

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНВАРИАНТНЫХ МИКРО-НАНОТЕХНОЛОГИЙ СЕНСОРИКИ**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Существенным требованием к микро-нанотехнологиям является их инвариантность в условиях проявления дестабилизирующих факторов, определяющая как эффективность технологического цикла изготовления микро-наноприборов, так и характеристики качества готовой продукции [1]. Понятие «технологическая инвариантность» в контексте настоящей работы имеет смысл независимости одного из основных параметров анализируемого объекта — технологического процесса (комплекса микро-нанотехнологий) от изменения других его параметров или от влияния случайных внешних воздействий. Термин «микро-нанотехнология» определяет технологический процесс получения микро-наноприборов, например сенсорных микро-наносистем, как сложную динамическую систему (технологическую систему), в которой в единый комплекс объединены все ее технические элементы (значимые для нашего рассмотрения), вовлеченные в процесс изготовления указанных приборов.

**Концептуальный подход к проблеме моделирования инвариантных микро-нанотехнологий**

Микро-нанотехнология, рассматриваемая с позиций системного подхода, характеризуется следующими признаками: наличием иерархической структуры и сложной системой связей различной физической природы между элементами и подсистемами (в виде потоков вещества, энергии, информации), а также функционированием в условиях действия на технологический процесс разного рода внутренних и внешних возмущений. При таком подходе система «микро-нанотехнология» содержит следующую совокупность учитываемых нами наиболее важных подсистем: объект обработки или изготовления — микро-наноэлектронный или микро-наноэлектромеханический прибор, в частности сенсорную микро-наносистему; воздействующие физические факторы или технологическую среду, с использованием которых производится обработка; оборудование (устройство, установку, прибор) для проведения технологического процесса обработки.

Случайными отрицательно действующими на технологию факторами являются: нестабильность характеристик оборудования и параметров участвующих в обработке материалов и веществ; модификация объектов обработки и образование обратных связей с другими технологическими подсистемами; влияние внешней среды (изменение температуры, давления, влажности, внесение загрязняющих примесей). В качестве отрицательного фактора также рассматривается такое рассогласование электрофизических параметров элементов формируемых микро-наносистем при модификации технологии, которое существенно снижает качество получаемых готовых изделий.

Комплекс технологических процессов по получению изделий микро-наносенсорики представлен в виде «черного ящика» с контролируруемыми входными воздействиями  $X$ , неуправляемыми внешними возмущениями  $F$  и со значениями выходных параметров технологии обработки  $Y$ . При рассмотрении микро-нанотехнологии как объекта кибернетического моделирования и управления при ее структурировании применяется процедура экранирования возмущений, заключающаяся в том, что в модель управления вводится специальный блок (технологическая функция), маскирующий указанные возмущения. Изложенные выше представления о технологической инвариантности микро-нанотехнологий позволяют определить условия независимости выходной переменной  $Y$  от возмущающих влияний  $F$ , то есть «нечувствительности» параметра  $Y$  к отрицательному влиянию внешних факторов  $F$ .

Рассматриваемая кибернетическая модель инвариантных микро-нанотехнологий состоит из двух функционально и структурно обособленных технологических модулей (процессов): инварианта и адаптера (рис. 1). Инвариант представляет собой комплекс основных технологических операций получения сенсорного устройства, а адаптер реализует дополнительные технологические функции по экранированию воздействующих отрицательных факторов (случайных возмущений). При введении в систему управления адаптера в нем по величине  $F$  устанавливается определенная добавка  $Z$  к входным параметрам, которая, в свою очередь, воздействует на технологию

ский процесс таким образом, что изменение выходной переменной  $\Delta Y(Z)$  экранирует возмущения  $\Delta Y(F)$ , реализуя условие инвариантности технологии. Более того, комплексное влияние  $Z$  на технологический цикл приводит к повышению положительных качеств технологии и выходных характеристик изделия. В результате, несмотря на постоянные изменения потока случайных возмущений, технологический цикл находится в заданном состоянии высокого качества (эффективности).

Следует особо подчеркнуть, что свойство инвариантности микро-нанотехнологий сенсорики в принятой нами интерпретации не предполагает прямой компенсации возмущающего воздействия  $+F$  противоположным действием  $-F$ . Введение компенсации возможно, по-видимому, в случае, когда отдельные подсистемы рассматриваемого процесса, например производства [2], не имеют жесткой связи между собой и компенсирующие операции не затрагивают всю анализируемую систему. Напротив, в микро-наносенсорике обеспечение технологической инвариантности приводит к модификации всего технологического цикла и изменению его характеристик. В связи с этим выбор модифицирующих факторов микро-нанотехнологии производится с учетом как свойства ее инвариантности, так и достижения высоких итоговых параметров, например высоких параметров готового изделия.

В соответствии с принятой в данной работе структурой технологической системы методы реализации свойства инвариантности (маскирования отрицательно действующего фактора) будут соответствовать основным подсистемам микро-нанотехнологии:

• конструктивно-технологический (за счет выбора определенных конструктивных решений изготавливаемого прибора, например его схемы, структуры, топологии; за счет выбора нетрадиционных информативных параметров прибора, менее подверженных влиянию или маскирующим влиянием возмущений);

• физико-технологический (путем использования новых физико-химических явлений при дополнительном энергетическом воздействии различной физической природы: акустическом, оптическом, плазменном, микроволновом; путем дополнительного вовлечения в физико-химические процессы в зоне обработки нового материала или вещества в виде поверхностной пленки, газовой среды, слоя жидкости, легирующей добавки);

• инструментально-технологический (за счет модификации, реконструкции или модернизации технологического оборудования на схемном или конструктивном уровне; за счет выбора определенного технологического инструментария (методов обработки и режимов функционирования оборудования)).

В процессах изготовления достаточно сложных сенсорных систем, технологические циклы получения которых содержат значительное число операций, структура инвариантной технологии является многомерной, имеет вид многоуровневой рекурсивной иерархии. Кибернетическое моделирование такой технологии позволяет проектировать технологические процессы, в которых чрезмерная структурная и ресурсная избыточность всего технологического цикла изготовления сенсорного изделия локализована в пределах адаптирующего компонента самого нижнего уровня, и тем самым уменьшить сложность технологии, снизить стоимость готовых изделий.

Таким образом, достижение инвариантности микро-нанотехнологии вполне можно рассматривать как процесс ее внутренней самоподстройки (однократной, статической или непрерывной, динамической) путем привлечения внутренних возможностей, ресурсов системы, заложенных, предусмотренных на этапе ее проектирования. Поиск таких ресурсов, внутренних механизмов и создание инвариантности при разработке микро-нанотехнологий может проводиться, например, на следующих уровнях: элементном, структурном, функциональном, параметрическом, генетическом. Данные кибернетические модели целесообразно использовать для компьютерного моделирования и анализа эффективности технологических процессов сенсорной техники, поиска направлений модернизации промышленных технологий.

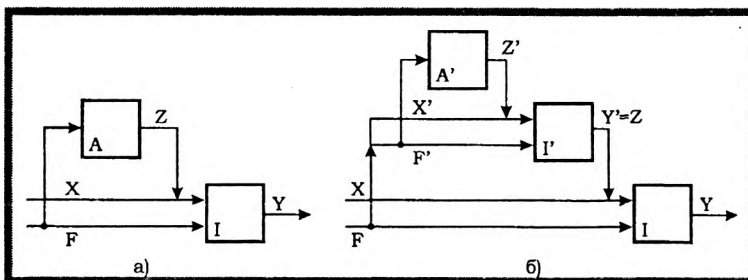


Рис.1. Структура модели инвариантных микротехнологий с минимальным уровнем иерархии (а) и имеющая вид многоуровневой рекурсивной иерархии (б):  $I$  — инвариант;  $A$  — адаптер.

## Технологическая инвариантность процесса формирования туннельных сенсорных наноструктур

Специфической проблемой для туннельных МДМ-наноструктур (металл-диэлектрик-металл), определяющей точность сенсорного контроля, является уменьшение отношения между величинами электрического сопротивления металлических электродов и расположенного между ними сверхтонкого диэлектрика [3]. Значимость данной проблемы возрастает с повышением степени микроминиатюризации сенсорных приборов, в частности, с уменьшением толщины пленок в конструкции МДМ-наноструктур. Так, снижение толщины металлической пленки приводит к увеличению ее сопротивления, в то время как уменьшение толщины пленки диэлектрика (для достижения туннельного характера проводимости) связано с повышением ее электропроводности, что затрудняет достижение требуемого соотношения между указанными сопротивлениями.

Моделирование токопереноса в туннельных МДМ-наноструктурах показало, что при толщинах диэлектрических пленок менее  $\sim 10$  нм их проводимость определяется несколькими механизмами переноса заряда, причем она существенно увеличивается с ростом напряжения и температуры [4, 5]. Например, увеличение напряжения на электродах приводит к деформации потенциального барьера в МДМ-наноструктуре от прямоугольного к трапецидальному и к подключению механизма проводимости Фаулера–Нордгейма (дополнительно к прямому туннелированию). Увеличение температуры даже до 293 К включает процессы термостимулированной эмиссии электронов через потенциальный барьер по механизму Шоттки–Ричардсона и Пула–Френкеля.

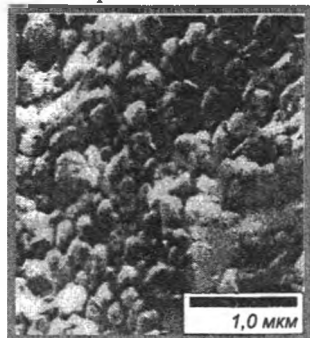
Математическое моделирование вольт-амперной зависимости, характерной для туннельной МДМ-наноструктуры, позволило определить отношение экспериментально измеряемого сопротивления между ее электродами  $R_m$  и истинного сопротивления туннельного перехода  $R_T$ :  $R_m / R_T = \eta \operatorname{ch} \eta / \operatorname{sh} \eta - \eta^2$ , где  $R_m = V_m / I_m$ ;  $V_m$ ,  $I_m$  — напряжение на МДМ-наноструктуре и ток вдоль электродов, измеряемые, например, четырехзондовым методом;  $\eta = (R_F / 2R_T)^{1/2}$ ,  $R_F$  — полное сопротивление тонкопленочных электродов [6]. Как следует из анализа данного выражения, экспериментально измеряемое сопротивление равно истинному сопротивлению туннельного перехода только до тех пор, пока выполняется соотношение  $R_F \ll R_T$ .

При значительном уменьшении сопротивления тонкой диэлектрической пленки может наблюдаться  $R_F > R_T$ , что приведет к существенной погрешности измерения параметров МДМ-наноструктуры и снижению точности контроля влияния внешних воздействий на ее характеристики. Достижение инвариантности параметров МДМ-наноструктур относительно соотношения сопротивлений диэлектрической пленки и электродов возможно при  $R_F \rightarrow 0$ , что происходит при использовании сверхпроводящих электродов. В связи с этим исследовали процесс получения тонких пленок из материалов, обладающих высокотемпературной сверхпроводимостью (ВТСП), и моделировали влияние сверхпроводящих электродов на характеристики наноструктур сверхпроводник–диэлектрик–металл и сверхпроводник–диэлектрик–сверхпроводник.

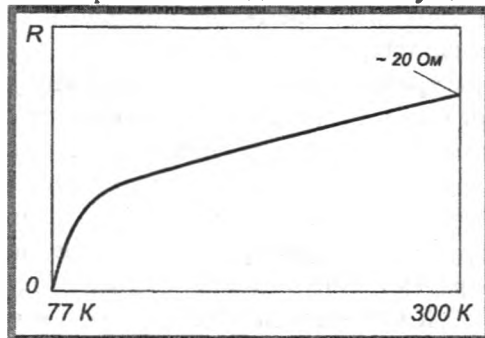
Тонкие пленки сверхпроводника получали методом высокочастотного магнетронного распыления мишеней из фторидов элементов, входящих в состав ВТСП-пленок [7–9]. Изготавливались мишени диаметром 93 мм и толщиной 3 мм из смеси порошков  $\text{YF}_3 + \text{BaF}_2 + \text{Cu}$  в пропорции, обеспечивающей соотношение элементов  $\text{Y} : \text{Ba} : \text{Cu} = 1 : 2 : 3$ ;  $1,0 : 2,2 : 3,3$ ;  $1,0 : 2,8 : 3,3$ . Смеси порошков предварительно измельчали и гомогенизировали с помощью планетарной шаровой мельницы с халцедоновыми размольными шарами в течение 6–8 часов в гексане при скорости вращения 340 об/мин. Прессовались мишени методом импульсного нагружения с помощью взрывчатого вещества, в качестве которого использовался аммонит 6ЖВ (21% TNT + 79%  $\text{NH}_3\text{NO}_2$ ). Давление и скорость детонации варьировались в пределах соответственно 2–4 ГПа и  $2 \cdot 10^3$  м/с за счет изменения высоты заряда взрывчатого вещества.

Рентгенофазный анализ смесей  $\text{YF}_3 + \text{BaF}_2 + \text{Cu}$  до и после импульсного прессования показал, что их фазовый состав в процессе получения мишени практически не изменяется. Из-за напряженного состояния смеси фторидов после взрывного нагружения происходит некоторое уширение всех дифракционных максимумов, интенсивность пиков несколько уменьшается, но отношения ширины на полувысоте разных максимумов изменяются слабо. Это свидетельствует об увеличении дефектной структуры материала в процессе импульсного нагружения, в то же время отсутствие каких-либо дополнительных линий на дифрактограмме говорит о том, что новые фазы в материале мишени не образуются.

Распыление мишеней из фторидных соединений проводили высокочастотным магнетронным методом в среде аргона при давлении 0,13–2,66 Па и мощности колебаний 50–150 Вт. В качестве подложек использовали пластины титаната стронция, поликора, ниобата лития, кремния. Для предотвращения взаимодействия материалов подложки и ВТСП-пленки на поверхность подложки наносили подслои двуокиси циркония, серебра или золота. Длительность процесса осаждения пленки составляла 30 мин, толщина пленки достигала 200–300 нм. Процесс отжига пленки и формирования сверхпроводящей фазы проводили в среде азота с парами воды, для чего азот пропускали через объем кипящей дистиллированной воды. Отжиг осуществляли в течение 15–30 мин при



а)



б)

Рис. 2. Структура поверхности (а) и зависимость сопротивления  $\text{YBaCuO}$  пленок от температуры (б) (подложка из поликора, подслой золота).

температуре 1023 К., охлаждение образцов проводилось в течение 10 мин в проточном кислороде. Структура поверхности формируемых ВТСП-пленок и зависимость их сопротивления от температуры показана на рис. 2.

Аналитические выражения для моделирования вольт-амперных зависимостей туннельного контакта сверхпроводник–диэлектрик–металл включают параметры исходных материалов электродов (метал-

ла и сверхпроводника) и потенциального барьера, образованного промежуточным диэлектрическим слоем. Вольт-амперная характеристика данной наноструктуры учитывает (через параметр нелинейности) зависимость тока как от напряжения и температуры, так и от ширины энергетической щели сверхпроводника.

#### Технологическая инвариантность сенсорных наноструктур на поверхностных акустических волнах

В сенсорных наноструктурах на поверхностных акустических волнах (ПАВ) энергия волн локализована в поверхностном слое звукопровода, толщина которого соизмерима с длиной волны. Это обуславливает возможность управления характеристиками ПАВ путем нанесения на поверхность звукопровода тонких пленок с отличными от материала звукопровода акустомеханическими и электрофизическими свойствами [10]. Решение задачи формирования инвариантных сенсорных систем на поверхностных акустических волнах достигается использованием тонких диэлектрических пленок, свойства которых выбираются с точки зрения реализации эффекта инвариантности контроля.

Резонансные ПАВ-наноструктуры для контроля давления формировались на звукопроводе из монокристаллического кварца  $\text{Y}$ -среза, при этом направление распространения поверхностных акустических волн выбиралось вдоль оси  $X$  кварца. Для повышения чувствительности сенсора к изменению давления звукопровод ПАВ-наноструктуры выполнялся в виде тонкой диафрагмы, внутренняя сторона которой подвергалась контролируемому воздействию, а по внешней ее стороне распространялись поверхностные акустические волны. Возбуждение и детектирование ПАВ осуществлялось с помощью идентичных аподизованных встречно-штыревых преобразователей, рассчитанных на длину волны  $3,2 \cdot 10^{-5}$  м. Система распределенных отражателей ПАВ-наноструктуры выполнялась в виде двух сформированных на поверхности звукопровода решеток из 600 полосок алюминия (или канавок) в каждой, толщина (глубина) которых, нормированная относительно длины волны, составляла  $1,25 \cdot 10^{-2}$ . Резонансная частота полученной ПАВ-наноструктуры находилась вблизи  $\sim 98,3$  МГц, эффективная добротность в 50-омном электрическом тракте равнялась  $(1,4-1,8) \cdot 10^4$ , величина вносимых потерь на резонансной частоте составляла 5,5–7,5 дБ.

В качестве элементов сенсорной системы, обеспечивающих инвариантность контроля, использовались тонкие пленки фторидов редкоземельных элементов (РЗЭ), нанесенные на поверхность звукопровода ПАВ-наноструктуры. Тонкие пленки формировались путем термического испарения фторидов редкоземельных элементов иттриевой подгруппы в вакууме, температура звукопровода в процессе осаждения пленок составляла 470 К. С целью проведения сравнительных

исследований формировались также тонкие пленки нитрида алюминия, оксида алюминия и оксида цинка, традиционно используемые для модификации ПАВ-наноструктур. Тонкие пленки AlN и ZnO осаждались на поверхность звукопровода методом магнетронного распыления на постоянном токе мишени из алюминия или цинка в газовой среде, содержащей соответственно азот или кислород; тонкие пленки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> наносились электронно-лучевым испарением. С использованием электронографических методов исследования было установлено, что осаждаемые тонкие пленки фторидов РЗЭ и нитрида алюминия аморфные, а пленки оксида цинка — поликристаллические.

Формирование тонкой пленки на поверхности звукопровода приводит к сдвигу резонансной частоты ПАВ-наноструктуры, что обусловлено, в частности, изменением скорости распространения поверхностных акустических волн в полученной системе пленка-подложка. Кроме этого, нанесение тонкой пленки существенно влияет на характер и величину температурной зависимости резонансной частоты ПАВ-наноструктуры, а также на зависимость резонансной частоты от величины механической деформации звукопровода. Для экспериментального определения вышеуказанных зависимостей ПАВ-наноструктура включалась в цепь обратной связи широкополосного высокочастотного усилителя и измерялась рабочая частота сформированного таким образом ПАВ-генератора, равная резонансной частоте ПАВ-наноструктуры.

Рабочая частота полученного генератора зависит, в частности, от температуры  $T$  и давления  $P$  внешней среды следующим образом:  $f(T,P) = n/\tau(T,P) = n\nu(T,P)/l(T,P)$ , где  $n$  — коэффициент, характеризующий выбранную моду колебаний;  $\tau(T,P)$  — время задержки поверхностных акустических волн;  $l(T,P)$ ,  $\nu(T,P)$  — соответственно длина пути и скорость распространения поверхностных акустических волн. Таким образом, в качестве основного термоэффекта в ПАВ-наноструктурах рассматривается температурная зависимость временной задержки поверхностных акустических волн, обусловленная влиянием температуры на скорость распространения ПАВ и коэффициент линейного расширения материала звукопровода. В свою очередь, значительная величина температурного коэффициента временной задержки является причиной температурного дрейфа резонансной частоты ПАВ-наноструктуры. За счет снижения зависимости рабочей частоты ПАВ-генератора от температуры обеспечивается инвариантность контроля давления сенсорной ПАВ-наноструктурой.

Характер влияния тонких пленок на температурную зависимость параметров ПАВ-наноструктуры оценивался по величине относительного значения температурного коэффициента частоты  $\Delta k^T/k_0^T = (k^T - k_0^T)/k_0^T$ , где  $k_0^T$  — температурный коэффициент частоты исходной ПАВ-наноструктуры (без пленки на поверхности звукопровода;  $h = 0$ ). Величина  $k^T$  в данном случае определяется как нормированное изменение резонансной частоты ПАВ-наноструктуры в диапазоне температур 233–323 К:  $k^T = (f^{T_1} - f^{T_2})/\Delta T$ , где  $T_1 = 323$  К;  $T_2 = 233$  К;  $\Delta T = 90$  град.

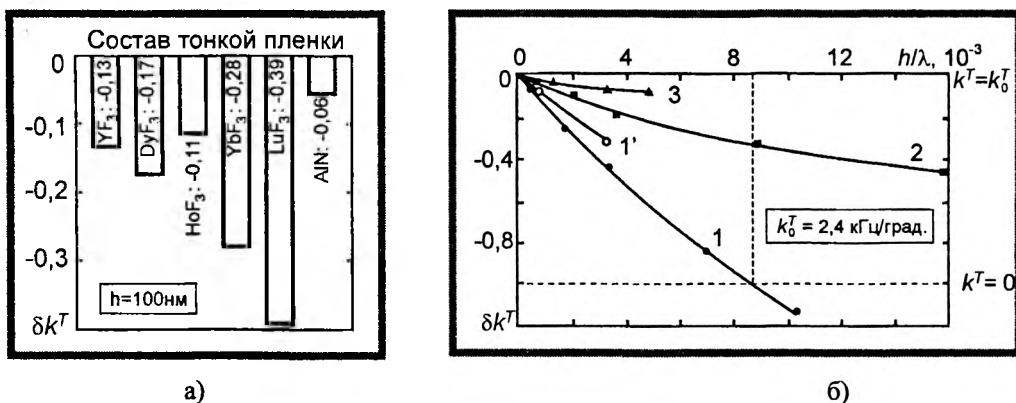


Рис. 3. Зависимость  $\Delta k^T$  ПАВ-наноструктуры от состава (а) и толщины (б) тонких пленок фторидов РЗЭ: 1, 1' — LuF<sub>3</sub>; 2 — HoF<sub>3</sub>; 3 — AlN; 1–3 — скорость осаждения 1,8 нм/с; 1' — 0,51 нм/с.

На рис. 3 представлены зависимости относительного значения температурного коэффициента частоты  $\Delta k^T$  от нормированной толщины тонких пленок  $h/\lambda$  на поверхности звукопровода. Анализ полученных зависимостей показал, что формирование тонких пленок фторидов РЗЭ приводит к снижению температурного коэффициента частоты, причем положительный эффект в данном случае значительно выше, чем при использовании пленок нитрида алюминия, традиционно применяемых с целью модификации ПАВ-наноструктур. Особо следует отметить, что при нормированной толщине тонкой пленки фторида лютеция  $h/\lambda \approx 8,7 \cdot 10^{-3}$  значение  $\Delta k^T = -1$ , то есть в диа-

пазоне  $T = 233\text{--}323$  К рабочая частота ПАВ-генератора не зависит от температуры. Таким образом, нанесение тонких пленок фторидов РЗЭ на поверхность звукопровода ПАВ-наноструктуры является эффективным способом достижения технологической инвариантности сенсорных систем для контроля давления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко В. М., Гулай А. В. Инвариантность микротехнологий // *Машиностроение* — 2005. — Вып. 21, т. 1. — С. 225–233.
2. Свирский Д. Н. Кибернетическое моделирование компактного производства в процессе его организации // *Наука и технологии на рубеже XXI века: Материалы Международной научно-технической конференции.* — Мн.: УП «Технопринт», 2000. — С. 594–596.
3. Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А. Технологическая инвариантность туннельных сенсорных МДМ-наноструктур // *Сборник докладов международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ-2007)»*, 23–26 октября 2007 г., Минск. — Т. 2. — С. 159–161.
4. Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А. Моделирование токопереноса в туннельных сенсорных МДМ-наноструктурах // *Машиностроение* — 2007. — Вып. 23. — С. 332–336.
5. Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А. Туннельные МДМ-наносенсоры: стратегии и технологии моделирования // *Нано- и микросистемная техника.* — 2007. — № 9. — С. 46–52.
6. Живер И. Туннельный переход в системе металл–изолятор–металл // *Туннельные явления в твердых телах.* — М.: Мир, 1973. — С. 25–35.
7. Колешко В. М., Гулай А. В. и др. Способ получения мишеней для осаждения ВТСП-пленок // Патент РФ № 2064717. Оpubл. 27.07.1996 г., бюлл. № 21.
8. Колешко В. М., Гулай А. В. и др. Распыляемые мишени из фторидных соединений для получения тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников // *Письма в Журнал технической физики* — 2006. — Т. 32 № 4. — С. 45–50.
9. Koleshko V. M., Gulay A. V., et al. Fluoride Compound Targets for the Sputter Deposition of Thin Films of High- $T_c$  Superconductors // *Technical Physics Letters* — 2006. — Vol. 32, № 2. — P. 158–160.
10. Колешко В. М. и др. Микроэлектронные преобразователи информации на поверхностных акустических волнах // *Зарубежная электронная техника.* — 1985. — № 9. — 116 с.

УДК 05.06.07.12

*Чигарев А.В., Мальцев А.Г., Мальцев И.А.*

## ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОТРУБОК ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Как известно, общепринятого механизма формирования нанотрубок в настоящее время не существует. Форма трубок достаточно разнообразна, что может свидетельствовать о взаимодействии нескольких механизмов [1]. Особого внимания заслуживает информация о существовании оптимальных режимов образования нанотрубок в зависимости от условия горения дуги с графитовыми электродами [1]. Максимальный выход нанотрубок зафиксирован при минимально возможном токе дуги, необходимом для ее стабильного горения [1], что достигается поддержанием межэлектродного расстояния на фиксированном уровне и эффективной системой отвода тепла от электродов. При этих условиях до 90% всей массы углерода, распыленной с анода осаждается на катоде в виде сложной пространственной структуры [1], имеющий форму цилиндра и состоящего из серого стержня, покрытого черным кольцом, окруженным серой оболочкой. Черное кольцо содержит множество нанотрубок различного диаметра и длиной в десятки микрометров. В катодном осадке содержатся также наночастицы, имеющих формы многогранников и других фигур.

По сравнению с методом термического распыления графитового электрода в плазме дугового разряда метод лазерного распыления обладает рядом особенностей, которые при определенных условиях позволяют получить нанотрубки более высокого качества за счет лучшей управляемости процесса. При использовании в качестве мишени композита, представляющего собой стержень спеченный из смеси Co/Ni выход высококачественных однослойных длинных нанотрубок достигал 50%, а при облучении двумя лазерами с различными длинами волн – 90%. [1]