

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЯЕМОЙ ТЕХНОЛОГИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Аннотация. Исследовано влияние различных факторов на рост углеродных нанотрубок (УНТ). Показано, что скорость роста массива на катализаторе FeNiCo20/Al толщиной менее 10 мкм замедляется. Концентрации ферrocена в газовой смеси оказывает существенное влияние на рост УНТ. Снижение концентрации ферrocена увеличивает свободную энергию расплава и приводит к росту нанотрубок меньшего диаметра и меньшее число стенок – 2 или 3. Повышение концентрации ферrocена выше 1 % приводит к снижению качества растущих нанотрубок. Проанализированы технологические возможности формирования отдельно стоящих УНТ.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, термодинамика роста, кластеры, катализатор.

Abstract. The authors investigate the influence of various factors on carbon nanotubes (CNT) growth. The article shows that the rate of array growth on the catalyst FeNiCo20/Al, which is less than 10 microns thick, slows down. Concentration of ferrocene in the gas mixture significantly impacts the growth of CNTs. Reduction of ferrocene concentration increases free melting energy and leads to the growth of nanotubes with smaller diameter and to a fewer amount of walls – 2 or 3. Increasing the ferrocene concentration over 1 % leads to a decrease in the quality of nanotubes growth. The authors analyze the technological possibilities of free-standing nanotubes formation.

Key words: carbon nanotubes, thermodynamics of growth, clusters, catalyst.

Исследования последних лет показали, что рост углеродных нанотрубок (УНТ) можно успешно совмещать с процессами кремниевой планарной технологии [1, 2]. Это открывает перспективы создания многофункциональных наноструктурированных материалов с новыми уникальными свойствами. Для успешной реализации данной задачи необходимо, чтобы рост УНТ был управляемым с предсказуемыми параметрами. Оптимизация технологического процесса осложняется большим количеством факторов, определяющих качественные показатели углеродных нанотрубок. В зависимости от способа роста нанотрубок рост температуры УНТ может изменяться в диапазоне от 400 °С [3, 4] до 3600 °С [5]. Росту многостенных УНТ благоприятствуют, как правило, температуры от 500 до 1000 °С, а рост одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) происходит при более высоких температурах, хотя в последнее время сообщалось о росте ОУНТ при 750 °С [6, 7]. Важную роль при росте УНТ играет катализатор. Применяются различные методы формирования наночастиц катализаторов [8, 9]. Например, используется предварительное испарение металла катализатора в виде тонкой пленки [10, 11]. Применяются жидкие катализаторы [12, 13]. Эти методы различаются с точки зрения источника, целевых приложений, стоимости и окончательных свойств получаемых УНТ. Кристаллическая структура УНТ, спиральность, диаметр, темп роста зависят от типа катализатора [14, 15]. Однако, несмотря на значительное количество публикаций, далеко не всегда удается вырастить нанотрубки нужного качества.

В настоящей работе исследуется влияние толщины подслоя катализатора на скорость роста массива углеродных нанотрубок, влияние концентрации ферроцена и других факторов на получение отдельно стоящих нанотрубок.

1. Влияние подслоя катализатора

Были изготовлены образцы массивов УНТ, топология которых представляла ступенчатую змейку. Шаг ступени варьировался от 25 до 180 мкм, а толщина меандра в змейке – от 1,5 до 30 нм. Основу змейки составляли меандры $\text{FeNiCo}_{20}/\text{Al}$, где толщина Al равна 10 нм для каждого образца, а толщина пленки катализатора FeNiCo_{20} , напыленной на Al, составляла на I образце 1,5 нм, на II образце 2,5 нм и на III образце 3,5 нм.

Синтез УНТ протекал при температуре 700 °С в течение 5 мин, расход Ar составлял 200 см³/мин, а реактива (0,5 % ферроцена в этаноле) – 6 г/ч. На всех образцах были получены растровым электронным микроскопом (РЭМ) изображения, по которым определялась длина нанотрубки в массиве. Экспериментальные данные показывают, что формирование топологического рисунка на поверхности образца приводит к уменьшению скорости роста массивов УНТ, причем с уменьшением толщины каталитической пленки падает и скорость роста УНТ. Эксперименты показывают, что этот эффект усиливается с уменьшением ширины меандра катализатора. На меандрах толщиной 5 мкм уменьшение скорости роста заметнее по сравнению с меандрами толщиной 10 мкм (рис. 1). Полученный результат показывает влияние геометрических размеров топологического рисунка на скорость роста УНТ. На пластину-свидетель рисунок не наносился. Высота массива составила 68 мкм, хотя толщина подслоя катализатора составляла 1,5 нм.

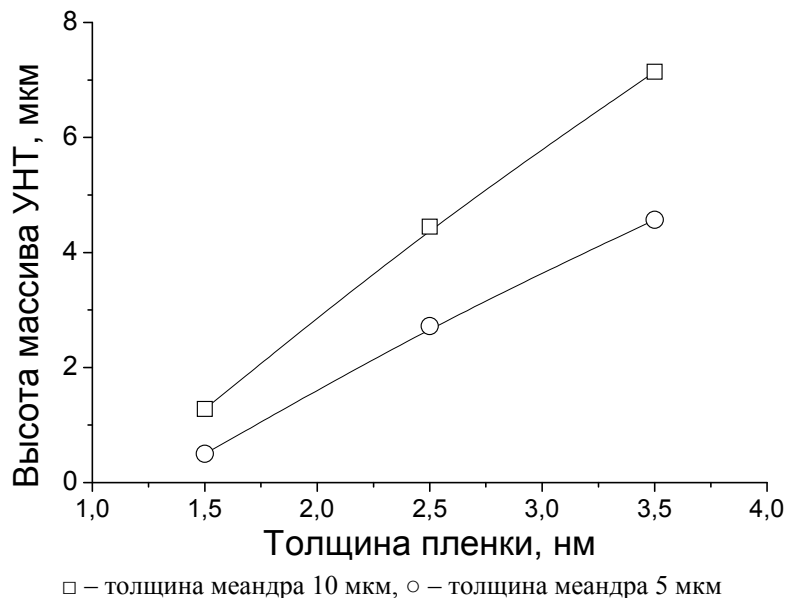


Рис. 1. Зависимость высоты массива от толщины пленки FeNiCo_{20}

Для подтверждения влияния толщины пленки на скорость роста УНТ был проведен эксперимент, в котором толщину пленки уменьшали при помощи ионного пучка, причем на одном ребре меандра были выполнены обра-

ботки с разной длительностью, в результате чего были сформированы разные толщины пленок. РЭМ изображение массива УНТ, сформированного в данной области, представлено на рис. 2. Представленное изображение демонстрирует уменьшение высоты массива УНТ с увеличением времени обработки ионным пучком, что равносильно уменьшению толщины пленки. Поставленный эксперимент наглядно демонстрирует зависимость высоты массива УНТ от толщины пленки катализатора.

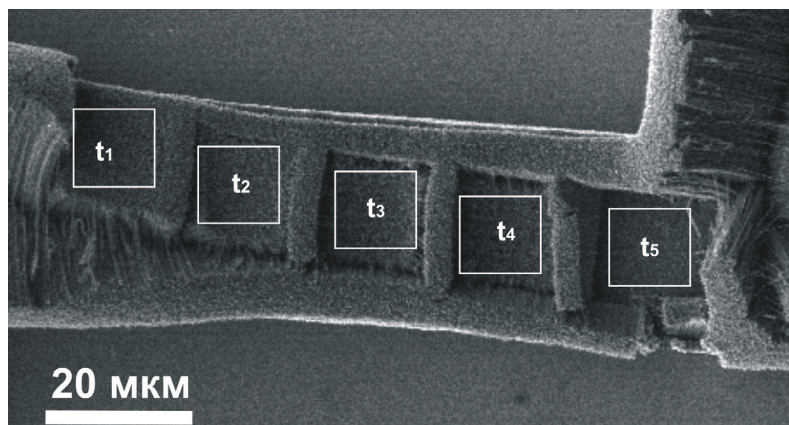


Рис. 2. РЭМ изображение области меандра с массивом УНТ на подложках, у которых подслоя катализатора подвергался травлению ионным пучком с разной длительностью обработки ($t_1 < t_2 < t_3 < t_4 < t_5$)

Важно отметить, что на образцах-свидетелях, без топологического рисунка данный эффект не проявляется, хотя толщина подслоя пленки катализатора была в этом случае самая тонкая. Это позволяет отвергнуть предположение о каком-либо влиянии диффузии алюминия в катализатор. Возможно, что при росте массива углеродные трубки заряжаются, возникает электрическое поле, способствующее их росту. Вероятно, с уменьшением толщины массива и подслоя катализатора это поле уменьшается. Данное предположение является одним из возможных объяснений эффекта и требует дальнейшего исследования. Это предположение подтверждается особенностями роста массива на топологическом рисунке. РЭМ изображения такого массива приведены на рис. 3. Заметно, что по мере удаления от краев высота массива проседает. Этот факт не противоречит приведенному выше предположению.

В заключение отметим, что полученные результаты подтверждают, что на скорость роста УНТ влияют не только толщина каталитической пленки, но и размеры топологического рисунка. Сравнение массивов УНТ выращенных на образцах, подготовленных при помощи фотолитографии и литографии ионным пучком позволяет сделать вывод о влиянии дополнительных технологических операций при фотолитографии на рост УНТ. Поэтому при проведении синтеза отдельных УНТ необходимо учитывать толщину каталитической пленки и корректировать время синтеза УНТ.

2. Влияние концентрации ферроцена в газовой смеси на формирование УНТ

В качестве растворителя ферроцена и источника углерода использовался этанол марки «Экстра». Для проведения синтеза УНТ методом CVD ис-

пользовалась установка УНТ-3, специально разработанная для работы с жидкими углеводородами или растворами металлоорганических соединений, такими как ферроцен.

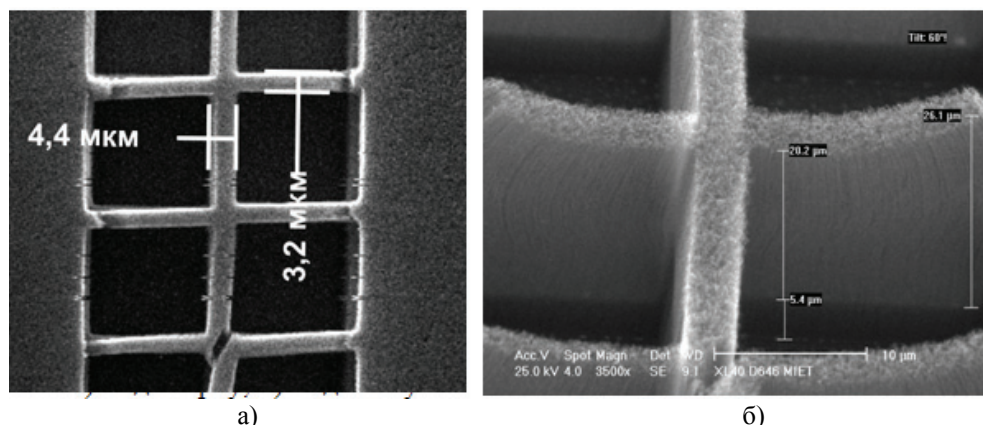


Рис. 3. РЭМ изображения массива УНТ, выращенного на подложке с топологическим рисунком: а – вид сверху; б – вид сбоку

Разработанный метод синтеза УНТ с использованием совмещенного катализатора позволяет проводить синтез наноструктур в диапазоне температур от 600 до 800 °С с возможностью роста массива УНТ в заданной точке подложки, при этом характерный диаметр УНТ в массиве можно варьировать в диапазоне от 4 до 15 нм с регулируемой плотностью УНТ. Высота массива может задаваться от 2 мкм и выше. Концентрация ферроцена в этаноле варьируется от 0,1 до 1 %, что ограничивает внедрение железа в полость и стенки УНТ.

Для синтеза массивов УНТ использовались подложки на основе кремния размерами 6×6 мм² с нанесенными на поверхность пленками Al и FeNiCo₆ толщинами 26 и 1,5 нм, соответственно. Синтез протекал при температуре 700 °С в течение 15 мин. Расход Ag составлял 200 см³/мин, расход раствора ферроцена (концентрация 0,1 и 1 %) в этаноле – 3 г/ч.

Изображения массива УНТ, полученные с помощью ПЭМ, представлены на рис. 4. Визуально заметно, что уменьшение концентрации ферроцена приводит к уменьшению диаметра УНТ. С использованием полученных изображений массивов УНТ были построены диаграммы распределения УНТ по диаметрам для разных концентраций ферроцена (рис. 5). Из представленных диаграмм видно, что разброс по диаметрам УНТ в случае концентрации ферроцена 0,1 % минимальный, а характерный диаметр равен 3–4 нм. В случае увеличения концентрации ферроцена до 1 % разброс по диаметрам увеличивается с увеличением характерного диаметра до 5–7 нм.

Характерный диаметр УНТ, равный 3–4 нм, указывает, что синтезируемые УНТ имеют малое число стенок. В работе [16] также получались массивы УНТ с характерным диаметром, равным 3–4 нм, а измеренное число стенок не превышало трех. Проводя аналогию между нашими результатами и работы [16], можно сделать вывод, что число стенок в синтезируемых нами массивах УНТ не превышает трех. Используемый нами источник углеводорода – этанол для синтеза массивов УНТ в присутствии паров воды на локализованном катализаторе имеет преимущество перед газообразными углево-

дородами, так как формируемая азеотропная смесь этанола и воды однозначно определяет концентрацию паров воды в процессе синтеза УНТ, что повышает повторяемость при проведении экспериментов.

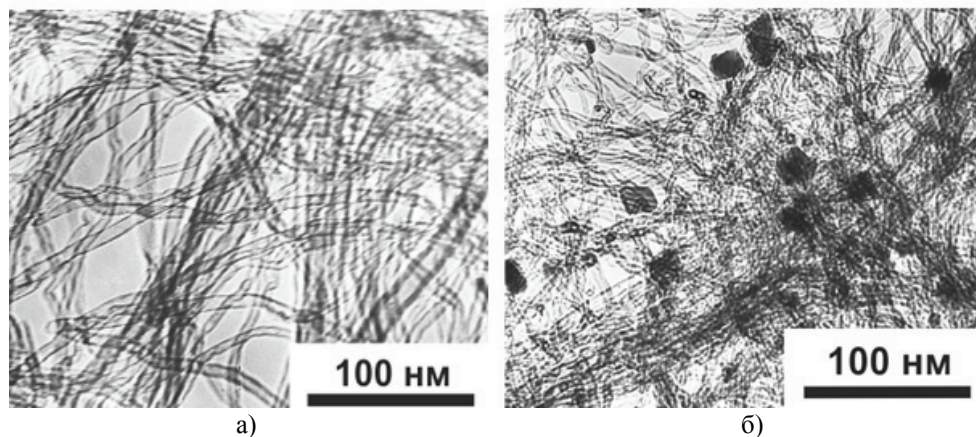


Рис. 4. Изображения УНТ, полученные в просвечивающем электронном микроскопе: а – концентрация ферроцена 1 %; б – концентрация ферроцена 0,1 %

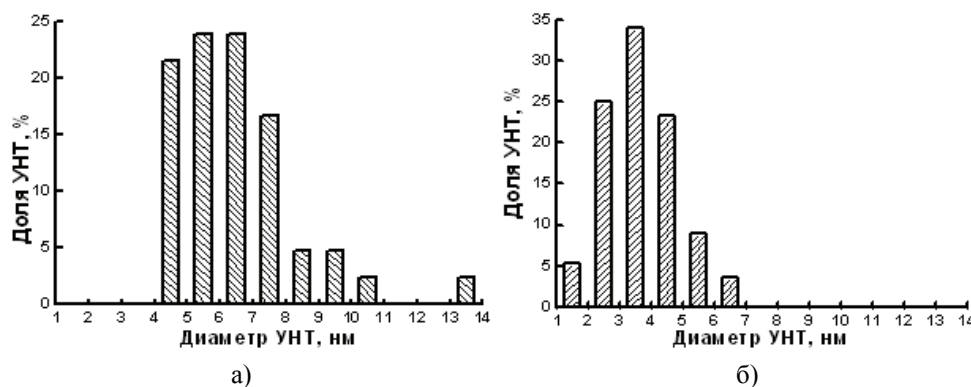


Рис. 5. Диаграммы распределения УНТ по диаметрам: а – концентрация ферроцена 1 %; б – концентрация ферроцена 0,1 %

Увеличение концентрации ферроцена в растворе более 1 % при проведении синтеза приводит к росту массива УНТ с дефектами. На поверхности массива происходит формирование «иголок», которые имеют витиеватую структуру, а в самом массиве, кроме УНТ малого диаметра (меньше 15 нм), присутствуют углеродные формирования диаметром порядка 100 нм. Из представленных экспериментальных результатов следует, что увеличение концентрации ферроцена приводит к уменьшению однородности структуры синтезированных массивов УНТ.

Для того чтобы понять характер изменения распределения, приведенного на рис. 2 с изменением концентрации ферроцена, необходимо принять во внимание тот факт, что при росте УНТ в объеме катализатора увеличивается концентрация карбидов железа. Их концентрация в наноклапте катализатора определяется соотношением углеводорода и ферроцена в газовой смеси. При малой концентрации ферроцена углеводородов относительно больше и при этом в капле больше карбида железа. Можно предположить, что это из-

меняет эффективный коэффициент поверхностного натяжения (γ_{ef}), введенный в работе [16]. Вместе с этим изменяется характер распределения, задаваемый формулой (1) [16]:

$$N_i = a_{Fe} (R_i) n_i \frac{N^{Fe}}{n_i} \exp \left[\frac{\Delta H - 4\pi a^2 \gamma_{ef} (n_i)^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{3}{8\pi} \right)^{\frac{3}{2}}}{kT} \right], \quad (1)$$

где a_{Fe} – активность железа в газовой фазе; R_i – фактор вырождения кластера, равный для газовой фазы 1; n_i – количество атомов железа в кластере; N^{Fe} – концентрация атомов железа при насыщении газовой фазы, определяется по закону Клайперона – Менделеева; ΔH – энтальпия испарения атома железа из расплава; a – параметр решетки железа в расплаве.

Железо в кластерах имеет объемно-центрированную элементарную ячейку. Она имеет объем a^3 и в этом объеме находятся 2 атома. Соответственно объем кластера $a^3 n_i / 2$, а его радиус можно вычислить по формуле

$$r_i = \left[\frac{3 a^3 n_i}{8 \pi} \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (2)$$

Подставим (2) в (1) и получим распределение кластеров по размерам в явном виде:

$$N_i = \frac{A}{r_i^3} \exp \left(-\frac{b}{r_i} \right), \text{ где } b = \frac{3a^3 \gamma_{ef}}{2kT}. \quad (3)$$

Формула для распределения кластеров по размерам качественно согласуется с результатами эксперимента на рис. 2. Распределение имеет асимметричный вид и достигает максимума, когда радиус кластера принимает значение

$$r_{i \max} = b / 3. \quad (4)$$

Проведенный анализ показывает, что при увеличении процентного содержания углеводорода в газовой смеси по сравнению с ферроценом коэффициент поверхностного натяжения увеличивается.

3. Получение отдельно стоящих УНТ

Для формирования массивов ориентированных УНТ был использован синтез, основанный на самоорганизации тонкой субнанометровой пленки металла катализатора заданной площади в один нанокластер. Разработанный метод синтеза УНТ позволяет проводить синтез наноструктур в диапазоне температур от 600 до 800 °С с возможностью роста массива УНТ в заданной точке подложки, при этом характерный диаметр УНТ в массиве можно варьировать в диапазоне от 4 до 15 нм с регулируемой плотностью УНТ. Высота массива может задаваться от 2 мкм и выше.

Проведенные нами исследования влияния скорости подачи реактива на структуру массива УНТ показали, что уменьшение расхода реактива приводит к уменьшению плотности массива вплоть до формирования отдельно расположенных УНТ с падением скорости роста УНТ. На рис. 6 показан массив отдельно растущих УНТ, синтезированный при расходе реактива 0,6 г/ч. Предложенный вариант позволяет получать отдельно расположенные УНТ, но в результате уменьшения расхода реактива процесс синтеза становится недостаточно воспроизводимым и требует стабилизации дополнительных параметров, таких как концентрация остаточного кислорода, нестабильность работы системы испарения при малых расходах.

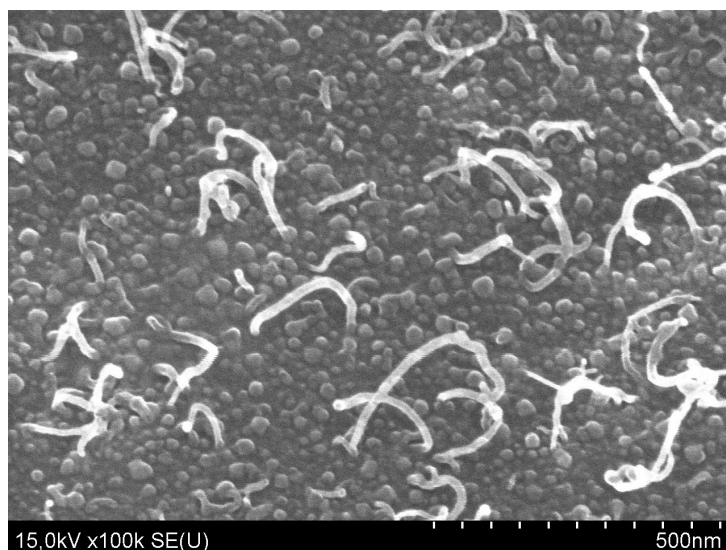


Рис. 6. РЭМ изображение отдельно расположенных УНТ при расходе реактива 0,6 г/ч и температуре роста 750 °С

Рассматривался эффект влияния ионной предобработки поверхности кремния на рост УНТ. Опираясь на эти результаты, мы подвергали ионной обработке образцы кремния с осажденными пленками Ni/Al или Ni/Al/Ti. Образцы отжигались при температуре 700 °С в течение 10 мин, а расход аргона составлял 200 см³/мин. Синтез УНТ протекал при 700 °С в течение 5 мин. Расход аргона был равен 200 см³/мин, а реактива (0,5 % ферроцена в этаноле) – 6 г/ч. Примем эксперименты, поставленные по данной методике, за стандартные для упрощения интерпретации экспериментальных данных. На рис. 7 представлены типичные РЭМ изображения для данной серии экспериментов. На обоих образцах полученные массивы УНТ состоят из отдельно расположенных неупорядоченных УНТ. Проведенный эксперимент показывает возможность формирования разреженных массивов УНТ на поверхности с напыленным каталитическим слоем, подвергнутому ионному травлению. Следует отметить, что синтезированные УНТ на пленке Ni/Al/Ti имеют ровную структуру и больший диаметр по сравнению с УНТ, полученными на пленке Ni/Al.

Для понимания, какие параметры влияют на формирование разреженных массивов УНТ после ионной обработки поверхности был проведен ряд экспериментов. Для исследования влияния длительности времени синтеза на

рост разреженных массивов УНТ был проведен эксперимент, в котором использовались образцы, где на поверхность кремния наносилась пленка Al толщиной 10 нм и пленка Ni толщиной 10 нм. Полученные структуры подвергались ионной обработке в течение 9 мин. После этого проводился синтез УНТ с использованием стандартных параметров процесса, при этом варьировалась длительность синтеза от 2 до 10 мин. Было установлено, что увеличение длительности синтеза не приводит к увеличению длины и плотности УНТ. Данный эффект можно связать с отравлением катализатора атомами кремния, которые диффундируя в зародыш роста УНТ образуют интерметаллиды, блокирующие рост УНТ.

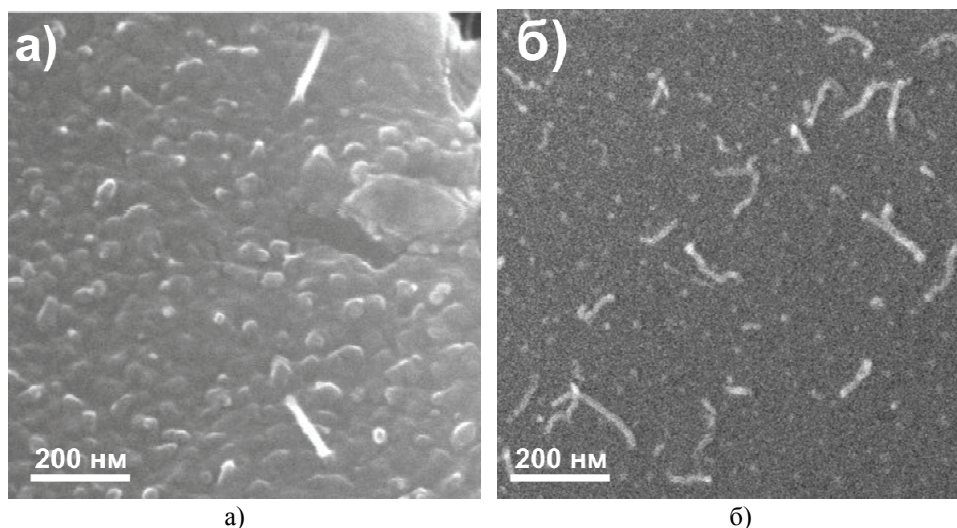


Рис. 7. РЭМ изображение УНТ, синтезированных после ионной обработки пленки Ni/Al: а – на титане; б – на кремнии

Для преодоления отрицательного влияния атомов кремния на рост УНТ были созданы буферные слои, препятствующие отравлению катализатора. Для этого на поверхности кремния формировался оксид кремния толщиной 200 нм, чтобы предотвратить отравление катализатора кремнием после ионной обработки; далее на поверхность SiO_2 наносился слой Al толщиной 10 нм и слой Ni толщиной 10 нм. С использованием данных образцов было изучено влияние длительности ионной обработки на синтез разреженных массивов УНТ. Полученные образцы подвергались ионной обработке разной длительности (7, 9 и 11 мин). Энергия ионов аргона равнялась 600 эВ. Далее полученные образцы использовались для синтеза УНТ при стандартных условиях синтеза. Длительность эксперимента варьировалась от 1 до 5 мин.

Увеличение длительности ионной обработки приводит к уменьшению плотности нанотрубок, причем УНТ изгибаются случайным образом и прижимаются к подложке, в отличие от УНТ, выросших в плотном массиве. Это связано с влиянием сил различной природы (электростатических, гравитационных, магнитных и т.д.) на ориентацию УНТ. В плотном массиве УНТ испытывают взаимное влияние и указанные случайные воздействия взаимно компенсируются рядом стоящими трубками.

В целом влияние ионной обработки связано с тем, что в этом процессе происходит распыление пленки Ni и внедрение атомов Ni в слой Al, при этом процесс травления не может протекать равномерно, так как в объеме пленки присутствуют различные дефекты и неоднородности, приводящие к увеличению или уменьшению скорости травления. В результате на поверхности остаются островки Al с внедренными атомами Ni, и чем больше время травления, тем меньше плотность островков в итоге. Данные островки являются каталитическими центрами, так как в присутствии Ni распад ферроцена ускоряется.

Увеличение времени синтеза приводит к существенному росту УНТ, при этом они не способны ориентироваться вертикально. Диаметр синтезированных УНТ равен приблизительно 40 нм, что значительно больше характерного диаметра УНТ (5–7 нм), синтезированных при тех же условиях на подложке, не подвергнутой ионной обработке. Увеличение диаметра УНТ, возможно, связано с увеличением удельной концентрации ферроцена, приходящейся на долю атомов никеля, плотность которых падает на поверхности после ионной обработки. В результате чего в заданной точке может сформироваться зародыш УНТ большего диаметра, поэтому при проведении синтеза разреженных массивов надо проводить корректировку концентрации ферроцена в меньшую сторону.

Полученные нанотрубки на поверхности кремния и оксида кремния закручиваются в процессе роста, в результате чего при подаче на них потенциала может не произойти выпрямление, если их длина слишком велика, что скажется на электрофизических характеристиках.

Для исследования роста УНТ на поверхности Ti были изготовлены два типа образцов. Первый тип образцов представляет собой титан толщиной 200 нм, нанесенный через маску на поверхность кремния, на который наносят никель магнетронным распылением и после чего его удаляют химическим способом, чтобы не активировать поверхность для роста УНТ, где нет титана. После таких операций поверхность титана становится рельефной. Второй тип образцов представляет собой титан толщиной 200 нм, нанесенный на поверхность кремния, который подвергается химическому травлению в течение разных промежутков времени (20, 40 и 65 с) для формирования на поверхности Ti неоднородностей.

Проведенный синтез по стандартной методике показал, что выросшие нанотрубки имеют малую длину (< 1 мкм) при диаметре 30–50 нм, а в случае титана, на поверхность которого не производилось нанесение никеля, рост отсутствует полностью. Выше упоминалось, что увеличение температуры способствует появлению паразитного роста, интенсивность которого зависит от концентрации ферроцена, поэтому температуру синтеза мы увеличили до 800 °C, а концентрацию ферроцена уменьшили в этаноле с 0,5 до 0,2 %, чтобы уменьшить паразитный рост УНТ. Длительность синтеза УНТ составила 5 мин. На рис. 8 представлены РЭМ изображения УНТ, выросших на поверхности титана, на который в процессе изготовления образцов наносился никель. Сформированный массив УНТ имеет неупорядоченную и разряженную структуру, состоящую преимущественно из ровных УНТ. При этом сформированные УНТ имеют форму цилиндра (рис. 3,б) или конуса (рис. 8,в), а аспектное соотношение варьируется от 1:50 и более. С точки зрения эмиссии УНТ, имеющие форму конуса, могут быть предпочтительнее.

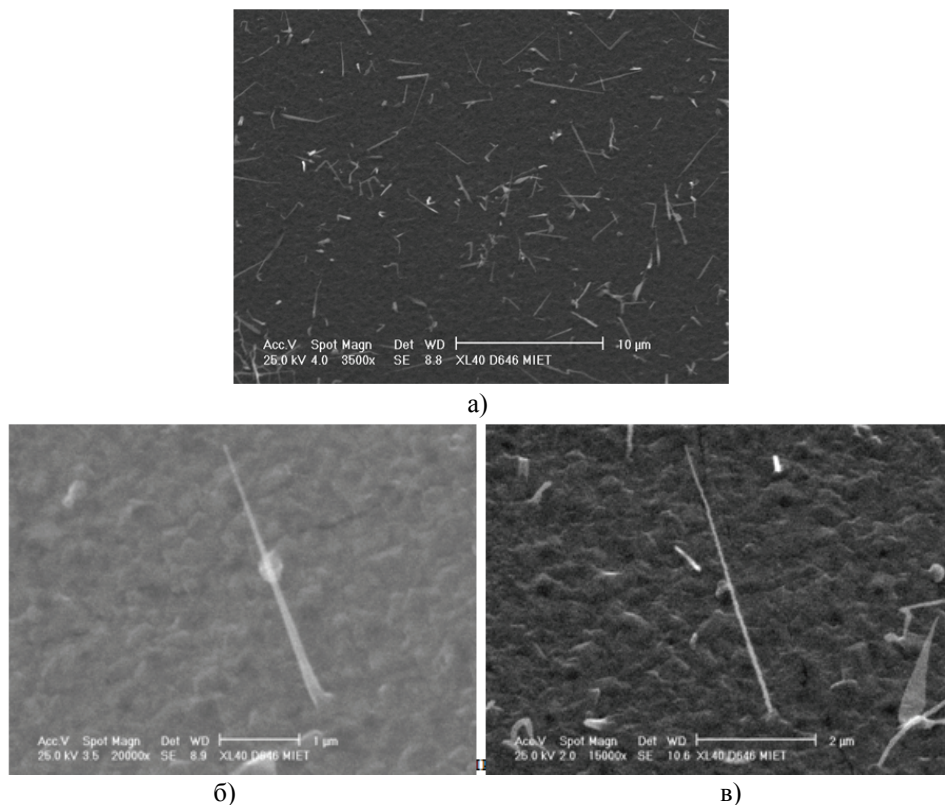


Рис. 8. РЭМ изображение УНТ, выросших на поверхности Ti, на которую наносился и удалялся Ni: а – общий план; б – УНТ конической формы; в – УНТ цилиндрической формы

В случае формирования УНТ на поверхности титана, который подвергался химической обработке в течение 20 с без нанесения никеля, плотность УНТ меньше, а высота УНТ не превышает 1 мкм, при этом рельефность титана по сравнению с первым типом образцов меньше.

Таким образом, при формировании топологии методами фотолитографии следует учитывать толщину каталитического слоя и размеры топологического рисунка. Уменьшение ферроцена в газовой смеси приводит к увеличению коэффициента поверхностного натяжения катализатора. При использовании совмещенного катализатора наблюдаются следующие закономерности, влияющие на синтез и структуру массивов отдельно стоящих УНТ. Во-первых, перед нанесением каталитического слоя необходимо формировать буферный слой для предотвращения отравления катализатора атомами кремния. Заметим, что на рост УНТ влияет тип буферного слоя и рельеф поверхности. Во-вторых, подслой титана способствует формированию прямых УНТ с нужным аспектным соотношением. Благодаря ионной обработке поверхности массива можно управлять плотностью УНТ вплоть до формирования отдельно расположенных УНТ.

Список литературы

1. **Einarsson, E.** Minimal bundling of single-walled carbon nanotubes comprising vertically aligned films / Erik Einarsson, Hidetsugu Shiozawa, Christian Kramberger,

- Mark H. Rummeli, Alex Gruneis, Thomas Pichler, and Shigeo Maruyama. – URL: http://arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/0702/0702630v1.pdf
2. **Жбанов, А. И.** Устройства наноэлектроники на основе углеродных нанотрубок / А. И. Жбанов, Н. И. Сеницын, Г. В. Торгашов // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2004. – Т. 47, № 5–6. – Р. 487.
 3. **Shyu, Y. M.** Low-temperature growth and field emission of aligned carbon nanotubes by chemical vapor deposition / Y. M. Shyu and F. C. N. Hong // Materials Chemistry and Physics. – 2001. – V. 72. – P. 223–227.
 4. **Shyu, Y. M.** The effects of pre-treatment and catalyst composition on growth of carbon nanofibers at low temperature / Y. M. Shyu and F. C. N. Hong // Diamond and Related Materials. – 2001. – V. 10. – P. 1241–1245.
 5. **Laplaze, D.** Carbon nanotubes: dynamics of synthesis processes / D. Laplaze et al. // Carbon. – 2002. – V. 40. – P. 1621–1634.
 6. **Hata, K.** Waterassisted highly efficient synthesis of impurity-free single-walled carbon nanotubes / K. Hata et al. // Science. – 2004. – V. 306. – P. 1362–1364.
 7. **Kim, M. J.** Efficient transfer of a VASWNT film by a flip-over technique / M. J. Kim et al. // Journal of the American Chemical Society. – 2006. – V. 128. – P. 9312–9313.
 8. **Fan, S. S.** Self-oriented regular arrays of carbon nanotubes and their field emission properties / S. S. Fan et al. // Science. – 1999. – V. 283. – P. 512–514.
 9. **Kong, J.** AChemical vapor deposition of methane for single-walled carbon nanotubes / J. Kong, A. M. Cassell and H. J. Dai // Chemical Physics Letters. – 1998. – V. 292. – P. 567–574.
 10. **Merkulov, V. I.** Shaping carbon nanostructures by controlling the synthesis process / V. I. Merkulov et al. // Applied Physics Letters. – 2001. – V. 79. – P. 1178–1180.
 11. **Chhowalla, M.** Growth process conditions of vertically aligned carbon nanotubes using plasma enhanced chemical vapor deposition / M. Chhowalla et al. // Journal of Applied Physics. – 2001. – V. 90. – P. 5308–5317.
 12. **Sen, R.** Metal-billed and hollow carbon nanotubes obtained by the decomposition of metal-containing free precursor molecules / R. Sen, A. Govindaraj and C. N. R. Rao // Chemistry of Materials. – 1997. – V. 9. – P. 2078–2081.
 13. **Nikolaev, P.** Gas-phase catalytic growth of single-walled carbon nanotubes from carbon monoxide / P. Nikolaev et al. // Chemical Physics Letters. – 1999. – V. 313. – P. 91–97.
 14. **Lee, C. J.** Catalyst effect on carbon nanotubes synthesized by thermal chemical vapor deposition / C. J. Lee, J. Park and J. A. Yu // Chemical Physics Letters. – 2002. – V. 360. – P. 250–255.
 15. **Andrews, R.** Multiwall carbon nanotubes: Synthesis and application / R. Andrews, D. Jacques, D. L. Qian and T. Rantell // Accounts of Chemical Research. – 2002. – V. 35. – P. 1008–1017.
 16. **Булярский, С. В.** Расчет параметров нуклеации кластеров катализаторов для роста углеродных нанотрубок / С. В. Булярский, А. С. Басаев, В. А. Галперин и др. // Известия вузов. Электроника. – 2010. – № 3 (83). – С. 38–44.

Булярский Сергей Викторович

доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
инженерной физики, Ульяновский
государственный университет

E-mail: bsv@ulsu.ru

Bulyarsky Sergey Viktorovich

Doctor of physical and mathematical
sciences, professor, head of sub-department
of engineering physics, Ulyanovsk
State University

Басаев Александр Сергеевич

кандидат физико-математических наук,
заместитель директора ГНЦ НПК
«Технологический центр», г. Москва

E-mail: bsv@ulsu.ru

Basaev Alexander Sergeevich

Candidate physical and mathematical
sciences, vice director of “Technological
center”, Moscow

УДК 538.95; 539.21

Булярский, С. В.

Особенности управляемой технологии углеродных нанотрубок /
С. В. Булярский, А. С. Басаев // Известия высших учебных заведений.
Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2011. – № 2 (18). –
С. 141–152.