

УДК 621.38-022.532

**О.И. Ильин, В.С. Климин, М.В. Рубашкина, К.С. Сергиенко, А.С. Семенов,
А.А. Федотов, Чинь Ван Мьюй, В.Ю. Яненко**

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ
Ni-Cr-Si ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК МЕТОДОМ
ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ**

Проведен термодинамический анализ реакций межфазного взаимодействия в структуре: Ni(10нм)/Cr(20нм)/Si(380мкм), который показал, что на начальной стадии нагрева Ar служит для вытеснения остаточных газов атмосферы, а NH₃ и H₂ связывают свободный O₂. На стадии активации роль NH₃ заключается в восстановлении Ni из его соединений с O₂ и Cr, при этом формируется проводящий подслои CrN/Cr₂N. Также показано, что независимо от фазового состояния Ni, на нем происходит разложение C₂H₂ с выделением C. При этом под каталитическими центрами образуется подслои CrN/Cr₂N/Cr, который, препятствует проникновению никеля в Si подложку, а также окислению Si, и является проводящим подслоем для обеспечения электрического контакта к углеродным нанотрубкам (УНТ). Проведены эксперименты по формированию каталитических центров на данной структуре с последующим ростом массива вертикально ориентированных углеродных нанотрубок. Полученные результаты могут быть использованы для разработки методики выбора материалов и определения режимов роста УНТ методом плазменного химического осаждения из газовой фазы (ПГФХО), так же как и для формирования критериев предъявляемых к структуре на которой будут формироваться каталитические центры с последующим ростом УНТ.

Нанотехнологии; наноматериалы; ориентированные углеродные нанотрубки; термодинамический анализ; каталитические центры; химическое осаждение из газовой фазы.

**O.I. Ilin, V.S. Klimin, M.V. Rubashkina, K.S. Sergienko, A.S. Semenov,
A.A. Fedotov, Thcin Van Myoi, V.Yu. Yanenko**

**THERMODYNAMIC ANALYSIS OF INTERACTION IN THE Ni-Cr-Si AT
Ni-Cr-Si GROWTH OF CARBON NANOTUBES BY CHEMICAL VAPOR
DEPOSITION**

In work carried out thermodynamic analysis of reactions interfacial structure: Ni (10 nm)/Cr (20nm)/Si (380μm), who showed that at the initial heating stage, Ar serves for displacing the residual gas atmosphere, and NH₃ and H₂ bind free O₂. In step activation NH₃ role is to restore it from Ni compounds with O₂ and Cr, thus forming a conductive underlayer CrN/Cr₂N. It is also shown that regardless of the phase state of Ni, it decomposes to release C₂H₂ carbon. Thus under catalytic sites formed underlayer CrN/Cr₂N/Cr, which prevents the penetration of nickel Si substrate and oxidation of Si, and a conductive sublayer to ensure electrical contact for carbon nanotubes (CNT). Experiments have been conducted on the formation of catalytic sites on the structure, followed by the growth of an array of vertically aligned carbon nanotubes. The results can be used to develop procedures for the selection of materials and the determination of the modes of growth of CNTs by plasma chemical vapor deposition (PECVD), as well for determining the criteria for the structure which will form the catalytic sites with subsequent growth of CNTs.

Nanotechnology; nonmaterial; oriented carbon nanotubes; thermodynamic analysis; catalytic sites; chemical vapor deposition.

Введение. Повышенный интерес к изучению углеродных нанотрубок обусловлен, с одной стороны, их уникальными физико-химическими свойствами, благодаря которым они являются привлекательным объектом фундаментальных исследований, а с другой стороны – широкими перспективами прикладного использования [1–3].

Для реализации практических разработок, использующих УНТ, требуется селективный синтез нанотрубок с контролируемой структурой и свойствами. Одним из наиболее перспективных методов такого синтеза является химическое осаждение из газовой фазы, инициированное плазмой. Метод плазменного ГФХО позволяет получать ориентированные массивы УНТ на различных подложках. Особенностью данного метода является использование каталитических центров [4–6].

Анализ литературных данных показывает, что на строение и свойства выращиваемых методом плазменного ГФХО углеродных нанотрубок существенное влияние оказывают: химическая природа и геометрические параметры частиц каталитических центров, давление, температура синтеза, состав рабочей газовой смеси, а также продолжительность процесса [7–8]. Использование в качестве материала подложки различных металлов позволяет обеспечивать электрический контакт к выращенным структурам.

Таким образом, изучение влияния режимов выращивания углеродных нанотрубок методом плазменного ГФХО на их геометрические параметры является актуальной задачей и служит основой для разработки технологии синтеза ориентированных массивов углеродных нанотрубок с контролируемыми параметрами для использования в качестве чувствительных элементов устройств микроэлектронной сенсорики.

Целью данной работы является проведение термодинамического анализа реакций межфазного взаимодействия в структуре: Ni(10 нм)/Cr(30 нм)/Si(380 мкм), с последующим формированием каталитических центров на данной структуре методом отжига тонких пленок, и выращиванием массива углеродных нанотрубок.

Методика исследования. В качестве объекта для проведения термодинамического анализа использовалась структура Ni(10 нм)/Cr(30 нм)/Si(380 мкм).

Термодинамический анализ проводился путем сравнения температурных зависимостей изменений свободной энергии Гиббса ΔG (Т). Расчеты проводились с использованием коммерчески доступного пакета FACT Sage 6.2 (GTT Technologies, Germany), который учитывает давление газообразных компонент, нелинейные температурные зависимости и термодинамические свойства элементов и соединений, рассчитанных в третьем приближении [9].

Формирование каталитических центров и рост углеродных нанотрубок проводился методом плазмохимического осаждения из газовой фазы на многофункциональном нанотехнологическом комплексе НАНОФАБ НТК-9 (НТ-МДТ, Россия). РЭМ-изображения экспериментальных образцов получены с использованием растрового электронного микроскопа Nova NanoLab 600 (FEI, Нидерланды).

Исследование геометрических параметров каталитических центров проводилось на сканирующей зондовой нанолaborатории Ntegra (НТ-МДТ, Россия) методом силовой спектроскопии АСМ. Обработка АСМ-изображений выполнялась с использованием программного пакета Image Analysis 3.5.

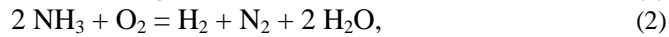
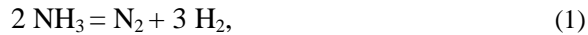
Результаты и обсуждение. Для выращивания УНТ методом ГФХО на подложке формируются каталитические центры, которые определяют структуру углеродных нанотрубок и кинетику их роста. Каталитические центры формируются нагретом подложки с тонкими плёнками металлов до температуры 1000 °С в атмосфере аргона, аммиака и кислорода из остаточной атмосферы воздуха при давлении (3–5) Торр.

Для выявления закономерностей взаимодействия материалов структуры между собой и компонентами рабочей газовой смеси при термообработке в указанных режимах необходимо провести термодинамический анализ возможных хими-

ческих реакций путем сравнения температурных зависимостей изменения свободной энергии Гиббса. В качестве модельной рассмотрим структуру Ni (10 нм) – Cr (20 нм) – Si (380 мкм).

На начальной стадии нагрев структуры происходит в условиях непрерывной откачки при давлениях (3-5) Торр в атмосфере Ar (30-50 см³/мин) и NH₃ (10–20 см³/мин) для обеспечения вытеснения и связывания атмосферного кислорода. Однако остаточный кислород в реакторе может оставаться.

Анализ зависимостей ΔG(T) для реакций разложения аммиака в присутствии кислорода при давлении 4,5 Торр:



показал (рис. 1), что наиболее вероятна реакция взаимодействия аммиака с кислородом с образованием паров воды, водорода и азота. При этом образование атомарного кислорода и водорода маловероятно [10].

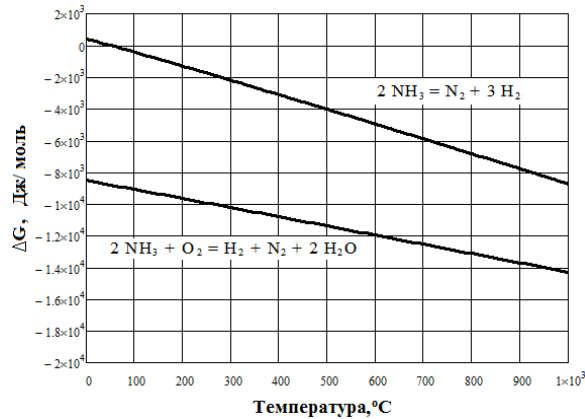
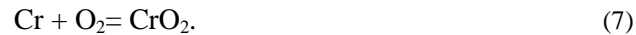


Рис. 1. Зависимость изменения энергии Гиббса от температуры для реакций разложения аммиака

Рассмотрим возможные реакции взаимодействия остаточного кислорода с компонентами данной структуры и построим зависимости ΔG(T) реакций взаимодействия:



Анализ зависимостей на рис. 2 зависимостей ΔG(T) реакций взаимодействия показывает, что наиболее вероятной является реакция окисления хрома. Наиболее вероятной будет реакция (3) взаимодействия кислорода с водородом с образованием паров воды.

Таким образом, остаточный кислород, не прореагировавший с аммиаком по реакции (2), будет реагировать с водородом с образованием паров воды по реакции (3). Кроме того, возможно протекание реакции (4) окисления никеля с образованием NiO.

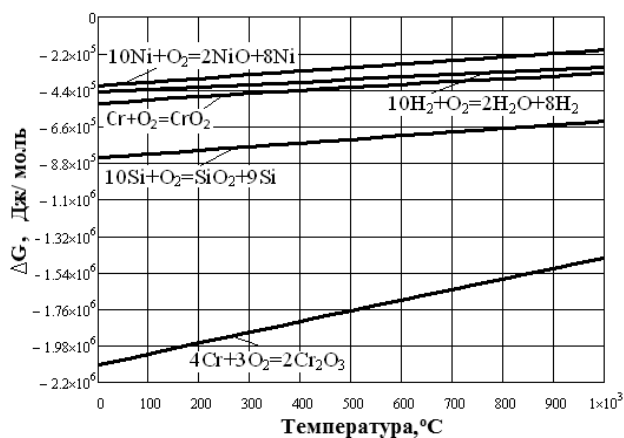


Рис. 2. Зависимость изменения энергии Гиббса от температуры для реакций взаимодействия с кислородом

Поскольку в реакторе поддерживается постоянное давление путем непрерывной откачки при подводе технологических газов, образующиеся в ходе реакции (2) и (3) пары воды вероятнее всего будут удалены. Однако, поскольку реакции с их участием возможны, рассмотрим реакции взаимодействия компонент системы с парами воды и построим зависимости $\Delta G(T)$ этих реакций (рис. 3):

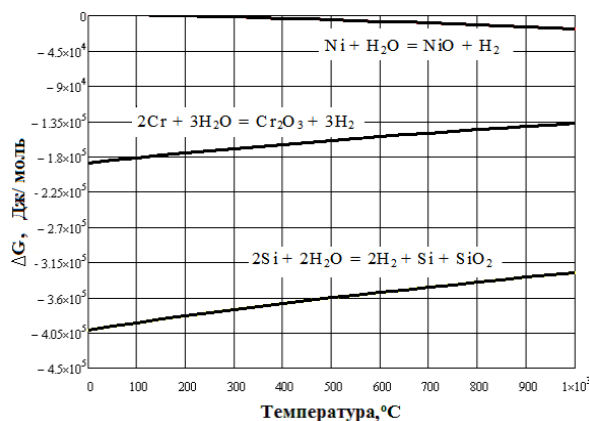
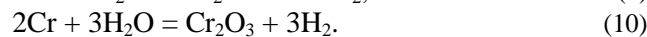


Рис. 3. Зависимость изменения энергии Гиббса от температуры для реакций взаимодействия с парами воды

Из представленных зависимостей $\Delta G(T)$ реакций (8–10) видно, что наиболее вероятны образования соединений SiO_2 и Cr_2O_3 .

Анализ показывает, что наиболее вероятными реакциями будут реакции (9, 10), однако в связи с незначительным количеством паров воды вероятнее всего протекание реакций (8) с формированием оксида никеля.

Рассмотрим процессы твердофазного взаимодействия в структуре Ni (10 нм) – Cr (20 нм) – Si (380 мкм) (рис. 4) между пленками металлов.

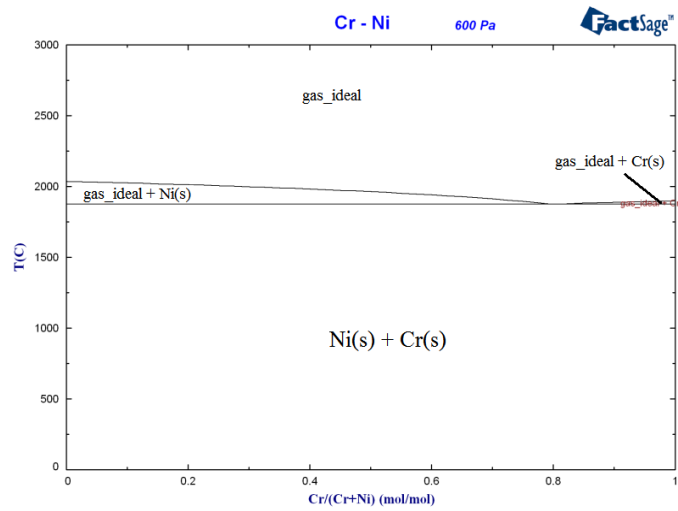


Рис. 4. Фазовая диаграмма взаимодействия Cr и Ni

Из фазовой диаграммы, представленной на рис. 4, видно, что взаимодействие между металлом каталитических центров и металлом подслоя при данных режимах не наблюдается.

Рассмотрим реакции взаимодействия пленки Cr с кремниевой подложкой в данной структуре и построим зависимости $\Delta G(T)$ (рис. 5):

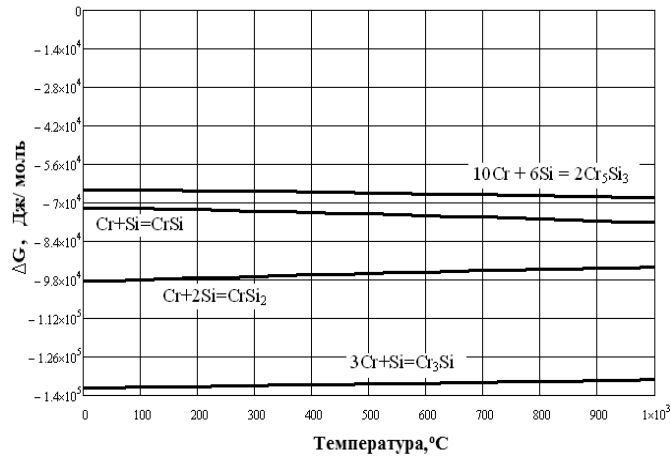
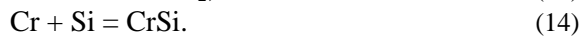


Рис. 5. Зависимость изменения свободной энергии Гиббса от температуры для реакций взаимодействия Cr с кремниевой подложкой

Результаты анализа зависимостей $\Delta G(T)$ (рис. 5) показывают возможное образование различных силицидов хрома, таких как Cr_3Si , Cr_5Si_3 , CrSi_2 , CrSi .

Таким образом, проведенный анализ показывает, что в результате термообработки на стадии нагрева будут проходить процессы фазообразования в структуре, и модельная структура трансформируется к виду, представленному на рис. 6.

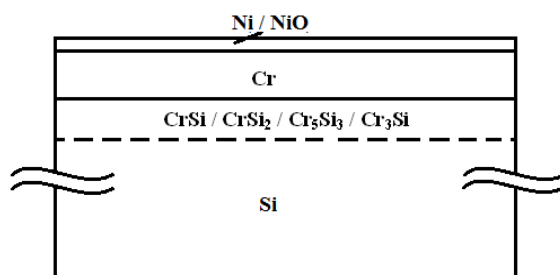


Рис. 6. Схема модельной структуры после взаимодействий на этапе нагрева

Таким образом, на этапе нагрева водород, выделяющийся при диссоциации аммиака, связывает молекулы кислорода из остаточной атмосферы. Однако в структуре возможно формирование оксидов за счет реакции с остаточным кислородом и парами воды, образующимися при реакции кислорода с аммиаком. Кроме того, рассмотрение реакций твердофазного взаимодействия показало возможность образования в структуре силицидов.

На этапе активации в реактор подается большее количество аммиака ($210 \text{ см}^3/\text{мин}$) при сохранении давления (3–5 Торр). При этом полагаем, что весь кислород из остаточной атмосферы, а также пары воды полностью прореагировали на этапе нагрева, и газообразные продукты реакций удалены из реактора. В этих условиях в реакторе будет протекать реакция разложения аммиака (1). Рассмотрим взаимодействие компонентов структуры (рис. 6) с продуктами разложения аммиака на этапе активации.

Рассмотрим реакции взаимодействия азота, образующегося при диссоциации аммиака (рис. 2), с материалами структуры и построим зависимости $\Delta G(T)$ полученных реакций (рис. 7):

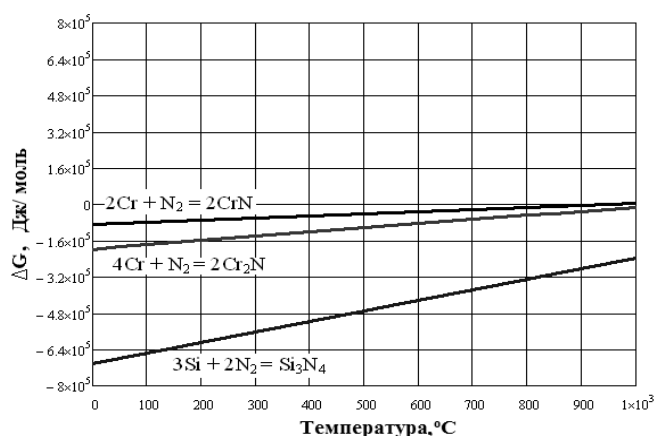


Рис. 7. Зависимость изменения энергии Гиббса от температуры для реакций взаимодействия материалов структуры с азотом

Из полученных зависимостей $\Delta G(T)$ (рис. 7) следует, что образование нитрида хрома наиболее вероятно, учитывая также, что пленка хрома покрывает подложку кремния и является диффузионным барьером для азота.

При рабочем давлении (3–5) Торр в рассматриваемом температурном диапазоне взаимодействия никеля и азота не наблюдается (рис. 8).

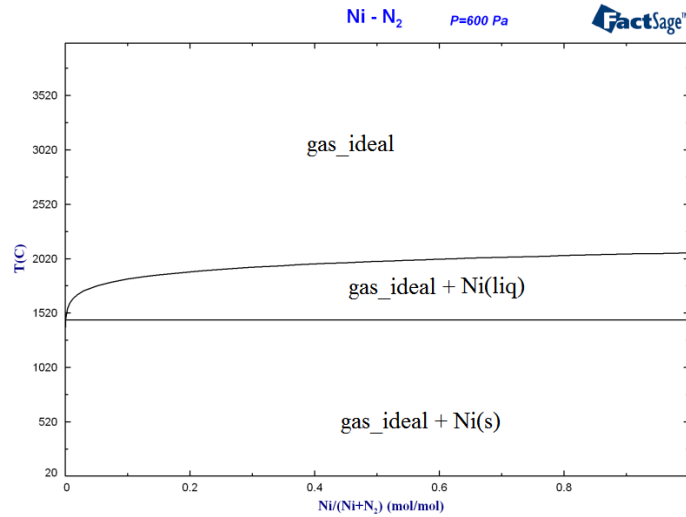


Рис. 8. Фазовая диаграмма взаимодействия никеля и азота

На данном этапе никель коагулирует в каталитические центры и не препятствует доступу азота к подслою хрома.

Рассмотрим реакции восстановления оксидов в структуре и построим зависимости $\Delta G(T)$ полученных реакций (рис. 9):

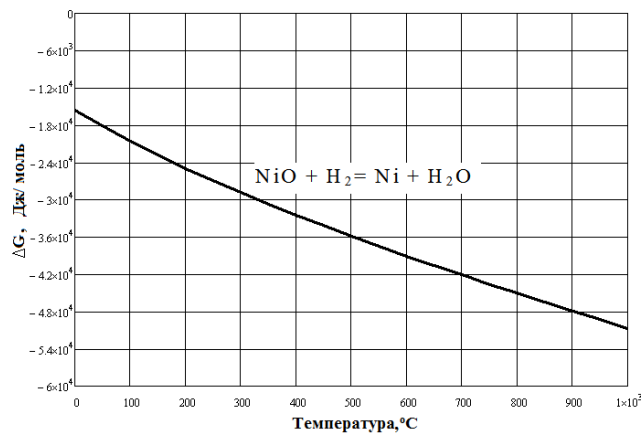


Рис. 9. Зависимость изменения энергии Гиббса от температуры для реакции восстановления

Термодинамическая характеристика реакции (18) свидетельствуют, что оксид никеля восстанавливается до металлического никеля, пригодного для формирования каталитических центров хрома.

Таким образом, приведенный анализ химических реакций позволяет установить, что на этапе активации должны протекать реакции восстановления каталитического материала водородом и нитридации материала подслоя. В частности никель из образовавшегося на этапе нагрева соединения NiO полностью восстанавливается, а на поверхности пленки хрома происходит образования соединений CrN и Cr₂N. При этом модельная структура трансформируется к виду, представленному на рис. 10.

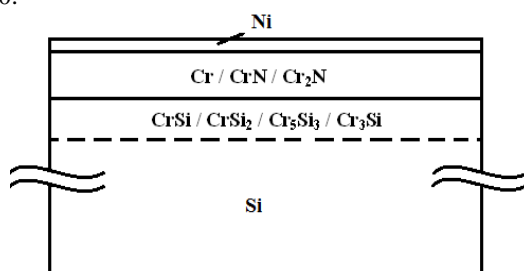


Рис. 10. Схема модельной структуры после взаимодействий на этапе активации

На этапе роста в реактор подается аммиак (210 см³/мин) и углеродосодержащий газ – ацетилен (70 см³/мин). Будем полагать, что все реакции взаимодействия компонент, образовавшихся после первой стадии с продуктами диссоциации аммиака, уже прошли. На данном этапе рассмотрим взаимодействие материалов структуры после активации (рис. 10) с продуктами разложения ацетилена.

Анализ реакции разложения ацетилена:



Показывает, что продуктами разложения ацетилена являются водород и углерод (рис. 11).

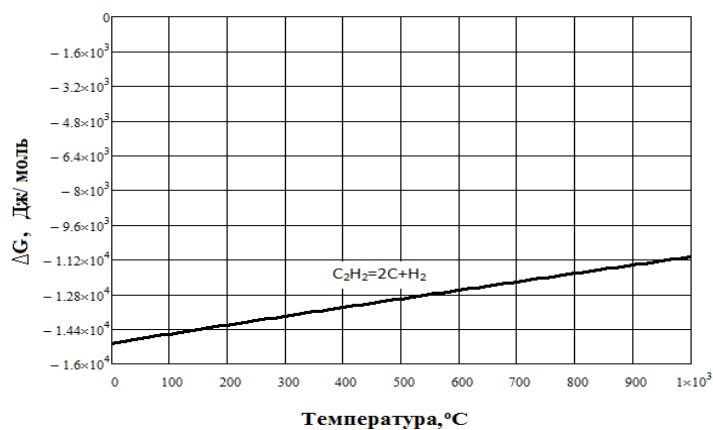


Рис. 11. Зависимость изменения энергии Гиббса от температуры для реакции разложения ацетилена

Рассмотрим реакции взаимодействия материалов структуры (рис. 10) с продуктами разложения ацетилена и аммиака и построим зависимости для данных реакций (рис. 12):



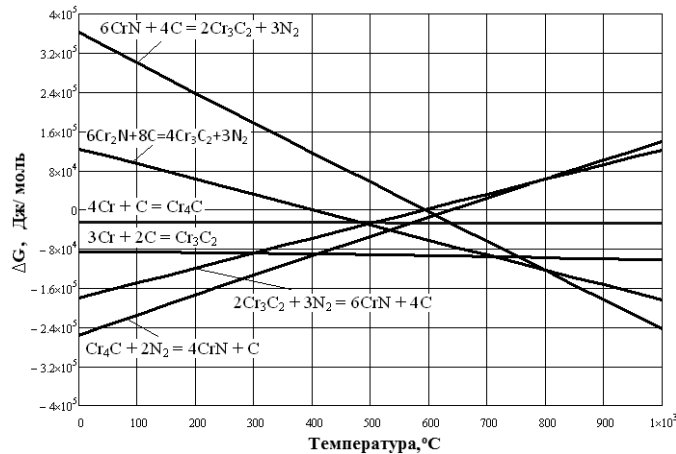
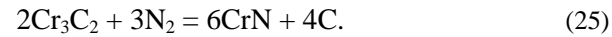
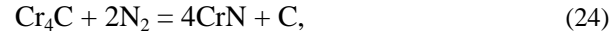
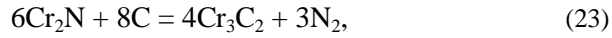
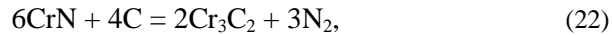


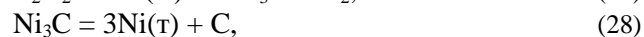
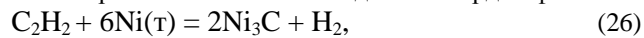
Рис. 12. Зависимость изменения энергии Гиббса от температуры для реакций взаимодействия структуры с углеродом и азотом

Анализ представленных зависимостей показывает, что возможно образование карбида хрома, однако реакция восстановления углерода азотом из этого карбида термодинамически более вероятна. А значит, что подслоя представляет собой нитрид хрома, который является электропроводящим и будет служить как нижний контакт к углеродным нанотрубкам.

Рассмотрим реакцию взаимодействия ацетилена на поверхности никеля, который является каталитическим материалом. Предполагаем возможность формирования жидкой фазы никеля в рассматриваемом температурном диапазоне. Корректность этого допущения определяется следующими факторами:

- ◆ пленка никеля имеет толщину 10 нм;
- ◆ для наноразмерных объектов температура плавления ниже, чем у объемного материала (эффект Гиббса–Томсона) [11];
- ◆ реакция разложения ацетилена на никеле экзотермическая [12].

Рассмотрим два возможных варианта с никелем в жидкой и твердой фазе:



Из полученных зависимостей изменения энергии Гиббса от температуры (рис. 13) следует, что реакции разложения ацетилена на каталитических центрах с образованием карбида никеля возможны, однако карбид никеля является неустойчивым соединением и разлагается с выделением углерода, который формирует УНТ за счет эффекта самоорганизации.

Термодинамический анализ структуры позволил сделать выводы о том что, выбранные материалы для пленок каталитического материала и подслоя на кремнии обеспечат наилучший рост массива УНТ и образование проводящего слоя для подвода электрического контакта.

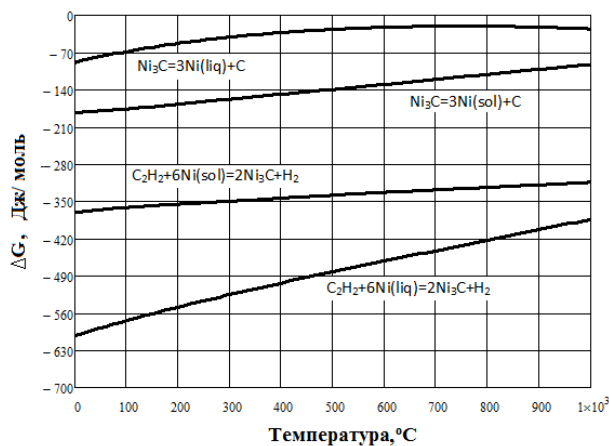


Рис. 13. Зависимость изменения энергии Гиббса от температуры для реакции взаимодействия ацетилена с Ni, а также разложения полученного карбида

На данной структуре была сформирована матрица каталитических центров при режимах, указанных в табл. 1.

Таблица 1

Параметры формирования каталитических центров

Стадия	T, °C	t, мин	NH ₃ , см ³ /мин	C ₂ H ₂ , см ³ /мин	Ag, см ³ /мин	P, Торр
Нагрев	750	20	15	-	40	4,5

На рис. 14 представлены РЭМ- и АСМ-изображения сформированных по режимам в табл. 1 каталитических центров.

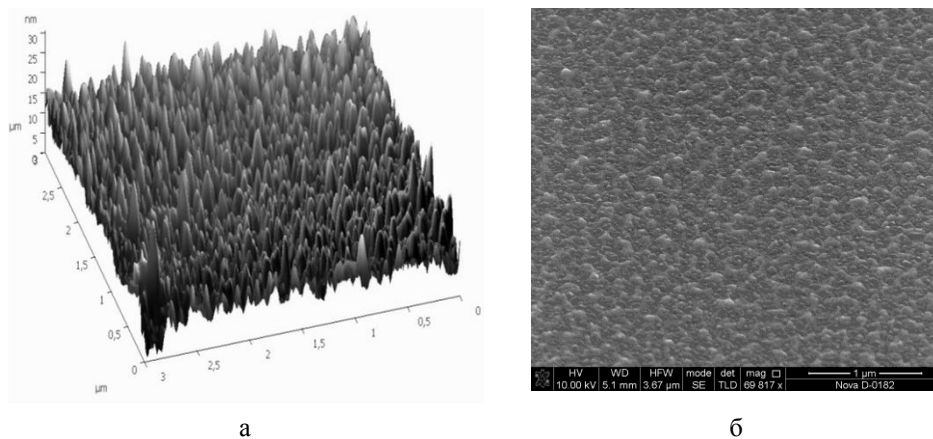


Рис. 14. АСМ (а) и РЭМ (б) изображения каталитических центров, сформированных на структуре Ni/Cr/Si

Геометрические параметры каталитических центров, полученных при режимах, указанных в табл. 1, даны в табл. 2.

Таблица 2

Параметры каталитических центров сформированных на структуре Ni/Cr/Si

Температура, °C	Высота, нм	Шероховатость, нм	Диаметр, нм	Плотность, см ²
750	19,96 ± 1,92	3,17 ± 0,24	94 ± 7,6	1,7 · 10 ⁹

Варьируя технологическими режимами на данном этапе, можно контролировать геометрические параметры и плотность каталитических центров на подложке для пленки каталитического слоя фиксированной толщины.

На сформированных каталитических центрах был произведен рост углеродных нанотрубок по режимам, представленным в табл. 3.

Таблица 3

Режимы выращивания УНТ

Стадия	T, °C	t, мин	NH ₃ , см ³ /мин	C ₂ H ₂ , см ³ /мин	Ar, см ³ /мин	P, Торр
Рост	750	20	210	70	-	4,5

На рис. 15 представлены РЭМ-изображения массивов углеродных нанотрубок, полученных при режимах, представленных в табл. 3.

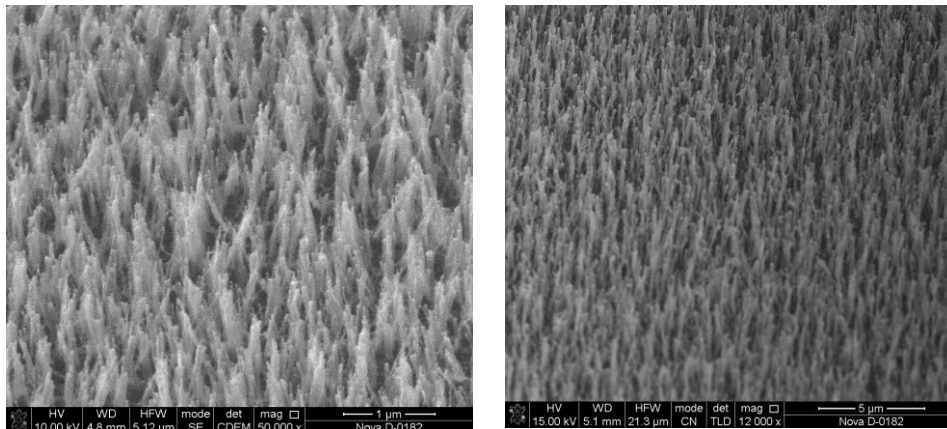


Рис. 15. РЭМ-изображения вертикально ориентированных массивов УНТ, полученных на структуре Ni/Cr/Si

Из полученных РЭМ-изображений можно определить геометрические параметры углеродных нанотрубок, входящих в массив. Высота УНТ порядка 3 мкм, диаметр нанотрубок 20–50 нм. Трубки в данном массиве характеризуются большим аспектным отношением. Они собраны в пучки по 5–10 шт. Проведенные исследования АСМ методиками показали высокую адгезию трубок к поверхности, а также подтвердили наличие общего электрического контакта к полученным нанотрубкам [13–15].

Заключение. Проведенный в работе термодинамический анализ химических реакций структуры Ni/Cr/Si показал, что на начальной стадии нагрева Ag служит для вытеснения остаточных газов атмосферы, а NH₃ и H₂ связывают свободный O₂. На стадии активации роль NH₃ заключается в восстановлении Ni из его соединений с O₂, при этом формируется проводящий подслоя CrN/Cr₂N. Также показано,

что независимо от фазового состояния Ni, на нем происходит разложение C₂H₂ с выделением C, идущим на строение углеродных нанотрубок. При этом под каталитическими центрами образуется подслои CrN/Cr₂N/Cr, который является проводящим подслоем для обеспечения электрического контакта к УНТ. Кроме того, электрический контакт обеспечивается прилегающим к кремниевой подложке слоем силицида хрома.

Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования, Научно-образовательного центра "Нанотехнологии" Южного федерального университета и Научно-исследовательской лаборатории нанобиотехнологий и новых материалов ЮФУ – НТ-МДТ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агеев О.А., Сюрлик Ю.В., Климин В.С., Федотов А.А. Получение нанокompозитных полимерных материалов, модифицированных углеродными наноструктурами, на основе НАНОФАБ НТК-9 // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 1 (90). – С. 135-142.
2. Li J., Lu Y., Ye Q., Cinke M., Han J., Meunier M. Carbon nanotube sensors for gas and organic vapor detection // Nano Letters. – 2003. – Vol. 3. – P. 929-933.
3. Агеев О.А., Сюрлик Ю.В., Коломийцев А.С., Сербу Н.И. Исследование влияния концентрации углеродных нанотрубок на электрическое сопротивление пленок полимерного нанокompозита // Нано- и микросистемная техника. – 2010. – № 10. – С. 2-6.
4. Агеев О.А., Ильин О.И., Климин В.С., Коломийцев А.С., Федотов А.А. Исследование режимов формирования и модификации ориентированных массивов углеродных нанотрубок методом PECVD на нанотехнологическом комплексе НАНОФАБ НТК-9 // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 4 (117). – С. 69-77.
5. Агеев О.А., Ильин О.И., Климин В.С., Коноплев Б.Г., Федотов А.А. Исследование режимов формирования каталитических центров для выращивания ориентированных массивов углеродных нанотрубок методом PECVD // Химическая физика и мезоскопия. – 2011. – № 2. – Т. 13. – С. 226-231.
6. Климин В.С., Агеев О.А., Ильин О.И., Федотов А.А. Исследование режимов получения каталитических структур из пленки Ni для выращивания углеродных нанотрубок // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 4 (117). – С. 222-225.
7. Chhowalla M. Growth process conditions of vertically aligned carbon nanotubes using plasma enhanced chemical vapor deposition // J. Appl. Phys. – 2001. – Vol. 90, № 10. – P. 5308-5317.
8. Melechko A.V., Merkulov V.I., McKnight T.E., M.A. Guillorn, K.L. Klein, D.H. Lowndes, Simpson M.L. Vertically aligned carbon nanofibers and related structures: Controlled synthesis and directed assembly // J. Appl. Phys. – 2005. – Vol. 97. – P. 041301-1-041301-39.
9. [Электронный ресурс] URL: <http://www.factsage.com/>.
10. Агеев О.А., Золотарев Д.В., Климин В.С., Чердниченко Д.И. Изучение закономерностей роста углеродных нанотрубок при плазменно-химическом осаждении из газовой фазы // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 4 (117). – С. 61-68.
11. Marian A. Herman, Wolfgang Richter, Helmut Sitter Epitaxy. Physical Principles and Technical Implementation // Springer. – 2004. – P. 322.
12. Tretyakov Yu.D., Oleinikov N.N., Shlyakhtin O.A. Cryochemical Technology of Advanced Materials // London: Chapman & Hall. – 1997. – P. 72-126.
13. Агеев О.А., Ильин О.И., Коломийцев А.С., Коноплев Б.Г., Рубашкина М.В., Смирнов В.А., Федотов А.А. Определение геометрических параметров массива вертикально ориентированных углеродных нанотрубок методом атомно-силовой микроскопии // Нано- и микросистемная техника. – 2012. – № 3. – С. 9-13.
14. Агеев О.А., Блинов Ю.Ф., Ильин О.И. и др. Мемристорный эффект на пучках вертикально ориентированных углеродных нанотрубок при исследовании методом сканирующей туннельной микроскопии // Журнал технической физики. – 2013. – № 83 (12). – С. 128-133.
15. Агеев О.А., Ильин О.И., Коломийцев А.С., Коноплев Б.Г., Рубашкина М.В., Смирнов В.А., Федотов А.А. Разработка методики определения модуля юнга вертикально ориентированных углеродных нанотрубок методом наноиндентирования // Российские нанотехнологии. – 2012. – Т. 7, № 1. – С. 54-59.

REFERENCES

1. Ageev O.A., Syurik Yu.V., Klimin V.S., Fedotov A.A. Poluchenie nanokompozitnykh polimernykh materialov, modifitsirovannykh uglerodnymi nanostrukturami, na osnove NANOFAB NTK-9 [Obtaining nanocomposite polymeric materials, modified carbon nanostructures, based on the NANOFAB NTK-9], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 1 (90), pp. 135-142.
2. Li J., Lu Y., Ye Q., Cinke M., Han J., Meyyappan M. Carbon nanotube sensors for gas and organic vapor detection, *Nano Letters*, 2003, Vol. 3, pp. 929-933.
3. Ageev O.A., Syurik Yu.V., Kolomiitsev A.S., Sepbu N.I. Issledovanie vliyaniya kontsentratsii uglerodnykh nanotrubok na elektricheskoe soprotivlenie plenok polimernogo nanokompozita [To investigate the effect of concentration of carbon nanotubes on the electrical resistance of films of polymer nanocomposites nanocomposite], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem Technology], 2010, No. 10, pp. 2-6.
4. Ageev O.A., Il'in O.I., Klimin V.S., Kolomiitsev A.S., Fedotov A.A. Issledovanie rezhimov formirovaniya i modifikatsii orientirovannykh massivov uglerodnykh nanotrubok metodom PECVD na nanotekhnologicheskome komplekse NANOFAB NTK-9 [Research modes of the formation and modification oriented arrays of carbon nanotubes by pecvd on nanotechnological complex NANOFAB NTK-9], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 69-77.
5. Ageev O.A., Il'in O.I., Klimin V.S., Konoplev B.G., Fedotov A.A. Issledovanie rezhimov formirovaniya kataliticheskikh tsentrov dlya vyrashchivaniya orientirovannykh massivov uglerodnykh nanotrubok metodom PECVD [The study of modes of formation of the catalytic centers for the cultivation of oriented arrays of carbon nanotubes by PECVD method], *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2011, No. 2, Vol. 13, pp. 226-231.
6. Klimin V.S., Ageev O.A., Il'in O.I., Fedotov A.A. Issledovanie rezhimov polucheniya kataliticheskikh struktur iz plenki Ni dlya vyrashchivaniya uglerodnykh nanotrubok [The study of modes for the catalytic structures of the Ni film for growing carbon nanotubes], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 222-225.
7. Chhowalla M. Growth process conditions of vertically aligned carbon nanotubes using plasma enhanced chemical vapor deposition, *J. Appl. Phys.*, 2001, Vol. 90, No. 10, pp. 5308-5317.
8. Melechko A.V., Merkulov V.I., McKnight T.E., M.A. Guillorn, K.L. Klein, D.H. Lowndes, Simpson M.L. Vertically aligned carbon nanofibers and related structures: Controlled synthesis and directed assembly, *J. Appl. Phys.*, 2005, Vol. 97, pp. 041301-1-041301-39.
9. Available at: <http://www.factsage.com/>.
10. Ageev O.A., Zolotarev D.V., Klimin V.S., Cherednichenko D.I. Izuchenie zakonornostey rosta uglerodnykh nanotrubok pri plazmenno-khimicheskom osazhdenii iz gazovoy fazy [Studying of laws of carbon nanotubes growth during plazmenno-chemical sedimentation from the gas phase], *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 61-68.
11. Marian A. Herman, Wolfgang Richter, Helmut Sitter *Epitaxy*. Physical Principles and Technical Implementation, *Springer*, 2004, pp. 322.
12. Tretyakov Yu.D., Oleinikov N.N., Shlyakhtin O.A. Cryochemical Technology of Advanced Materials, *London: Chapman & Hall*, 1997, pp. 72-126.
13. Ageev O.A., Il'in O.I., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Fedotov A.A. Opredelenie geometricheskikh parametrov massiva vertikal'no orientirovannykh uglerodnykh nanotrubok metodom atomno-silovoy mikroskopii [Determination of geometrical parameters of the array of vertically oriented carbon nanotubes by atomic force microscopy], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem Technology], 2012, No. 3, pp. 9-13.
14. Ageev O.A., Blinov Yu.F., Il'in O.I. i dr. Memristornyy effekt na puchkakh vertikal'no orientirovannykh uglerodnykh nanotrubok pri issledovanii metodom skaniruyushchey tunnel'noy mikroskopii [Memristors effect on the beams vertically oriented carbon nanotubes in the study by scanning tunneling microscopy], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2013, No. 83 (12), pp. 128-133.

15. Ageev O.A., Il'in O.I., Kolomiytsev A.S., Konoplev B.G., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Fedotov A.A. Razrabotka metodiki opredeleniya modulya yunga vertikal'no orientirovannykh uglerodnykh nanotrubok metodom nanoindentirovaniya [Development of methods for determining young's modulus of vertically oriented carbon nanotubes by the nanoindentation method], *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian nanotechnology], 2012, Vol. 7, No. 1, pp. 54-59.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Лаврентьев.

Ильин Олег Игоревич – Южный федеральный университет; e-mail: oiilin@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е; тел.: +78634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирант.

Климин Виктор Сергеевич – e-mail: kliminvs@sfedu.ru; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; ассистент.

Рубашкина Марина Владимировна – e-mail: marubashkina@sfedu.ru; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирантка.

Сергиенко Константин Сергеевич – e-mail: konstantin_sergi@mail.ru; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; студент.

Семенов Алексей Сергеевич – e-mail: alexxxeyyy91@mail.ru; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; студент.

Федотов Александр Александрович – e-mail: aafedotov@sfedu.ru; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

Чинь Ван Мыой – e-mail: vmthcin@sfedu.ru; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирантка.

Яненко Владислав Юрьевич – e-mail: vlad_1995@list.ru; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; студент.

Ilin Oleg Igorevich – Southern Federal University; e-mail: oiilin@sfedu.ru; 2, Shevchenko street, build. E, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371611; the department of nanotechnologies and microsystems; postgraduate student.

Klimin Viktor Sergeevich – e-mail: kliminvs@sfedu.ru; department of nanotechnologies and microsystems; cand. of eng. sc.; assistant.

Rubashkina Marina Vladimirovna – e-mail: marubashkina@sfedu.ru; the department of nanotechnologies and microsystems; postgraduate student.

Sergienko Kostantin Sergeevich – e-mail: konstantin_sergi@mail.ru; the department of nanotechnologies and microsystems; student.

Semenov Alexey Sergeevich – e-mail: alexxxeyyy91@mail.ru, the department of nanotechnologies and microsystems; student.

Fedotov Alexander Aleksandrovich – e-mail: aafedotov@sfedu.ru; the department of nanotechnologies and microsystems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Thcin Van Myoi – e-mail: vmthcin@sfedu.ru; the department of nanotechnologies and microsystems; postgraduate student.

Yanenko Vladislav Yurevich – e-mail: vlad_1995@list.ru; the department of nanotechnologies and microsystems; student.