

В.К. Белик, А.И. Климовская, И.О. Журавская

Нанокomпьютер: перспективы создания. Обзор

Предложен обзор публикаций о результатах разработок и исследований нанoeлектромеханических структур с точки зрения специалиста по компьютерным техническим средствам. Описаны результаты исследований экспериментальных образцов и защищенных патентами США элементов вычислительной техники.

The review of publications about the results of developments and researches of nanoelectromechanical structures is conducted from point of specialist on computer hardwares. The research results of experimental standards of nanoelectromechanical elements of the computing engineering protected by the USA patents are described.

Запропоновано огляд публікацій про результати розробок та досліджень нанoeлектромеханічних структур з точки зору фахівця з комп'ютерних технічних засобів. Описано результати досліджень експериментальних і захищених патентами США зразків нанoeлектромеханічних елементів обчислювальної техніки.

Введение. Цель обзора – продемонстрировать научной общественности, что в развитии компьютерной техники наука находится на пороге качественного скачка в создании технических средств – нанокomпьютеров. Разработчики вплотную приближаются к масштабам, где стираются грани между объектами живой и неживой материи. Уже завтра могут быть созданы наноэлементы высокоинтеллектуальных систем, расположенные не только вокруг нас, но и внутри человека.

Постановка задачи

Известно, что интенсивное развитие электронной промышленности (мобильные телефоны, электронные книги, планшетные компьютеры и пр.) требует существенной миниатюризации интегральных схем. Но миниатюризация интегральных схем на основе традиционных транзисторов сдерживается проблемой рассеивания тепла, выделяемого при увеличении плотности расположения транзисторов, а также необходимостью учета квантовых явлений. Очевидный путь – снижение уровня рабочего напряжения наталкивается на проблему, условно названную *тепловой стеной*. Вместе с тем существует традиционная необходимость в снижении энергопотребления переносных электронных приборов, а также в обнаружении и обработке все более слабых сигналов, что понуждает к поиску и исследованию элемен-

тов с низким уровнем рабочего напряжения. Поэтому в настоящее время основные усилия специалистов направлены на поиск технических решений по сокращению мощности потребления и рассеивания энергии в интегральных схемах.

Несколько неожиданным для специалистов по электронике стало открытие электромеханических структур – микроэлектромеханических и нанoeлектромеханических. В зарубежной литературе уже установилось их сокращенное название – МЭМС и НЭМС соответственно.

Обзор зарубежных источников

Оказалось, что можно существенно снизить потребляемую мощность устройств, если в качестве базовых элементов микросхем использовать последние достижения в разработке нанoeлектромеханических приборов.

В 2004 г. опубликован патент [1], в котором предложены нанoeлектромеханические транзисторы и переключательные системы, в которых используется механическое движение нанотрубок. Такие НЭМС могут выполнять функции электронных ключей, управляемых диодов, усилителей, инверторов, варисторов, времяимпульсных модуляторов и транзисторов.

На рис. 1 справа показана схема инвертора, представляющая собой многослойную структуру с закрепленной наверху консолью из нанотрубки. Здесь, снизу вверх: проводящий слой (входной контакт) 822, изоляционный слой (852, проводящий слой (контакт, соединенный с «землей») 842, контактный слой (соединен-

Ключевые слова: нанoeлектромеханические структуры (системы) НЭМС, нанокomпьютер, нанотехнологии, осциллятор, резонатор.

ный с источником питания) 841, резистивный слой 832 и контактный слой 843, который служит выходным полюсом инвертора, куда вмонтирована консоль из нанотрубки 811.

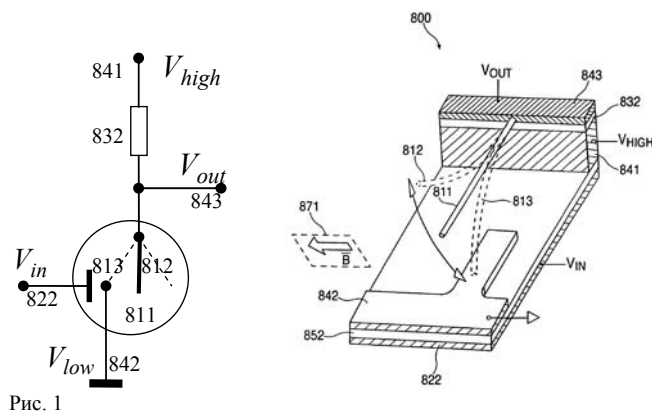


Рис. 1

На рис. 1 слева приведено условное обозначение этого инвертора в более известном виде, что, надеемся, заметно сократит время для изложения работы такого инвертора. Достаточно сказать, что в исходном состоянии консоль 811 заряжена противоположно (положительно, например) по отношению к электроду 841. Поэтому при подаче на вход 822 высокого отрицательного уровня напряжения ($-3V$), нанотрубка 811 притянется к электроду 822 (в позицию 813), не прикасаясь к нему, но прижавшись к электроду 842, что приведет к появлению на выходе 843 низкого отрицательного уровня напряжения ($0V$, т.е. «земли»). И, наоборот, при подаче на вход 822 низкого отрицательного уровня напряжения ($0V$) нанотрубка 811 оттолкнется от электрода 842 (в положение 812), что приведет к появлению на выходе 843 высокого отрицательного уровня напряжения ($-3V$). То же самое произойдет при приложении внешнего магнитного поля (см. 871 на рис. 1). Известно, что на основании инвертора могут быть построены логические схемы и элементы памяти компьютера. В [1] подробно описан процесс изготовления наноэлектромеханических элементов такого типа.

В [2] предложено устройство с электромеханическим переносом электронов, в котором используется наномеханический резонатор (рис. 2). Устройство рекомендуется использовать как транзистор, выпрямитель, а также как

различные датчики газа, радиации и др. К его достоинствам, отмечено, относятся малые габариты и низкий уровень напряжения питания.

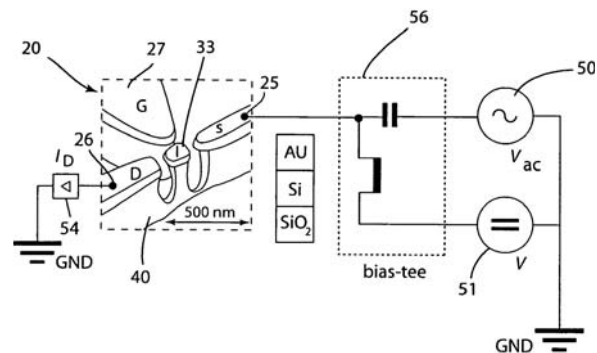


Рис. 2

Устройство 20 (см. рис. 2) содержит расположенные на общем изоляционном основании 40 два проводящих электрода 25 и 26, питания и «земли» соответственно, между которыми расположен вибратор в виде столбика из изоляционного материала с расположенной на его вершине проводящей частью 33. Как вариант, в состав устройства может быть введен третий электрод 27, для управления работой устройства.

В последнем случае легко улавливается подобие этого устройства известной схеме транзистора, где S – коллектор, D – эмиттер и G – база. Как видно из рис. 2, питание, как и управление, в этом устройстве может осуществляться источником как постоянного, так и переменного тока, в отдельности и в сочетании. Передача электронов, протекание тока, может осуществляться в устройстве вследствие электронного туннелирования, полевой эмиссии, ионизации газа или прямого электрического контакта. Частотный диапазон работы устройства – до сотен МГц.

В 2007 г. была опубликована статья [3], в которой заявлено о *новом направлении в компьютерной технике* и было приведено описание типичного наноэлектромеханического элемента для построения логических элементов наноэлектромеханического компьютера.

На рис. 3 и 4 приведены соответственно схемы инвертора и логического элемента И-НЕ, где наноэлектромеханический элемент изображен не в общеизвестном, а в специфическом виде, что сначала, естественно, затруднило по-

нимание смысла статьи и стало понятно лишь позднее.

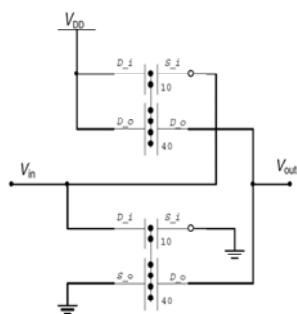


Рис. 3

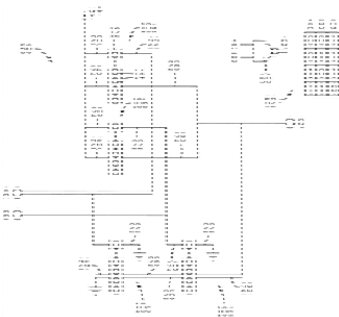


Рис. 4

Именно в 2008 г. был опубликован патент [4] на *нанoeлектромеханический компьютер*, в котором подробно описан «зашифрованный» ранее нанoeлектромеханический элемент (рис. 5) и показано, как на его основе построить логический элемент И–НЕ и элемент памяти для нанокomпьютера.

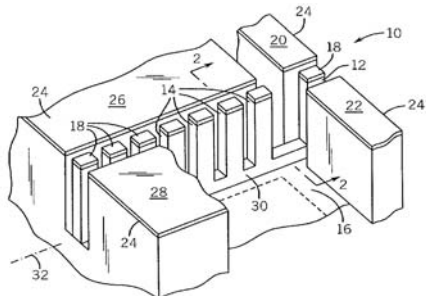


Рис. 5

Как видим на рис. 5, наномасштабный электромеханический транзистор 10 представляет собой расположенную на общем основании 16 структуру 10, состоящую из двух частей: управляющей и управляемой. При этом каждая из двух частей 24 состоит из направленных вверх и выполненных из изоляционного материала и покрытых сверху проводящим слоем двух электродов 20 и 22 для управляющей части и двух электродов 26 и 28 для управляемой части. Посредине структуры, между названными электродами, вдоль от одной части к другой расположена гребенка 30 из столбиков (консолей) 12 и 14, выполненных из изоляционного материала, покрытых сверху проводящим слоем 18 и соединенных механически в нижней части гребенки 30 между собой и с основанием 16 структуры 10.

При подаче напряжения малой мощности на электроды 20 и 22 управляющей части структуры и напряжения большей мощности на электроды 26 и 28 управляемой части сначала возникают колебания консоли, расположенной между электродами 20, 22 управляющей части. Затем, благодаря резонансу и механической связи в нижней части гребенки 30, колебания передаются в управляемую ее часть. При этом из-за резонанса и более высокой мощности в управляемой части происходит усиление возникших колебаний. А это, в свою очередь, ведет к увеличению значения тока в управляемой части структуры 10.

Таким образом, можно управлять проводимостью структуры 10 от малого ее значения в отсутствие сигнала на управляющих входах 20, 22 до большого – при подаче соответствующего сигнала на те же входы.

После этого полезно вернуться к анализу правильности выполнения функций логическими элементами на рис. 3 и 4.

В 2007 г. была опубликована статья [5], содержащая значительные результаты по исследованию механизма самовозбуждения наномеханических столбиков (консолей). Остановимся на наиболее важных из них.

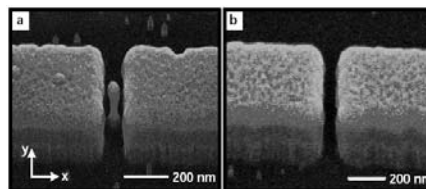


Рис. 6

Авторами [5] проведено два эксперимента для установления зависимости напряжения самовозбуждения от введения между электродами наностолбика. На рис. 6,а показано изображение с электронного микроскопа двух электродов с наностолбиком между ними, а на рис. 6,б – изображение без наностолбика. На рис. 7 приведены результаты этих двух экспериментов, где слева – серая кривая соответствует эксперименту 6,а со столбиком, а справа – черная кривая, соответствующая эксперименту 6,б. Очевидно, что введение электромеханического элемента позволяет снизить напряжение

питания примерно в пять раз. Налицо преимущество нанoeлектромеханических элементов над чисто электронными.

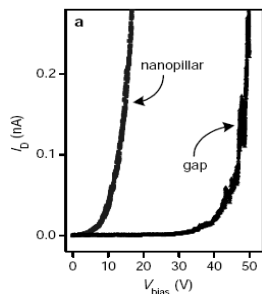


Рис. 7

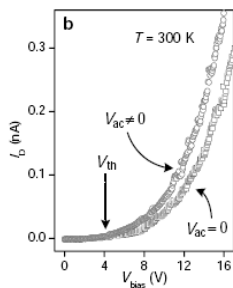


Рис. 8

Также было выявлено [5] наличие достаточно четкого порога V_{th} возникновения самовозбуждения, а также изучена зависимость амплитуды возбуждения от применения одновременного сочетания постоянного смещения и сигнала переменного тока (рис. 8).

Особенно актуально обнаружение авторами явления гистерезиса в нанoeлектромеханических структурах. На рис. 9 приведены результаты исследования самовозбуждения в так называемом жестком режиме (когда электроды не плоские, а заостренные). На рис. 9,а изображен эксперимент с заостренными концами электродов.

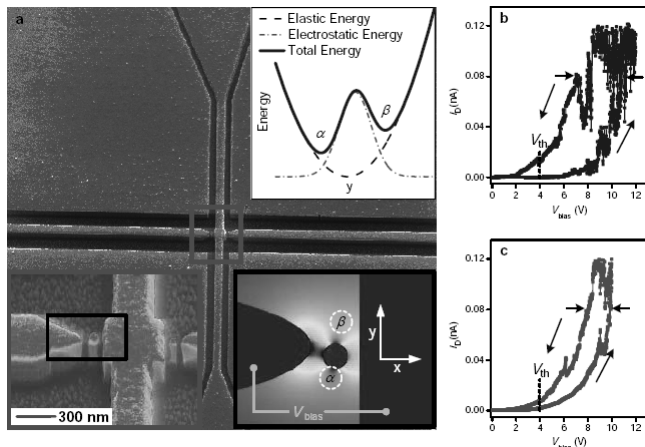


Рис. 9

На вставке внизу слева это показано в более крупном масштабе. Справа сверху на вставке изображены кривые изменения в пространстве между электродами сил (энергий), обусловленных воздействием на наностолбик с зарядом электростатического поля и упругих (эластических) механических сил. Форма кривой, со-

ответствующая совместному действию на наностолбик двух названных сил, объясняет причину возникновения гистерезиса в таких структурах в таком режиме.

На рис. 9,б,с показаны две последовательные записи гистерезисных траекторий: в начале измерений и после нескольких циклов соответственно. Здесь ширина гистерезисной кривой определяется разностью энергий между потенциальными ямами α и β .

Рассмотренные результаты подтверждаются и в экспериментах, проведенных другими авторами. Приведем некоторые из них.

В статье [6] приведены результаты исследования возникновения и поддержания собственных колебаний нанотрубки с закрепленным одним концом (консоли).

На рис. 10,а,б,с изображен электронный микроскоп углеродной нанотрубки: а – при нулевом приложенном напряжении; б – при небольшом ненулевом приложенном напряжении; с – при приложении напряжения, достаточного для поддержания собственных колебаний.

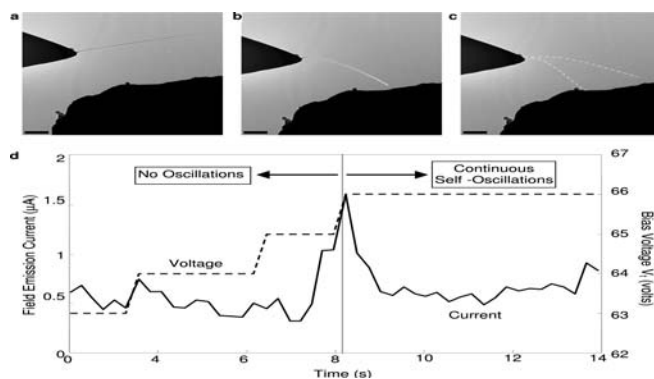


Рис. 10

На рис. 10,д приведена временная диаграмма изменений прилагаемого напряжения и измеряемого тока в процессе эксперимента. Здесь отчетливо виден порог возникновения колебаний ($V = 66$) углеродной нанотрубки. В эксперименте колебания нанотрубки возбуждались как приложением напряжения постоянного тока, так и путем совместного приложения постоянного напряжения и напряжения переменного тока.

Следует отметить еще один существенный результат, полученный при исследовании ре-

жима непрерывающихся колебаний, – определение условий возникновения в зависимости от прикладываемого напряжения, от радиуса и длины нанотрубки и их соотношения (рис. 11).

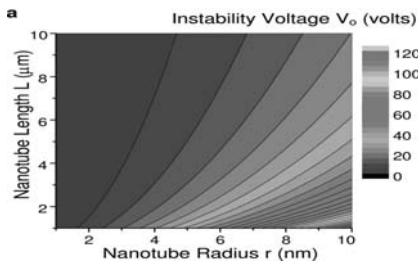


Рис. 11

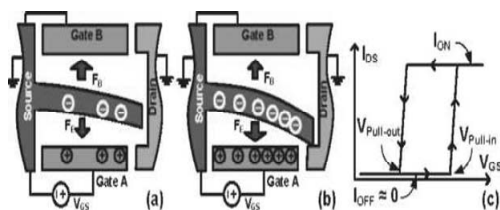


Рис. 12

В статье [7] рассмотрены компактные предельно высокоэнергоэкономичные ключи, использующие двухэлектродные НЭМС’ы (электроды *A* и *B* на рис. 12) с горизонтальным расположением балки (консоли) и латеральным ее управлением. На рис. 12 приведены схемы переключательных устройств при приложении напряжения V_{GS} ниже порога срабатывания $V_{pull-in}$ (см. рис. 12,а) и выше порога срабатывания (см. рис. 12,б). На рис. 12,с показана вольт-амперная гистерезисная характеристика устройства, где отмечен предельно низкий уровень отключенного предпорогового уровня тока утечки I_{off} в нем. Описан процесс изготовления таких устройств. Приведены также результаты аналитических исследований работы устройства (уравнение Эйлера–Бернулли), которые согласуются с результатами экспериментальных исследований.

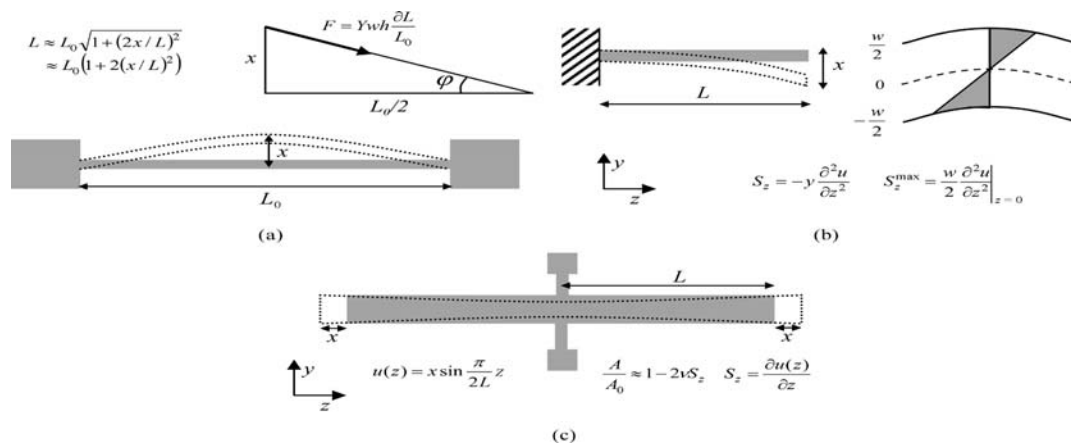


Рис. 14

В [7] приведены также схемы логических элементов: *NAND*, *NOR* и *XOR*, построенные на основании предложенных авторами ключей.

В общем случае, подвижный элемент НЭМС’а может быть реализован по-разному: в виде консоли, в виде струны или даже мембраны. В статье [8] описаны результаты исследования колебаний осциллятора в виде подвешенной углеродной нанотрубки, закрепленной с двух сторон.

На рис. 13,а изображен электронный микроскоп экспериментального образца устройства (в верхней части рисунка), измерительная линейка 300 nm (справа внизу) и его геометрическое представление (в нижней части рисунка). На рис. 13,б показана схема экспериментальной установки.

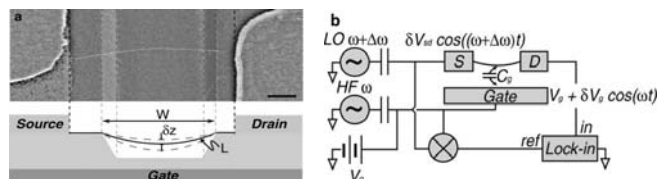


Рис. 13

Детальному анализу нелинейных эффектов в электромеханических осцилляторах, обусловленных механическими причинами, посвящена статья [9].

На рис. 14 приведены три основных вида механического подвижного элемента (вибратора): *a* – натянутой путем закрепления с двух сторон нити (струны) (резонатор–мостик); *b* – балка с одним свободным, а другим закрепленным концом (консоль); *c* – пружины в виде двухмерной мембраны.

При этом за основу взято известное классическое уравнение осциллятора

$$m \ddot{x} + \gamma \dot{x} + k x = F(t),$$

где m – сосредоточенная масса, γ – коэффициент демпфирования, $F(t)$ – внешняя сила и k – коэффициент упругости. При этом принято, что $k = k_0 (1 + k_1 x + k_2 x^2 + \dots)$, где k_0 – линейный член, а k_1 и k_2 – нелинейные члены первого и второго порядка. Решение уравнения можно получить методом последовательных приближений, приняв решение в форме $x(t) = x_0 + x_1 \cos \omega t + x_2 \cos 2\omega t + x_3 \cos 3\omega t + \dots$.

Зависимость амплитуды колебаний от частоты показана на рис. 15: a – при колебаниях с нулевым демпфированием; b – при $|k_1| > 0$ и $k_2 < 0$; c – при $k_2 > 0$. Дальнейшее усиление возбуждающего сигнала $F(t)$ ведет к увеличению нелинейности, решение уравнения возвращается из ситуации, соответствующей рис. 15, c , в ситуацию, соответствующую рис. 15, b , и в результате появляется скачок выходного сигнала из-за частотного гистерезиса, как показано на рис. 15, b . Увеличение добротности повышает чувствительность резонатора к нелинейности. Были сопоставлены характеристики всех трех типов резонаторов и установлено, что наилучшие показатели у мембранного резонатора.

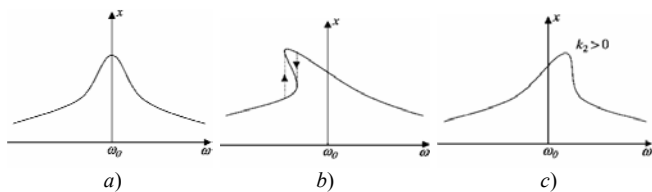


Рис. 15

В [10] и [11] описаны и проверены способы грубого подбора размеров резонатора в соответствии с резонансной частотой и последующей затем тонкой подстройки на заданную частоту. Существенным достоинством упомянутых источников есть то, что здесь, на основе натурального эксперимента, продемонстрированы широкие функциональные возможности нанoeлектромеханических устройств, построенных на основе нанотрубок.

Достаточно взглянуть на рис. 16, где изображена функциональная схема радиоприемника, и добавить, что все, обведенное пункти-

ром, может быть реализовано практически на основе лишь резонансных нанотрубок, что не под силу даже таким широко применяемым элементам, как транзисторы.

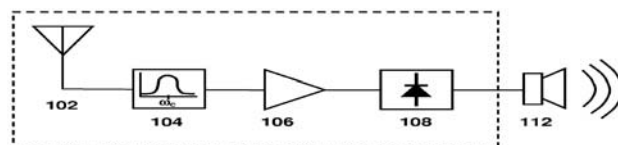


Рис. 16

И третье, но не последнее, достоинство названных источников – это то, что авторы подсчитали и заявили о том, что размеры устройств на основе резонансных нанотрубок позволяют их размещать, например, внутри кровеносных сосудов человека. А это открывает возможности создания высокоинтеллектуальных искусственных спутников человека! Значение последнего обстоятельства сегодня трудно оценить в полной мере.

Общеизвестные достоинства НЭМС'ов – высокая, недоступная традиционным элементам чувствительность НЭМС-датчиков и работа НЭМС с низким уровнем сигналов, оборачиваются в свою противоположность – в недостаток в условиях, когда необходимо передать дальше полученный высокочувствительным датчиком сигнал. Поэтому актуальна проблема предотвращения искажений полученных сигналов низкого уровня. Очевидный подход – сокращение длины и времени передачи слабого сигнала требует решения проблемы – объединения на одном чипе высокочувствительного НЭМС-датчика с усилителем. Один из возможных способов усиления слабых сигналов рассмотрен авторами предлагаемой статьи в ее начале (см. [4]).

Другой возможный способ интеграции НЭМС-элементов с известными транзисторами предложен, проверен на натуральных экспериментах и исследован авторами [12], где приведены результаты исследования двух экспериментальных образцов. В первом – реализован электростатический метод отвода сигнала от НЭМС-осциллятора. Во втором – реализован метод, при котором в одном чипе объединен НЭМС-осциллятор и полевой транзистор (*field*

effect transistor – FET). Показано экспериментально и аналитически, что уровень выходного сигнала во втором случае выше в 18 раз. Результаты исследований защищены патентом [13].

Заключение. В предложенном обзоре зарубежных источников сознательно сделан акцент на результатах экспериментальных исследований и на изображениях электронных микроскопов экспериментальных образцов и рисунков с результатами экспериментальных исследований, с надеждой, что у читателя сложится образное или качественное (не количественное) представление о НЭМС'ах для их применения при создании нанокomпьютера. За бортом остались многочисленные числовые характеристики и теория. Вне поля зрения сознательно оказались также источники о сенсорах на основе НЭМС'ов (где они в ближайшем будущем будут вне конкуренции). Приведенные результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о практической готовности состояния дел к тому, что нанoeлектромеханические элементы займут свое достойное место при создании нанокomпьютеров.

В Украине в этом важном направлении современной электроники проводятся в основном научно-исследовательские работы. И значительно меньше – экспериментальных исследований [14, 15], главным образом, из-за недостатка средств на материалы и на соответствующее современное оборудование.

1. *Nanoelectromechanical* transistors and systems (US 2004/0238907, WO2004/108586 A1, US 2005/0104085 A1, US 7256063 B2 / Joseph F. Pinkerton, John C. Harlan, Jeffrey D. Mullen. – Ambient Systems, Inc. (US).
2. *Electromechanical* electron transfer devices (US 2005/6946693 B1, WO 2005/109520 A2, US 2007/7214571 B2 / Dominik V. Scheible, Munich (DE); Robert H. Blick (US). – Wisconsin Alumni Research Foundation, (US).
3. *A nanomechanical* computer—exploring new avenues of computing / Robert H. Blick, Hua Qin, Hyun-Seok

- Kim, Robert Marsland // *New J. of Physics.* – 2007. – **241**, N 9. – P. 1–9.
4. *Nanomechanical* computer. Pat. US 2008/7 414 437 B1. Robert Blick and Robert Marsland.
5. *Heun S. Kim, Hua Qin and Robert H. Blick.* Self excitation of nano-mechanical pillar // *New J. Physics.* – 2010. – N 12. – 033008.
6. *Sustained Mechanical Self-Oscillations in Carbon Nanotubes* / Jeffrey A. Weldon, Benjamin Alema'n, Allen Sussman et al. // *Nano Lett.* – 2010. – N 10. – P. 1728–1733.
7. *Design and Analysis of Compact Ultra Energy-Efficient Logic Gates Using Laterally-Actuated Double-Electrode NEMS* / Hamed F. Dadgour, Muhammad M. Husain, Casey Smith et al. // *DAC'10*, June 13–18, 2010, Anaheim, CA, USA.
8. *A tunable carbon nanotube electromechanical oscillator* / Vera Sazonova, Yuval Yaish, Hande Üstünel et al. // *Nature.* – 16 Sept. 2004. – **431**. – P. 284–287.
9. *Nonlinear Limits for Single-Crystal Silicon Microresonators* / Ville Kaajakari, Tomi Mattila, Member // *J. of microelectromechanical systems.* – Oct. 2004. – **13**. – N 5. – P. 715–724.
10. *Nanomechanical* radio transmitter / J. Weldon, K. Jensen, A. Zettl // *Phys. stat. sol. (b).* – 2008. – **245**, N 10. – P. 2323–2325.
11. *Nanotube resonator devices.* Pat. US 2010/0271003 A1. Kenneth J. Jensen, Alexander K. Zettl, Jeffrey A. Weldon.
12. *Nanoelectromechanical* system-integrated detector with silicon nanomechanical resonator and silicon nanochannel field effect transistor / Josef-Stefan Wenzler, Tyler Dunn, Shyamsunder Erramilli et al. // *J. of Applied Physics.* – 2009. – N 105. – P.1–4, 094308.
13. *Pat. US 2010/0155883.* Integrated MEMS and IC systems and related methods.
14. *Quantized* field-electron emission at 300 K in self-assembled arrays of silicon nanowires / A.I. Klimovskaya, O.E. Raichev, A.A. Dadykin et al. // *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures.* – 2007. – 37(1-2). – P. 212–217.
15. *Growth* of silicon nanowires suitable for NEM device applications / A.I. Klimovskaya, A.V. Sarikov, Yu.N. Pedchenko et al. // «EMRS 2012 Spring Meeting», Symp. L, L8P, 43; 14–18 May 2012.

Поступила 12.04.2013

Тел. для справок: +38 044 526-2131, 574-5881 (Киев)

E-mail: bilykvk@gmail.com, izh@ua.fm

© В.К. Белик, А.И. Климовская, И.О. Журавская, 2013