поверхность HfO_2 наносили слой Fe толщиной 1–2 нм. В качестве реакционных газов для синтеза ВОУНТ использовался ацетилен C_2H_2 , водород H_2 и азот N_2 . Отжиг подложек Si/ HfO_2 /Fe в потоке смеси H_2 $700\text{ см}^3/\text{мин}$ и N_2 $200\text{ см}^3/\text{мин}$ и давлении в камере 12,5 мбар в течение 5 мин проводили при температурах $625\text{--}725\text{ }^\circ\text{C}$, соответствующих температуре выращивания трубок. Далее добавлялся поток C_2H_2 $7\text{ см}^3/\text{мин}$ и осуществлялся синтез ВОУНТ в течение 10 мин. На заключительной стадии с целью удаления с поверхности трубок аморфного углерода проводился отжиг в потоке H_2 $700\text{ см}^3/\text{мин}$ в течение 1 мин. Используемое время синтеза позволяло получать массивы ВОУНТ высотой от 25 до 100 мкм в зависимости от температуры роста. Их высота оценивалась на оптическом микроскопе OLYMPUS BX 53M и затем корректировалась при измерении на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ). Для оценки средней скорости роста массива его высота усреднялась по десяти измерениям на пластине. Разброс значений не превышал 10 %. Структурно-морфологический анализ подложек Si/ HfO_2 /Fe и выращенных на них массивов ВОУНТ выполнен с помощью высокоразрешающего сканирующего электронного микроскопа Hitachi SU8220 (Япония) с разрешением по точкам 0,8 нм.

Оптические параметры исходных плёнок HfO_2 и Fe определялись на спектральном эллипсометре в диапазоне длин волн 300–850 нм. Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) от поверхности массивов ВОУНТ измерялись спектрометром Horiba XploRA Plus (Япония) в конфигурации обратного рассеяния. Использовалось возбуждающее излучение твердотельных лазеров с длинами волн 532 и 785 нм и мощностями 1,18 и 0,46 мВт соответственно.

Электрофизические измерения слоевого сопротивления массива ВОУНТ методом ван дер Пау проводили на зондовой станции Agilent B 1500A, оборудованной подвижным столиком для образца, четырьмя зондами и микроскопом, что необходимо для точного расположения зондов на образце.

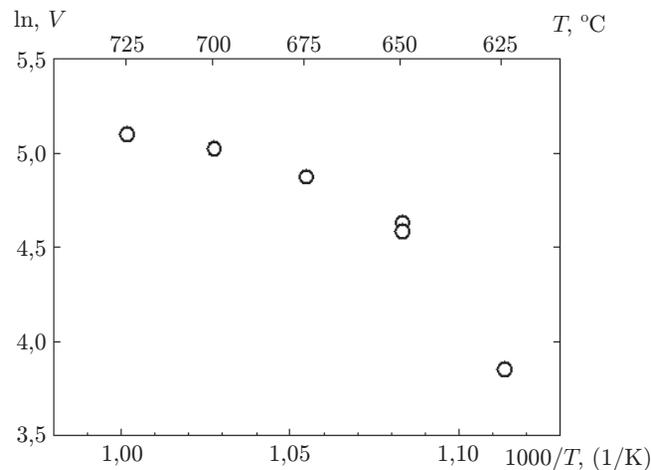


Рис. 1. Зависимость логарифма скорости роста массива ВОУНТ V (нм/с) от обратной температуры $1000/T$

Результаты и обсуждение. Синтез ВОУНТ на оксиде гафния в течение 10 мин с ростом температуры подложки от 625 до 725 °C приводил к формированию массивов высотой от 25 до 100 мкм соответственно. При дальнейшем повышении температуры до 750 °C рост ВОУНТ прекращался. На рис. 1 представлена зависимость скорости роста массива от температуры в координатах Аррениуса (V — скорость роста ВОУНТ в нм/с). Анализ наклона зависимости в низкотемпературной области позволил оценить энергию активации процесса, равную 145 кДж/моль ($\sim 1,5$ эВ). Такое низкое значение энергии активации роста нанотрубок, как было подробно рассмотрено в [20, 21], может быть связано со вкладом нескольких процессов: 1) растворения С в каталитической частице Fe, 2) обратного выхода С на поверхность для роста трубки, 3) частичной деактивации катализатора за счёт образования углеродистой плёнки, зависящей от потока углеродсодержащего газа на поверхность катализатора. Эти три основных процесса определяют рост трубок и торможение/прекращение их роста, в результате чего суммарное значение эффективной энергии активации может варьироваться в интервале 1,2–3,4 эВ. Более того, её значение может стать отрицательным, что, предположительно, является результатом смены газоносителя углерода ацетиленом на этилен [21]. В нашем случае оба факта — малая энергия активации роста в интервале 625–725 °C и его отсутствие при $T \geq 750$ °C — в отличие от непрекращающегося роста на Al_2O_3/Fe при 800 °C [22] указывают на нарушение транспорта углерода и ускорение процесса деактивации катализатора на поверхности HfO_2 с повышением температуры. Как показано с помощью *in situ* исследований процесса роста углеродных нанотрубок в просвечивающем электронном микроскопе [23], нарушение транспорта углерода в каталитической частице Fe ослабляет прочность сцепления с трубкой и приводит к её отслоению, делая невозможным рост трубки. Нельзя также исключить деактивацию частиц Fe за счёт увеличения скорости диффузии железа в HfO_2 при повышении температуры. Этот вопрос требует специального изучения.

Для исследования структурных особенностей углеродных нанотрубок в массивах ВОУНТ использовался метод КРС, который позволяет оценить качество, диаметр трубок и тип проводимости [24]. Поскольку углеродные трубки являются свёрнутыми в цилиндры слоями графена (одного или их множества), то спектры КРС трубок в области высоких частот близки к спектрам графита и содержат две характерные полосы, обозначаемые G-модой, связанной с колебаниями sp^2 -гибридизированных связей C-C в графеновом слое, и D-полосой, относящейся к структурным дефектам трубок. Однако в отличие от гра-

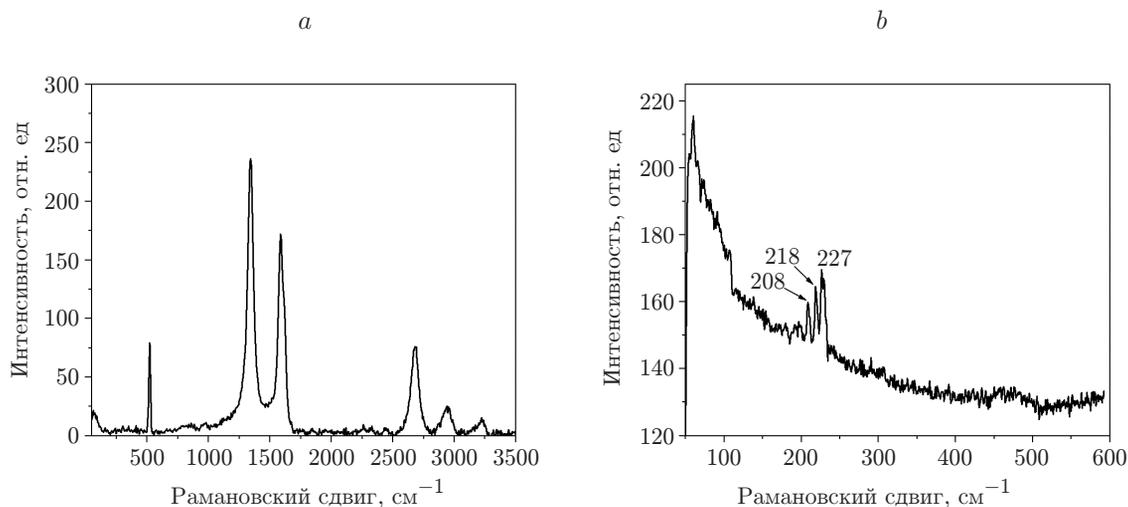


Рис. 2. Спектр КРС массива ВОУНТ, выращенного при 650 °С: высокочастотная область при возбуждении лазером с $\lambda = 532$ нм (а), низкочастотная область при возбуждении лазером с $\lambda = 785$ нм (б)

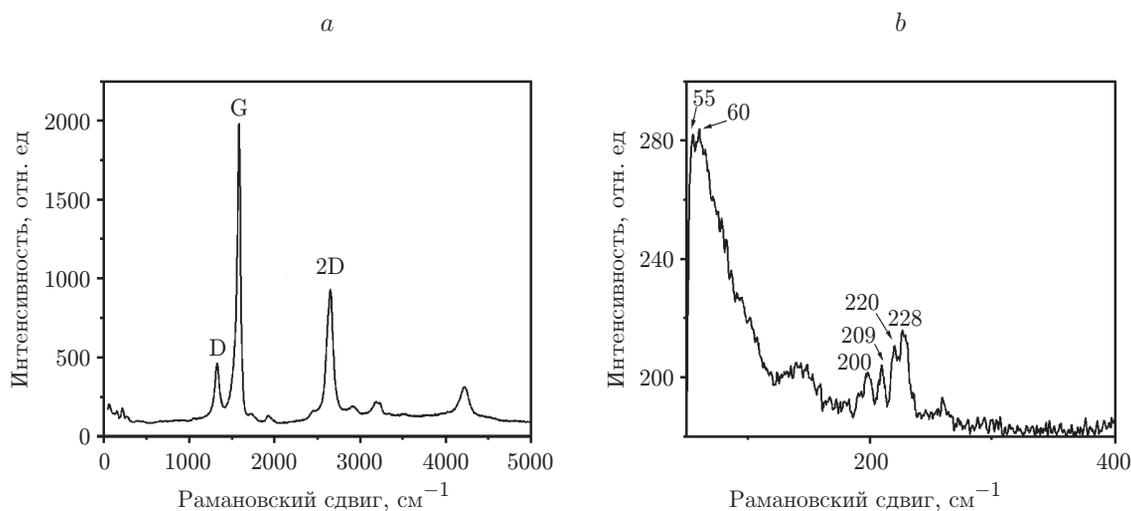


Рис. 3. Спектр КРС массива ВОУНТ, выращенного при 700 °С: высокочастотная область при возбуждении лазером с $\lambda = 532$ нм (а), низкочастотная область при возбуждении лазером с $\lambda = 785$ нм (б)

фита в спектрах КРС одно- и двустенных трубок в области низких частот появляются так называемые радиальные дышащие моды (radial breathing modes — RBM) с частотой $\omega_{\text{RBM}} < 250$ см⁻¹ для одностенных трубок и $\omega_{\text{RBM}} > 250$ см⁻¹ — для двустенных [25], соответствующей синхронным радиальным колебаниям атомов углерода.

На рис. 2, 3 представлены спектры КРС для массивов ВОУНТ, выращенных при 650 (высота массива 40 мкм) и 700 °С (высота массива 100 мкм) соответственно. Можно видеть, что в обоих спектрах в высокочастотной области (рис. 2, а и 3, а) появляются характерные D- и G-моды при 1350 и 1550 см⁻¹, а в низкочастотной области в диапазоне 200–228 см⁻¹ наблюдаются RBM-пики, соответствующие одностенным нанотрубкам (рис. 2, б и 3, б). Общепринятой является оценка диаметров нанотрубок по формуле $d = 227/\omega_{\text{RBM}}$, где d — диаметр УНТ в нанометрах, ω_{RBM} — частота RBM-моды [26].

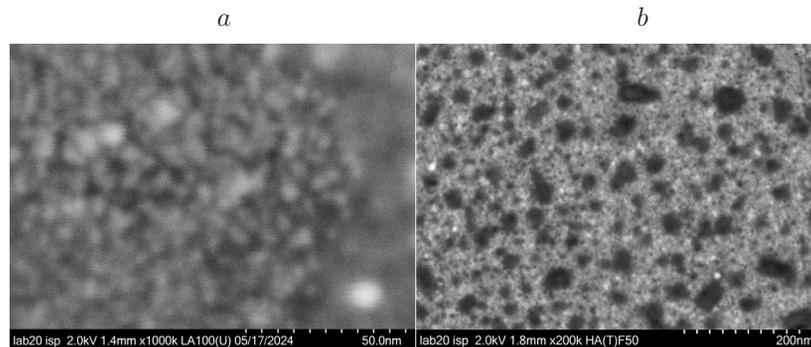


Рис. 4. Высокорастворяющие СЭМ-изображения поверхности структуры Si/HfO₂/Fe до (a) и после (b) отжига в H₂ при 700 °С, полученные с использованием обратно рассеянных электронов под малым (a) и большим (b) углом. Тёмные области соответствуют нанокристаллам HfO₂ (b)

Согласно этой модели, наблюдаемые при 650 °С пики RBM при 208, 218 и 227 см⁻¹ (см. рис. 2, b) принадлежат одностенным трубкам с диаметром ~1,09, 1,04, и 1,0 нм соответственно, тогда как на измерениях для трубок, выращенных при 700 °С, появляется дополнительный широкий пик RBM с $\omega_{\text{RBM}} \sim 148 \text{ см}^{-1}$ (см. рис. 3, b), соответствующий одностенным трубкам с диаметром 1,5 нм. Кроме того, важно заметить, что при 700 °С в длинноволновой части спектра КРС (см. рис. 3, a) изменяется соотношение D- и G-мод, что свидетельствует о значительном уменьшении дефектности нанотрубок, по сравнению с их ростом при 650 °С. В целом это отвечает общеизвестным представлениям об увеличении дефектности ВОУНТ с уменьшением температуры их выращивания, однако совершенство кристалличности нанотрубок имеет более сложную зависимость от температуры и потока ацетилена [27]. Отметим также, что узкая и симметричная форма G-полос в спектрах на рис. 2, a и 3, a свидетельствует о преимущественно полупроводниковом типе проводимости трубок в массиве, поскольку для металлических трубок характерно уширение пика и отсутствие симметрии G-моды за счёт электрон-фононного взаимодействия и наличия свободных электронов [28].

Критичным для синтеза массива с малым диаметром углеродных нанотрубок, как известно, является размер и плотность частиц металлического катализатора, сформированных при отжиге на поверхности буферного слоя перед его выращиванием [16]. При использовании аморфного HfO₂, который кристаллизуется при температуре 590 °С, необходимо исследовать морфологию поверхности Si/HfO₂/Fe как до, так и после отжига, чтобы учесть влияние кристаллизации HfO₂ на размер каталитических частиц Fe. На рис. 4 представлены высокоразрешающие СЭМ-изображения поверхности Si/HfO₂ с частицами Fe до и после отжига при 700 °С. Визуализация частиц Fe на аморфном HfO₂ при максимально возможном увеличении показала, что их распределение по поверхности однородно и размер варьируется в интервале 2–5 нм (рис. 4, a). Отжиг Si/HfO₂/Fe системы при 700 °С сопровождается формированием кристаллитов HfO₂ с размерами, достигающими 40 нм. При этом вокруг таких кристаллитов HfO₂ локализуются не превышающие 10 нм в размере нанокластеры Fe (более точно их размер оценить трудно из-за близкого примыкания друг к другу). Чем обусловлена такая неоднородность распределения частиц Fe по поверхности нанокристаллического HfO₂ — не ясно, для этого потребуются дополнительные исследования с привлечением просвечивающей электронной микроскопии.

На рис. 5, a представлено СЭМ-изображение поперечного сечения массива ВОУНТ высотой около 100 мкм, из которого следует, что частицы катализатора (вставка на рис. 5, a) при росте ВОУНТ переносятся на поверхность массива. Это отражает механизм роста

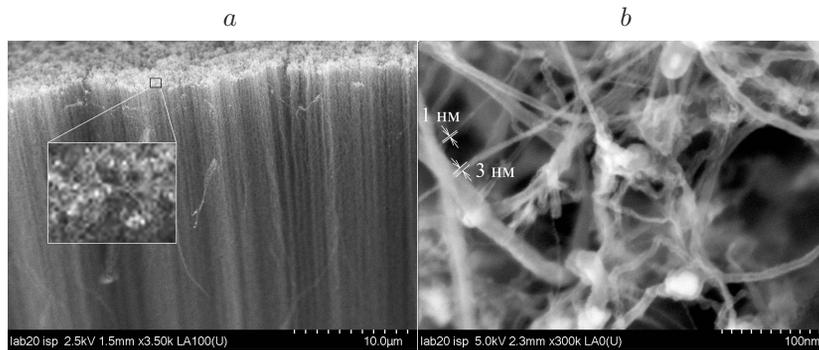


Рис. 5. СЭМ-изображения массива ВОУНТ: *a* — общий вид поперечного сечения, где на вставке дано увеличенное изображение частиц Fe на поверхности массива; *b* — высокоразрешающее изображение нанотрубок на поверхности массива ВОУНТ, демонстрирующее присутствие трубок диаметром 1 и 3 нм

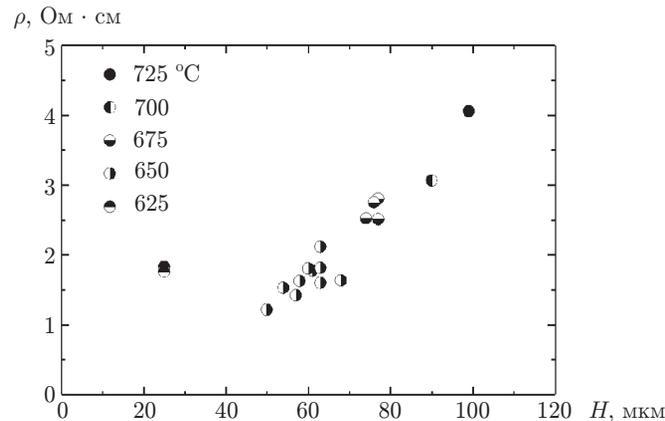


Рис. 6. Значения удельной электропроводности ρ и высоты H массивов ВОУНТ, синтезированных при температурах 625–725 °C

трубок «снизу-вверх» (пар — жидкость — твёрдое тело), ранее предложенный для роста нитевидных кристаллов [29] и в настоящее время используемый для объяснения роста ВОУНТ [20]. Более низкое значение поверхностной энергии HfO_2 (~ 25 мДж/м² [30]) по сравнению с Al_2O_3 (~ 640 мДж/м² [31]) ослабляет адгезию частиц Fe с этой поверхностью и способствует их переносу трубками наверх, что также увеличивает их доступность для газа-носителя углерода, обеспечивающего непрерывный рост ВОУНТ [32, 33].

На рис. 6 представлена карта электрофизических свойств выращенных массивов ВОУНТ в зависимости от температуры роста при фиксированном времени синтеза. Можно видеть, что при уменьшении температуры от 725 до 625 °C высота массивов H уменьшается от 100 до 25 мкм. При этом удельное сопротивление массива $\rho = R_s \cdot H$, измеренное перпендикулярно направлению оси роста ВОУНТ, уменьшается с 4 до 1,5 Ом · см, где R_s — слоиное сопротивление массива, измеренное методом ван дер Пау.

Заметим, что удельное сопротивление массивов, синтезированных при 625–650 °C, имеет близкие значения несмотря на то, что высота массивов в этом интервале температур отличается в 2–3 раза. Поскольку ранее было показано, что массивы ВОУНТ с удельным сопротивлением в диапазоне 0,02–4 Ом · см и высотой около 50 мкм обладают высоким коэффициентом поглощения терагерцевого излучения [34, 35], синтезированные массивы ВОУНТ могут использоваться в качестве эффективного слоя-поглопителя в микроболо-

метрических фотоприёмниках электромагнитного излучения с длиной волны вплоть до 1 мм.

Заключение. В рамках данной работы методом химического осаждения из газовой фазы с применением барьерного диэлектрика HfO_2 и Fe в качестве катализатора впервые синтезированы массивы ВОУНТ. Их рост в интервале температур 625–700 °С реализуется по механизму «снизу-вверх», при котором частицы Fe переносятся трубками на поверхность массива. Отсутствие роста трубок при $T \geq 750$ °С и низкая величина эффективной энергии активации роста $\sim 1,5$ эВ при меньших температурах указывают на деактивацию катализатора в системе $\text{Si}/\text{HfO}_2/\text{Fe}$ с ростом температуры. Результаты СЭМ- и КРС-диагностик демонстрируют наличие в массиве одностенных углеродных нанотрубок, минимальный диаметр которых достигает 1 нм. Показано, что удельное сопротивление ВОУНТ, измеренное перпендикулярно направлению роста, уменьшается от 4 до 1,5 Ом·см при понижении температуры роста от 725 до 625 °С, что позволяет использовать их в качестве эффективного слоя-поглотителя терагерцевого излучения.

Благодарности. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Наноструктуры» в Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН.

Финансирование. Разработка технологии выращивания массивов ВОУНТ на поверхности HfO_2 проведена в рамках государственного контракта № 20411.1950192501.11.003 от 29.12.2020 г. (идентификатор № 17705596339200009540). Разработка поверхностно-чувствительных методов высокоразрешающей сканирующей электронной микроскопии и их использование для диагностики массивов ВОУНТ выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-72-30023). Диагностика электрических свойств массивов ВОУНТ и диагностика методом КРС выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-72-30003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Huang S., Du X., Ma M., Xiong L.** Recent progress in the synthesis and applications of vertically aligned carbon nanotube materials // *Nanotechnol. Rev.* 2021. **10**, Iss. 1. P. 1592–1623.
2. **Rao R., Pint C. L., Islam A. E. et al.** Carbon nanotubes and related nanomaterials: Critical advances and challenges for synthesis toward mainstream commercial applications // *ACS Nano.* 2018. **12**, Iss. 12. P. 11756–11784.
3. **Sharma P., Pavelyev V., Kumar S.** Analysis on the synthesis of vertically aligned carbon nanotubes: Growth mechanism and techniques // *Journ. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2020. **31**. P. 4399–4443. DOI: 10.1007/s10854-020-03021-6.
4. **Xavier S., Mátéfi-Tempfli S., Ferain E. et al.** Stable field emission from arrays of vertically aligned free-standing metallic nanowires // *Nanotechnology.* 2008. **19**, N 21. 215601. DOI: 10.1088/0957-4484/19/21/215601.
5. **Perea-López N., Rebollo-Plata B., Briones-León J. A. et al.** Millimeter-long carbon nanotubes: Outstanding electron-emitting sources // *ACS Nano.* 2011. **5**, Iss. 6. P. 5072–5077.
6. **Zhou Y., Ghaffari M., Lin M. et al.** High volumetric electrochemical performance of ultra-high density aligned carbon nanotube supercapacitors with controlled nanomorphology // *Electrochimica Acta.* 2013. **111**. P. 608–613. DOI: 10.1016/j.electacta.2013.08.032.
7. **Kim B., Chung H., Kim W.** High-performance supercapacitors based on vertically aligned carbon nanotubes and nonaqueous electrolytes // *Nanotechnology.* 2012. **23**, N 15. 155401. DOI: 10.1088/0957-4484/23/15/155401.
8. **Awano Y., Sato S., Nihei M. et al.** Carbon nanotubes for VLSI: Interconnect and transistor applications // *Proceedings of the IEEE.* 2010. **98**, Iss. 12. P. 2015–2031.

9. **Chiodarelli N., Li Y., Cott D. J. et al.** Integration and electrical characterization of carbon nanotube via interconnects // *Microelectron. Eng.* 2011. **88**, Iss. 5. P. 837–843.
10. **Norizan M. N., Moklis M. H., Ngah Demon S. Z. et al.** Carbon nanotubes: Functionalisation and their application in chemical sensors // *RSC Adv.* 2020. **10**, Iss. 71. P. 43704–43732.
11. **Kohls A., Maurer Ditty M., Dehghandehnavi F., Zheng S.-Y.** Vertically aligned carbon nanotubes as a unique material for biomedical applications // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2022. **9**, Iss. 14. P. 6287–6306.
12. **Mizuno K., Ishii J., Kishida H. et al.** A black body absorber from vertically aligned single-walled carbon nanotubes // *Proc. Nat. Acad. Sci. (PNAS).* 2009. **106**, N 15. P. 6044–6047.
13. **Wood B. D., Dyer J. S., Thurgood V. A. et al.** Optical reflection and absorption of carbon nanotube forest films on substrates // *Journ. Appl. Phys.* 2015. **118**, Iss. 1. 013106. DOI: 10.1063/1.4923390.
14. **Lehman J., Yung C., Tomlin N. et al.** Carbon nanotube-based black coatings // *Appl. Phys. Rev.* 2018. **5**, Iss. 1. 011103. DOI: 10.1063/1.5009190.
15. **Sun L., Zhu M., Zhao C. et al.** Wafer-scale vertically aligned carbon nanotubes for broadband terahertz wave absorption // *Carbon.* 2019. **154**. P. 503–509. DOI: 10.1016/j.carbon.2019.08.001.
16. **Chen G., Futaba D. N., Hata K.** Catalysts for the growth of carbon nanotube “forests” and superaligned arrays // *MRS Bull.* 2017. **42**, Iss. 11. P. 802–808.
17. **Veltri R. D., Paradis E. L., Douglas F. C.** Investigation to Develop a Method to Apply Diffusion Barriers to High Strength Fibers. East Hartford: NASA-Lewis Research Center, 1974. 84 p.
18. **Kotilainen M., Krumpolec R., Franta D. et al.** Hafnium oxide thin films as a barrier against copper diffusion in solar absorbers // *Solar Energy Mater. and Solar Cells.* 2017. **166**. P. 140–146.
19. **Uchino T., Ayre G. N., Smith D. C. et al.** Growth of Carbon Nanotubes on HfO₂ towards Highly Sensitive Nano-Sensors // *Jap. Journ. Appl. Phys.* 2010. **49**, N 4S. 04DN11. DOI: 10.1143/JJAP.49.04DN11.
20. **Puretzky A. A., Geohegan D. B., Jesse S. et al.** In situ measurements and modeling of carbon nanotube array growth kinetics during chemical vapor deposition // *Appl. Phys. A.* 2005. **81**. P. 223–240.
21. **Bronikowski M. J.** Longer nanotubes at lower temperatures: The influence of effective activation energies on carbon nanotube growth by thermal chemical vapor deposition // *Journ. Phys. Chem. C.* 2007. **111**, Iss. 48. P. 17705–17712.
22. **Semenova O. I., Fedina L. I., Gutakovskii A. K. et al.** CVD synthesis and the structure of vertically aligned cnt arrays // *Journ. Structural Chem.* 2022. **63**, Iss. 7. P. 1145–1152.
23. **Huang X., Farra R., Schlögl R. et al.** Growth and termination dynamics of multiwalled carbon nanotubes at near ambient pressure: An in situ transmission electron microscopy study // *Nano Lett.* 2019. **19**, Iss. 8. P. 5380–5387.
24. **Jorio A., Saito R.** Raman spectroscopy for carbon nanotube applications // *Journ. Appl. Phys.* 2021. **129**, Iss. 2. 021102. DOI: 10.1063/5.0030809.
25. **Shi L., Wei J., Yanagi K. et al.** Templated direct growth of ultra-thin double-walled carbon nanotubes // *Nanoscale.* 2018. **10**, Iss. 45. P. 21254–21261.
26. **Araujo P. T., Maciel I. O., Pesce P. B. C. et al.** Nature of the constant factor in the relation between radial breathing mode frequency and tube diameter for single-wall carbon nanotubes // *Phys. Rev. B.* 2008. **77**, Iss. 24. 241403(R). DOI: 10.1103/PhysRevB.77.241403.
27. **Kimura H., Futaba D. N., Yumura M., Hata K.** Mutual exclusivity in the synthesis of high crystallinity and high yield single-walled carbon nanotubes // *Journ. Amer. Chem. Soc.* 2012. **134**, Iss. 22. P. 9219–9224.

28. **Fouquet M., Telg H., Maultzsch J. et al.** Longitudinal optical phonons in metallic and semiconducting carbon nanotubes // *Phys. Rev. Lett.* 2009. **102**, Iss. 7. 075501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.075501.
29. **Гиваргизов Е. И.** Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара. М.: Наука, 1977. 304 с.
30. **Zenkin S., Belosludtsev A., Kos Š. et al.** Thickness dependent wetting properties and surface free energy of HfO₂ thin films // *Appl. Phys. Lett.* 2016. **108**, Iss. 23. 231602. DOI: 10.1063/1.4953262.
31. **Xiao Y., Ahmed Z., Ma Z. et al.** Low temperature synthesis of high-density carbon nanotubes on insulating substrate // *Nanomaterials.* 2019. **9**, Iss. 3. 473. DOI: 10.3390/nano9030473.
32. **Einarsson E., Murakami Y., Kadowaki M., Maruyama S.** Growth dynamics of vertically aligned single-walled carbon nanotubes from *in situ* measurements // *Carbon.* 2008. **46**, Iss. 6. P. 923–930.
33. **Meshot E. R., Hart A. J.** Abrupt self-termination of vertically aligned carbon nanotube growth // *Appl. Phys. Lett.* 2008. **92**, Iss. 11. P. 90–93.
34. **Щеглов Д. В., Демьяненко М. А., Семенова О. И. и др.** Разработка широкополосного поглотителя электромагнитного излучения на основе многостенных углеродных нанотрубок и его применение в болометрических приемниках // *Техника радиосвязи.* 2021. Вып. 4(51). С. 75–88.
35. **Демьяненко М. А., Козлов А. И., Новоселов А. Р., Овсяк В. Н.** О мозаичных неохлаждаемых микроболометрических приёмниках инфракрасного и терагерцового диапазонов // *Автометрия.* 2016. **52**, № 2. С. 115–123. DOI: 10.15372/AUT20160214.

Поступила в редакцию 22.05.2024

После доработки 08.06.2024

Принята к публикации 05.07.2024
