



Е.М. Руденко¹, І.В. Короташ¹, В.Ф. Семенюк¹, К.П. Шамрай²

¹ Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, Київ

² Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

УСТАНОВКА ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНОГО ІОННО-ПЛАЗМОВОГО ФОРМУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБОК В ЄДИНОМУ ВАКУУМНО-ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ЦИКЛІ



Створена установка для іонно-плазмового формування вуглецевих нанотрубок та інших наноструктур. Установка містить високовакуумну систему відкачки, систему напуску робочих газів, камеру геліконного розряду, камеру дрейфа, вакуумно-дугове джерело, джерело живлення та систему контролю з малогабаритним оптичним спектрометром. Установка інтегрує процеси плазмово-стимульованого хімічного парофазного осадження, очищення та активації поверхні підкладки у плазмі розряду, нанесення перехідних адгезійних шарів та шарів металу-каталізатора, а також процес безпосереднього формування вуглецевих наноструктур.

Ключові слова: вакуумно-технологічне обладнання, іонно-плазмові технології, геліконне джерело, вакуумно-дугове джерело, вуглецеві нанотрубки.

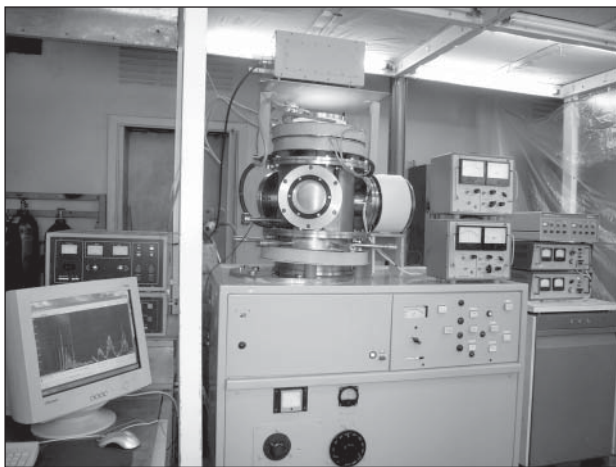
Глобальна інформатизація суспільства вже сьогодні вимагає створення принципово нового покоління комп'ютерних систем, здатних обробляти гігантські масиви інформації. Існуючі комп'ютерні системи на основі класичних напівпровідникових технологій практично досягли межі своїх можливостей за швидкодією, мікромініатюризацією та енергетичною сумісністю. Майбутнє – за новим поколінням систем обробки інформації, серед яких важливе місце займає створення квантового комп'ютера. Принципово нова елементна база цього комп'ютера ґрунтується на новітніх досягненнях нанофізики та наноелектроніки, серед яких слід назвати надійні та надшвидкодійні одноелектронні транзистори, різного типу пристрої, що реалізують q -біт, та ін. [1].

Серед нових принципів та підходів до створення елементної бази особливе місце нале-

жить квазіодновимірним структурам — вуглецевим нанотрубкам (ВНТ) [1]. В порівнянні зі звичайними матеріалами ВНТ мають унікальні фізичні та хімічні властивості. Зокрема, у ВНТ густина струму приблизно у 20 разів, а теплопровідність у 10–20 разів більша, ніж у кремнію та міді. Рухливість носіїв струму у ВНТ також значно більша, ніж в згаданих матеріалів. ВНТ мають високу пружність. Отже, ВНТ є найкращим матеріалом для міжшарових з'єднань і провідників. Електричні характеристики ВНТ за певними ознаками близькі до характеристики напівпровідників, тобто при використанні ВНТ в базових елементах, де потрібна дуже висока швидкодія, можуть бути досягнуті надзвичайно високі технічні характеристики.

Таким чином, створення технологій, які дають можливість отримувати високоякісні ВНТ з наперед заданими і контрольованими параметрами та просторово орієнтовані структури на підкладках надвеликих інтегральних схем,





Установка для прецизійного іонно-плазмового формування вуглецевих нанотрубок в єдиному вакуумно-технологічному циклі

відкриє шлях до створення принципово нової елементної бази нового класу комп'ютерних систем, зокрема квантового комп'ютера.

Проведені дослідження по використанню ВНТ як автоемісійних джерел електронів та тепловідводів. Досліджується використання ВНТ при створенні джерел постійного струму, каталізаторів, композитних матеріалів. Все це свідчить про велику потребу в якісних ВНТ в різних галузях науки і техніки як для проведення наукових досліджень, так і для розробки принципово нових типів приладів і технологій.

Сьогодні в світі проводяться інтенсивні наукові пошукові розробки щодо різноманітного використання ВНТ, фінансуються національні і міжнародні програми. Та основною проблемою наразі, як зазначалося, є створення якісних технологій та відповідного високотехнологічного обладнання. Нині на ринку вакуумно-технологічного обладнання для хімічного парофазного осадження багат шарових ВНТ на підкладки діаметром до 100 мм представлена установка CN-CVD-400, діаметром до 25 мм — CN-CVD-100 японської фірми ULVAC. Як відомо, фірма ULVAC веде інтенсивні роботи по створенню обладнання для формування одно- та двошарових ВНТ. Але у запропонованому на міжнародному ринку технологічному облад-

нанні (в основному, компаніями ULVAC (Японія), OXFORD INSTRUMENTS (Великобританія)) закладені відносно застарілі фізико-технологічні принципи, що ускладнює і навіть унеможливує вирішення зазначених вище проблем. Для нової елементної бази необхідні багатофункціональні блоки та вузли, які повинні містити десятки і навіть сотні тисяч елементів на кристалі, щоб виконувати гігантські масиви логічних операцій. Існуюче технологічне обладнання не може вирішити вказані завдання.

Специфіка перспективного використання ВНТ у наноелектроніці пов'язана з тим, що вони повинні бути сформовані при виготовленні відповідного приладу в заданому місці з заданою просторовою орієнтацією. Крім того, ці наноструктури повинні мати високу адгезію до попередніх функціональних шарів, зокрема до шару металу-каталізатора. При цьому процес формування ВНТ повинен бути технологічно сумісним з відповідними вакуумними процесами створення інших активних і пасивних шарів нанорозмірного електронного приладу. В зв'язку з цим серед відомих методів створення вуглецевих нанотрубок для вирішення завдань наноелектроніки практичне значення мають вакуумні плазмові технології.

Із проведеного аналізу проблем випливає, що на сьогодні найбільш перспективними вакуумними плазмовими методами цілеспрямованого формування ВНТ є технології хімічного парофазного осадження (CVD-процеси), а також вакуумно-дугового нанесення різноманітних функціональних плівок. Фізичні дослідження та науково-технічні розробки, виконані в наукових підрозділах НАН України, та наукові розробки, проведені в галузі інтегральної електроніки, дали можливість авторам проекту розробити концепцію та створити вакуумно-технологічну установку, яка забезпечує формування в єдиному вакуумному циклі вуглецевих нанотрубок з заданими характеристиками, а також інших наноструктур. В результаті виконання інноваційного проекту була розроб-

лена та виготовлена установка для іонно-плазмового формування вуглецевих нанотрубок в єдиному вакуумно-технологічному циклі. На рисунку показана працююча установка, що виконує певний технологічний процес. В установці закладені передові фізичні принципи для вирішення нагальних та перспективних задач створення технологій майбутнього на основі ВНТ та інших наноструктур. Це обладнання може також бути основою для розробки комплексних технологічних лінійок, що можуть бути використані як у науково-дослідних установах, так і в масштабному промисловому виробництві.

В основу створеної установки закладено використання передових технологій іонно-плазмового нанесення прецизійних плівок на базі нових високоефективних джерел потоків плазми [2] — геліконних та вакуумно-дугових джерел, які були створені, модернізовані та досліджені в процесі виконання проекту. Проведені нами розробки засвідчили можливість ефективної роботи геліконного ВЧ-розряду при робочих тисках до 100 Па, які звичайно використовуються в CVD-процесах. При цьому густина плазми та ступінь дисоціації робочих газів на один-два порядки перевищують відповідні значення для відомих традиційних розрядних систем [3]. Конструктивно установка включає в себе високовакуумну систему відкачки, систему напуску робочих газів, камеру геліконного розряду, камеру дрейфа, вакуумно-дугове джерело, електрод-утримувач підкладок, відповідні джерела живлення та систему контролю з малогабаритним оптичним спектрометром.

Установка інтегрує в собі процеси плазмово-стимульованого хімічного парофазного осадження, попереднє та міжопераційне очищення та активацію поверхні підкладки, нанесення перехідних адгезійних шарів та шарів металу-каталізатора, процес безпосереднього формування вуглецевих наноструктур. Фізичні характеристики плазмових потоків, які генеруються іонно-плазмовими джерелами в реакторній камері установки, та інтеграція в

єдиному вакуумному циклі зазначених вище процесів дають можливість формувати вуглецеві наноструктури із заданою просторовою орієнтацією.

Вакуумно-технологічне обладнання, яке уже створено і яке може бути створено при подальших розробках за результатами виконання цього проекту, знайде широке застосування не тільки в Україні, але матиме значний попит на зовнішніх ринках, а при подальшій інтеграції в міжнародний ринок розподілу праці і кооперації забезпечить передові позиції України в галузі високотехнологічного обладнання та технологій при певній монополії на інтелектуальну власність. Використання результатів проекту на підприємствах і науково-дослідних установах в Україні і для міжнародних виробників інтегральної електроніки і наноприладів або спільний випуск створеного вакуумно-плазмового обладнання з провідними виробниками технологічного вакуумного обладнання вбачається перспективним.

Перевагами створеної за проектом установки є можливість контрольованого синтезу ВНТ з наперед заданими і контрольованими параметрами, що є необхідною умовою створення новітньої технологічної бази інтегральної електроніки і наноприладів нового покоління. У створеній установці густина плазми та ступінь дисоціації робочих газів на один-два порядки перевищують відповідні значення для відомих традиційних розрядних систем [3], що дало можливість суттєво підняти ефективність технологічного процесу та забезпечити істотне зменшення енергоспоживання. Технологічне вакуумне обладнання з функціональними можливостями створеної установки на міжнародному ринку високотехнологічної продукції сьогодні відсутнє.

Результати проекту впроваджено у ВАТ «Науково-виробниче підприємство «Сатурн»».

ЛІТЕРАТУРА

1. *Нанотехнології в електроніці* / Под ред. Ю. А. Чапльгіна. — М.: Техносфера, 2005. — 448 с.
2. *Shinohara S., Shamrai K.P. Effect of electrostatic waves on a rf field penetration into highly collisional helicon*

plasmas // Thin Solid Films. – 2002. – V. 407. – № 1–2. – P. 215–220.

3. *Кралькина Е.А.* Индуктивный высокочастотный разряд низкого давления и возможности оптимизации источников плазмы на его основе // УФН. – 2008. – Т. 178. – № 5. – С. 519–540.

*Э.М. Руденко,
И.В. Короташ, В.Ф. Семенов, К.П. Шамрай*

УСТАНОВКА ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО
ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ФОРМИРОВАНИЯ
УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В ЕДИНОМ
ВАКУУМНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ

Создана установка для ионно-плазменного формирования углеродных нанотрубок и других наноструктур. Установка содержит высоковакуумную систему откачки, систему напуска рабочих газов, камеру геликонного разряда, камеру дрейфа, вакуумно-дуговые источники, источники питания и систему контроля с малогабаритным оптическим спектрометром. Установка интегрирует процессы плазменно-стимулированного химического парофазного осаждения, очистки и активации поверхности подложки в плазме разряда, нанесения переходных адгезионных слоев и металла-катализатора, а также процесс непосредственного формирования углеродных наноструктур.

Ключевые слова: вакуумно-технологическое оборудование, ионно-плазменные технологии, геликонный источник, вакуумно-дуговой источник, углеродные нанотрубки.

*E.M. Rudenko,
I.V. Korotash, V.F. Semenyuk, K.P. Shamrai*

PLANT FOR PRECISION IONIC-PLASMA
FORMATION OF CARBON NANOTUBES IN THE
UNITED VACUUM-TECHNOLOGICAL CYCLE

The plant for ionic-plasma formation carbon nanotubes and other nanostructures is created. The plant contains high-vacuum-pump system, working gases letting system, helicon discharge chamber, drift chamber, vacuum-arc sources, power sources and monitoring system with a small-sized optical spectrometer. The plant integrates processes plasma-enhanced chemical vapour-phase deposition, plasma clearing and activation of a substrate surface, deposition of transitive adhesive layers and metal-catalyst, direct formation process of carbon nanostructure.

Key words: vacuum plant, ionic-plasma technologies, helicon source, vacuum-arc source, carbon nanotube.

Надійшла до редакції 03.03.09.