

УДК 001.89: 539.2 (621.382.132)

**О.А. Агеев, А.С. Коломийцев, А.В. Михайличенко, В.А. Смирнов,
В.В. Пташник, М.С. Солодовник, А.А. Федотов, Е.Г. Замбург, В.С. Климин,
О.И. Ильин, А.Л. Громов, А.В. Рукомойкин**

**ПОЛУЧЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ
НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НАНОФАБ НТК-9***

Представлены результаты экспериментальных исследований режимов изготовления структур нанoeлектроники и наносистемной техники на основе использования автоматизированной платформы кластерного типа НАНОФАБ НТК-9. Проведены экспериментальные исследования по формированию микрожидкосных ячеек и элементов нанofлюидики методом ионно-лучевого травления. Проведено травление микролинзовых структур. Сформированы тонкие пленки оксидов ванадия и цинка и исследованы их свойства. Проведен рост ориентированных массивов гибридных углеродных наноструктур.

Нанотехнологии; фокусированные ионные пучки; атомно-силовая микроскопия; импульсное лазерное осаждение; углеродные нанотрубки.

**O.A. Ageev, A.S. Kolomytsev, A.V. Mikhaylichenko, V.A. Smirnov, V.V. Ptashnik,
M.S. Solodovnik, A.A. Fedotov, E.G. Zamburg, V.S. Klimin, O.I. Ilin,
A.L. Gromov, A.V. Rukomoykin**

**NANOSCALE STRUCTURES' PRODUCTION BASED ON MODULAR
NANOTECHNOLOGICAL PLATFORM NANOFAB**

The idea is to present the results of production methods of nanoelectronics' materials and structures and nanosystems' technique based on the cluster type automatic platform NANOFAB NTK-9. Experimental research of micro- and nanofluidics systems using focused ion beam milling. Milling of microlenses structures. Vanadium and Zinc oxide thin film deposition and their properties researching. Growing aligned arrays of hybrid carbon nanostructures.

Nanotechnology; focused ion beams; atomic forces microscopy; pulsed laser deposition; carbon nanotubes.

Развитие технологии микро- и нанoeлектроники связано с совершенствованием приборно-аппаратной базы. В настоящее время наиболее перспективными методами формирования наноразмерных структур являются методы сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), фокусированных ионных пучков (ФИП), плазмо-химического осаждения из газовой фазы (ГФПХО), метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), метод импульсного лазерного осаждения (ИЛО) и др. [1-3].

Базовым комплексом, позволяющим в едином технологическом цикле объединять данные методы, является многофункциональный сверхвысоковакуумный нанотехнологический комплекс НАНОФАБ (ЗАО "Нанотехнология МДТ", г. Зеленоград), состоящий из сверхвысоковакуумных (СВВ) технологических модулей, объединенных в кластеры посредством СВВ транспортной координатно-связанной системы. Конструкция НАНОФАБ позволяет использовать в технологическом процессе пластины диаметром до 100 мм.

Отличительной особенностью нанотехнологического комплекса НАНОФАБ является модульность конструкции и возможность объединения технологических и аналитических модулей в едином сверхвысоковакуумном производственном цикле.

Нанотехнологический комплекс НАНОФАБ НТК-9, эксплуатируемый на кафедре технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры ТТИ ЮФУ, состоит из

* Работа выполняется в рамках проведения НИР по ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

кластера нанолокальных технологий и кластера групповых технологий. В состав кластера нанолокальных технологий входят технологические модули:

- ◆ сканирующей зондовой микроскопии, в котором реализованы основные методики СЗМ;
- ◆ модули с СВВ-колоннами ФИП для прецизионного травления наноразмерных структур, ионно-стимулированного осаждения и травления различных материалов, локальной ионной имплантации.

Кластер групповых технологий состоит из следующих технологических модулей:

- ◆ СВВ-модуль молекулярно-лучевой эпитаксии GaAs и твердых растворов на его основе;
- ◆ специализированный модуль газофазного плазмохимического осаждения, для выращивания углеродных нанотрубок;
- ◆ модуль нанесения тонких пленок методом импульсного лазерного осаждения;
- ◆ модули отжига образцов, загрузки и транспортировки образцов и вспомогательные буферные модули.

Экспериментальные исследования формирования наноразмерных структур методом ФИП проводились на модуле ионно-стимулированного осаждения и травления комплекса НАНОФАБ НТК-9. Кроме того, исследования и отработка режимов осуществлялись на растровом электронном микроскопе с ионной колонной Nova NanoLab 600 (производство FEI Company, Нидерланды).

Были проведены экспериментальные исследования по формированию микрожидкостных ячеек и элементов нанофлюидики. Для формирования мембранных структур на кремниевой подложке на выбранном участке топологии размером 10x10 мкм методом ионно-лучевого травления были сформированы углубления порядка 4 мкм при токе ионного пучка 7 нА, ускоряющем напряжении – 30 кэВ. После этого при токе ионного пучка 0,1 нА формировались каналы шириной 800 и 200 нм, предназначенные для протока жидкостей. После формирования каналов образец наклонялся на угол 70° относительно ионного пучка с помощью эвцентрического стола и в мембранной структуре формировались сквозные отверстия диаметром 200 нм при токе ионного пучка 50 пА. Таким образом, был сформирован макет элемента нанофлюидики (рис. 1). Подобные структуры могут применяться при создании систем на кристалле, а также в качестве элементов микроэлектромеханических систем.

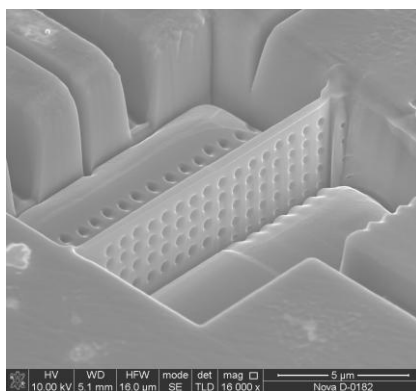


Рис. 1. РЭМ-изображение макета микрожидкостной ячейки для систем нанофлюидики

Одним из преимуществ систем, реализующих технологию ФИП, является возможность проведения технологических операций травления и осаждения по растровым графическим шаблонам. В работе были проведены экспериментальные исследования по формированию массивов автоэлектронных эмиттеров и микролинзовых структур на нанотехнологическом комплексе НАНОФАБ НТК-9. Для этого с помощью специально разработанного программного обеспечения были сформированы растровые шаблоны формата *.bmp.

Ионно-лучевое травление ФИП производилось при ионном токе 0,3 нА и ускоряющем напряжении пучка 30 кэВ в течение 4,5 мин. После травления образец передавался в модуль сверхвысоковакуумной СЗМ, где проводились исследования структур методом атомно-силовой микроскопии. В результате получен массив автоэлектронных эмиттеров с диаметром острия порядка 7 нм (рис. 2). Подобные структуры могут найти широкое применение в приборах вакуумной микро- и наноэлектроники [3].

Травление массивов микролинзовых структур производилось в течение 10 мин. при токе ионного пучка 5 пА. На рис. 3 представлен АСМ-скан массива микролинзовых структур (размер каждой ячейки – 800x800 нм, максимальная глубина травления – 30 нм).

Полученные структуры могут найти широкое применение при создании элементов интегральной микро- и нанооптики.

Метод ФИП также может применяться при создании квазиодномерных проводников, элементов наномеханики, масок для оптической и рентгеновской литографии, а также для пробоподготовки образцов для просвечивающей электронной микроскопии [3].

В модуле ИЛО нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 были осаждены тонкие плёнки ZnO, обладающие перспективным сочетанием физико-химических свойств: высокой температурой плавления и теплопроводностью, фоточувствительностью, пьезо- и пирозэффектом, что позволяет их применять при изготовлении солнечных элементов, газовых сенсоров, УФ-излучателей, варисторов, в пьезоэлектрических устройствах, а также в устройствах акусто-, оптоэлектроники и спинтроники [1,2].

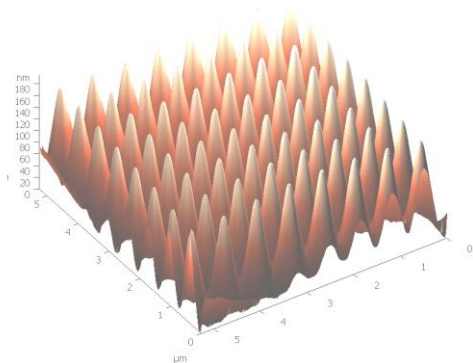


Рис. 2. АСМ-скан массива автоэлектронных эмиттеров

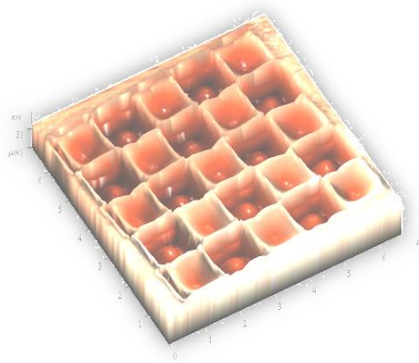


Рис. 3. АСМ-скан массива микролинзовых структур

Осаждение производилось на подложки монокристаллического кремния ориентации (001) при температуре 700°С и давление кислорода в камере 0,4 Тор. Для абляции мишени ZnO использовался KrF-лазер с длиной волны 248 нм, частотой повторения импульсов 10 Гц и плотностью мощности 2 Дж/см².

Морфология поверхности полученных образцов плёнок ZnO исследовалась на растровом электронном микроскопе Nova Nanolab 600 и зондовой нанолaborатории Ntegra Vita. Были получены наноструктурированные пленки ZnO толщиной порядка 59 нм, средней шероховатостью поверхности 4 нм и перепадом высот 8 нм (рис. 4). Степень совершенства кристаллической структуры пленки определялась методом дифракции быстрых отраженных электронов (рис. 5).

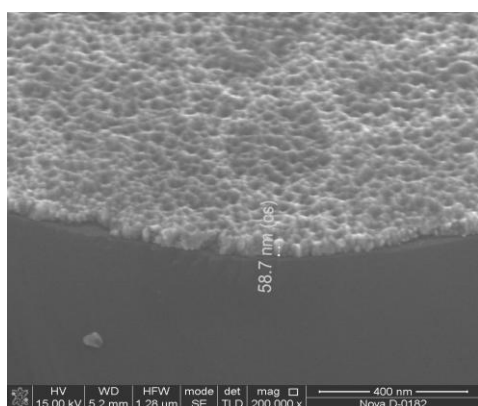


Рис. 4. РЭМ-изображение поверхности скола пленки ZnO на Si подложке

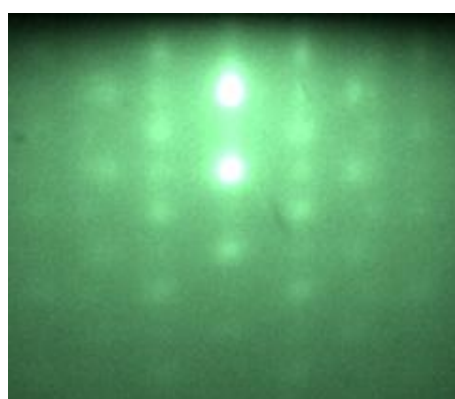


Рис. 5. Картина дифракции быстрых отраженных электронов от пленки ZnO

Полученные результаты показывают перспективность применения метода ИЛО для формирования наноструктурированных плёнок ZnO для акустоэлектрических преобразователей, солнечных элементов высокой эффективности, газовых сенсоров и т.д.

Полученные результаты показывают перспективность применения метода ИЛО для формирования наноструктурированных плёнок ZnO для акустоэлектрических преобразователей, солнечных элементов высокой эффективности, газовых сенсоров и т.д.

Также на модуле ИЛО были получены пленки оксида ванадия, который обладает свойством температурно-индуцированной кристаллографической трансформации. Этот переход приводит к изменениям электрических и оптических параметров материала, что позволяет использовать оксид ванадия в качестве чувствительных элементов в ИК-спектрометрах, микроболометрических фотоприемниках ИК-диапазона.

Напыление пленок оксида ванадия производилось на кремниевые подложки при давлении кислорода в рабочей камере 0,05 торр, температуре 600 °С и плотности потока энергии на мишени 1 Дж/см². Измерение морфологии поверхности и сопротивления растекания производилось в диапазоне температур от 5 до 90 °С на зондовой нанолaborатории NTEGRA Vita. Результаты исследований показывают хорошую корреляцию между особенностями морфологии и структуры поверхности, а также локальной проводимостью пленки оксида ванадия (рис. 6,7).

В состав нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 входит специализированный модуль плазмохимического газофазного осаждения, который позволяет выращивать на пластинах диаметром до 100 мм ориентированные массивы углеродных нанотрубок (УНТ). Для выращивания массивов УНТ был разработан технологический процесс формирования каталитических центров на основе нанокластеров металлов переходных групп (Fe, Co и т.д.). Характерный размер нанокластеров составил: для Co высота $14,4 \pm 2,9$ нм, диаметр $40,5 \pm 12,4$ нм, для Fe высота

$14,7 \pm 0,9$ нм, диаметр $16,8 \pm 10,2$ нм. На рис. 8 представлено РЭМ-изображение полученного массива углеродных нанотрубок, диаметр которых составляет 5–20 нм, а высота – до 500 нм. При этом наблюдается рост УНТ преимущественно по вершинному механизму, при котором каталитические частицы располагаются в вершинах нанотрубок. Изменение технологических режимов позволяет получать нанотрубки различной длины, диаметра, хиральности [4].

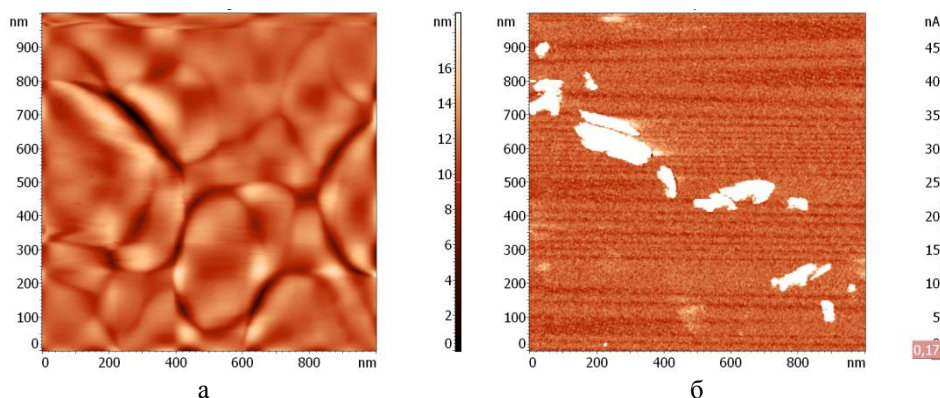


Рис. 6. АСМ-скан поверхности пленки окисла ванадия: а – морфология; б – сопротивление растекания

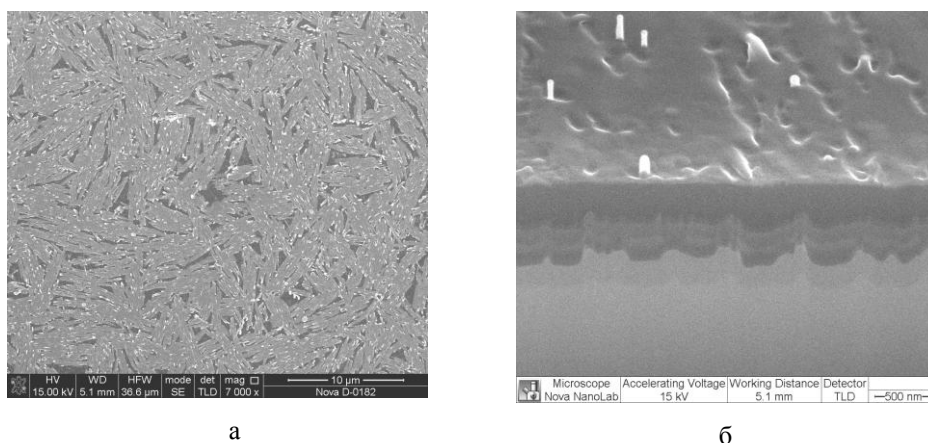


Рис. 7. РЭМ-изображение поверхности пленки окисла ванадия: а – морфология; б – поперечное сечение

Интегральное использование возможностей комплекса НАНОФАБ НТК-9 позволяет формировать протяженные наноструктуры с управляемой конфигурацией. В частности, выращивать ориентированные массивы гибридных углеродных наноструктур (ГУНС), особенностью которых является искусственное ветвление углеродных нанотрубок (рис. 9). Характерная высота массива ГУНС составляет 0,5–1 мкм при диаметре УНТ 5–50 нм.

Таким образом, применение оборудования кафедры технологии микро- и наноэлектронной аппаратуры ТТИ ЮФУ и НОЦ “Нанотехнологии” ЮФУ позволяет комплексно использовать технологические и аналитические возможности скани-

рующей электронной микроскопии, сканирующей зондовой микроскопии, ФИП, ИЛО, ГФПХО для получения и исследования материалов и структур наноэлектроники и наносистемной техники.

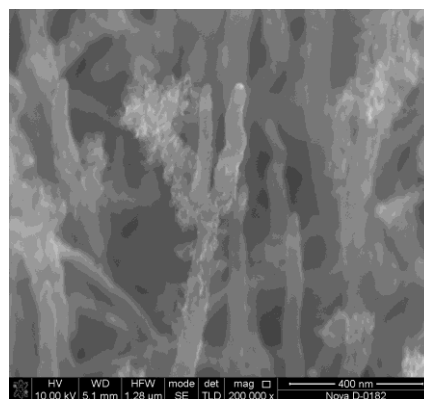
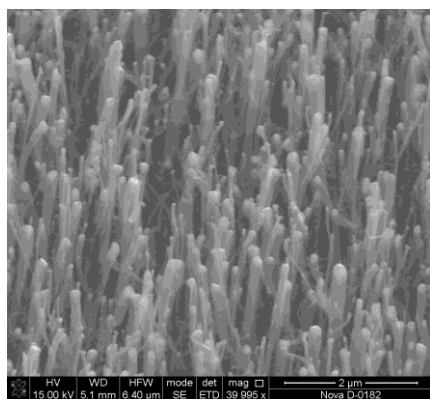


Рис. 8. РЭМ-изображение массива УНТ Рис. 9. РЭМ-изображение массива ГУНС

В результате проведены отработка режимов СЗМ, ФИП и ГФПХО, изготовлены макеты наноразмерных мембранных структур, а также массивов автоэлектронных эмиттеров и линзовых элементов микрооптики; отработаны режимы ИЛО для формирования тонких плёнок ZnO для применения в акустоэлектрических преобразователях и солнечных элементах высокой эффективности; отработаны режимы получения пленок оксида ванадия для использования в микроболометрических чувствительных элементах, разработаны технологии выращивания ориентированных массивов УНТ и ГУНС.

Таким образом, автоматизированная платформа кластерного типа НАНОФАБ НТК-9 является мощным инструментом для разработки перспективных процессов нанотехнологии, изготовления и исследования структур наноэлектроники и наносистемной техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мальцев П.П. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам // Сборник статей. 2005. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
2. Чаплыгин Ю.А. Нанотехнологии в электронике. – М.: Техносфера, 2005. – 448 с.
3. Лучинин В.В. Нанотехнологии: физика, процессы, диагностика, приборы. – М: Физматлит, 2006. – 552 с.
4. Агеев О.А., Федотов А.А., Климин В.С. Получение нанокompозитных полимерных материалов модифицированных углеродными наноструктурами на основе НАНОФАБ НТК-9 // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 1 (90). – С. 135-142.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Е.А. Рындин.

Агеев Олег Алексеевич

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: ageev@tsure.ru.

347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2.

Тел.: 88634371611.

Кафедра технологии микро- и наноэлектронной аппаратуры; заведующий кафедрой.

Коломийцев Алексей Сергеевич

E-mail: alexey.kolomiytsev@gmail.com.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; аспирант.

Михайличенко Александр Валерьевич

E-mail: alexandrVM@bk.ru.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; аспирант.

Смирнов Владимир Александрович

E-mail: alexandrVM@bk.ru.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; доцент.

Пташник Виталий Владимирович

E-mail: angellite2006@gmail.com.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; аспирант.

Солодовник Максим Сергеевич

E-mail: solodovnikms@mail.ru.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; аспирант.

Федотов Александр Александрович

E-mail: falex@fep.tsure.ru.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; доцент.

Замбург Евгений Геннадьевич

E-mail: Zamburg.evgeniy@gmail.com.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; магистрант.

Климин Виктор Сергеевич

E-mail: KliminV.S@mail.ru.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; аспирант.

Ильин Олег Игоревич

E-mail: ru.saint@gmail.com.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; магистрант.

Громов Александр Леонидович

E-mail: adn13.ru@gmail.com.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; магистрант.

Рукомойкин Андрей Васильевич

E-mail: rukomoykin@gmail.com.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; магистрант.

Ageev Oleg Alexeevich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: ageev@tsure.ru.

2, Shevchenko Street, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371611.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Head of Department.

Kolomiytsev Alexey Sergeevich

E-mail: alexey.kolomiytsev@gmail.com.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Postgraduate Student.

Mikhaylichenko Alexandr Valer'evich

E-mail: alexandrVM@bk.ru.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Postgraduate Student.

Smirnov Vladimir Alexandrovich

E-mail: sva@fep.tsure.ru.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Associate Professor.

Ptashnik Vialiy Vladimirovich

E-mail: angellite2006@gmail.com.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Postgraduate Student.

Solodovnik Maksim Sergeevich

E-mail: solodovnikms@mail.ru.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Postgraduate Student.

Fedotov Alexandr Alexandrovich

E-mail: falex@fep.tsure.ru.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Associate Professor.

Zamburg Evgeniy Genad'evich

E-mail: Zamburg.evgeniy@gmail.com.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Magistrate.

Klimin Victor Sergeevich

E-mail: KliminV.S@mail.ru.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Postgraduate Student.

Il'in Oleg Igorevich

E-mail: ru.saint@gmail.com.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Magistrate.

Gromov Alexandr Leonidovich

E-mail: adn13.ru@gmail.com.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Magistrate.

Rukomoykin Andrey Vasil'evich

E-mail: rukomoykin@gmail.com.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Magistrate.

УДК 621.382:621.3

П.Ю. Волощенко, Е.Т. Замков

АНАЛИЗ ТРАНСФОРМАЦИИ ФАЗЫ ВОЛН В МОП-СТРУКТУРЕ

Проведено исследование композиции волн в одномерной электронной цепи с распределенными параметрами. Методом эквивалентных синусоид рассчитан фазовый сдвиг между колебаниями напряжения на входе и выходе длинной линии с активным нелинейным элементом, моделирующей сверхскоростную МОП-структуру. В аналитическом виде найдена зависимость фазового отклика многомодовой нелинейной цепи, положение фронта волн от интенсивности внешнего воздействия.

МОП-структура; электронная цепь; длинная линия; негатрон.

P.Y. Voloshchenko, E.T. Zamkov

**ANALYSIS OF THE PHASE TRANSFORMATION OF WAVES
IN MOS-STRUCTURE**

A theoretical study of the wave composition in the one-dimensional electronic circuit with distributed parameters. By the methods of equivalent sinusoids is calculated the phase shift between the oscillations of the voltage at the input and output of a long line with an active nonlinear element, which simulates the ultra-high speed MOS-structure. In the analytical form are found the dependence of the phase response of the multimode nonlinear circuit, the position of the wave front from the intensity of external action.

MOS-structure; the electronic circuit; a long line; negatron.