

Обзор по теме “Электронные устройства на основе углеродных наноструктур”

Нанoeлектроника – это общее определение ряда технологий, направленных на реализацию электронных приборов с нанометровыми размерами структурных областей. К ним относятся эмиссионные приборы на основе углеродных нанотрубок, наноантенны, полупроводниковые лазеры, наноразмерные электромеханические системы, полевые и биполярные транзисторы с размерами элементов 100 нм, а также другие полупроводниковые приборы с нанометровыми размерами.

Одними из перспективных материалов элементной базы нанoeлектроники являются углеродные наноструктуры (графен, графан, нанотрубки и другие похожие структуры). Открытие углеродных наноструктур дает новый импульс в создании специализированной электроники. Каждая из этих углеродных наноструктур обладает своими индивидуальными свойствами и перспективна для применения в нанoeлектронике.

В настоящее время углеродные нанотрубки (УНТ) являются элементной базой для конструирования транзисторов [1,2], диодов [3], элементов памяти [4], нанокатодов [5].

На протяжении десятилетий прогресс в электронике сопровождался уменьшением размера отдельных транзисторов и увеличением их числа на чипе. Но при этом растет энергопотребление и количество выделяемого тепла. Многие исследователи полагают, что в скором времени развитие электроники перестанет идти по закону Мура.

Команда из Стэнфордского университета [6] разработала эффективный процесс изготовления микросхем на основе УНТ и смогла осуществить работу данной схемы.

Углеродные нанотрубки чрезвычайно эффективны, когда речь идет о проводимости или управлении электронными состояниями. Для переключения состояний УНТ нужно затратить гораздо меньше энергии, чем

при работе с кремниевыми транзисторами. Сложности в использовании УНТ заключались в следующем: во-первых, УНТ удавалось выстроить в аккуратные параллельные линии, как того хотелось производителям микрочипов; во-вторых, в зависимости от условий, при которых растут нанотрубки, некоторые из них могут вести себя как проводники, а не как полупроводники. Со временем были разработаны технологии, позволяющие выращивать 99,5% углеродных нанотрубок перпендикулярно относительно подложки. Но на чипе с миллиардами нанотрубок даже крошечное смещение может привести к ошибкам в работе, так что проблема актуальна до сих пор. Ориентируясь на массовое производство, исследователи работали на получение способа синтеза без дефектных или «металлических» УНТ.

Для отделения массива УНТ от «металлических» нанотрубок, разработчики переключили все полупроводниковые УНТ в непроводящее состояние, а «металлические» УНТ, не способные на такое переключение, буквально испарились, стоило лишь приложить высокое напряжение.

Избавиться от УНТ с дефектами, например, искривления было бы сложнее, поэтому исследователи разработали специальное программное обеспечение, которое позволяет спроектировать схему так, чтобы случайным образом проявившееся искривление УНТ не приводило к ошибкам в работе.

Исследователи использовали данную технологию, обладающую «иммунитетом к недостаткам», чтобы построить чип со 178 транзисторами – большего было трудно добиться на университетском оборудовании. Однако эта простая схема доказала свою эффективность. Например, она способна выполнять функции счетчика и сортировку целых чисел, причем простейшая операционная система позволяет переключаться между этими двумя задачами. Также разработчики продемонстрировали, что их УНТ-компьютер может работать с набором команд MIPS, разработанным в 1980-х годах.

Возможно, технологии потребуются годы на развитие, прежде чем она воплотится в каких-либо коммерческих образцах, но ученые сделали важный

шаг на пути к промышленному производству электронных устройств на основе углеродных нанотрубок.

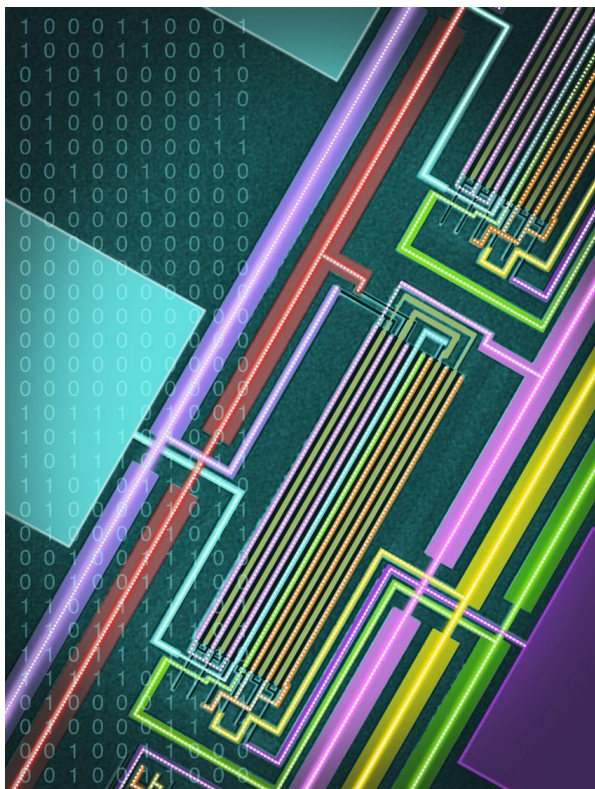


Рис.1. Иллюстрация, основанная на микрофотографии фрагмента микросхемы, при изготовлении которой вместо кремниевых транзисторов использованы углеродные нанотрубки [6].

Заметный прогресс в развитии бионаносенсоров на основе УНТ продемонстрирован недавно группой исследователей из Университета шт. Иллинойс (США), которым удалось придать лабораторному устройству приборное воплощение [7].

Для приготовления данного устройства в конфигурации полевого транзистора использовали однослойные УНТ в виде порошка и микрокапилляров из полидиметилсилоксана (PDMS), смешанного со смолой в отношении 10:1. УНТ порошок в течение 2 часов подвергли термической обработке при 900°C с целью удаления с поверхности нанотрубок карбоксильных групп, которые могли вызвать утечку тока на опорный электрод. Далее готовили суспензию, содержащую УНТ с содержанием 0.1 мг/л в 1% водном растворе додецилсульфата натрия, которую в течение

1 часа центрифугировали при скорости 14000 об/мин для удаления недиспергированных жгутов. В результате вакуумной фильтрации этой суспензии образовывались пленки УНТ.

Поверхностное сопротивление такой пленки определяется фильтрационным объемом, а, следовательно, плотностью сформированной сети УНТ. Пленки, удельное сопротивление которых превышает 300 Ом/см^2 , использовали в качестве транзисторного канала, в то время как пленки с удельным сопротивлением свыше 1000 Ом/см^2 – для изготовления контактов. Пленку первого типа с помощью штамповки переносили на PDMS подложку, содержащую микрожидкостный канал. Процесс сборки устройства завершался соединением двух PDMS носителей. Устройства тестировали при приложении затворного напряжения к опорному электроду и небольшого напряжения смещения (10 мВ) между входным и выходным электродами.

Для установления биологической чувствительности прибора в его канал с помощью шприца вводили раствор полилизина. Измерения показали на заметное (примерно $-0,1 \text{ В}$) смещение вольт-амперной характеристики прибора в качестве реакции на присутствие полилизина при мольной концентрации на уровне 1 пМ. В качестве причины чувствительности прибора к присутствию молекул полилизина авторы приводят эффект электростатического взаимодействия этих молекул с поверхностью однослойных УНТ, приводящий к электрической зарядке УНТ относительно заземленной подложки.

Ученым из Калифорнийского университета и национальной лаборатории Беркли [8] на основе углеродной нанотрубки удалось создать компактный масс-спектрометр с атомной чувствительностью, который работает при комнатной температуре и не требует необходимой для таких измерений ионизации взвешиваемых частиц.

Углеродная нанотрубка закреплена одним концом на электроде и находится в камере, в которой создан высокий вакуум — давление 10^{-10} мм рт. ст. С вольфрамовой нити, расположенной на расстоянии $d_{\text{CNT}} = 50,2 \text{ см}$ от

нанотрубки, испаряются атомы золота, массу которых и предлагается определить. Заслонка регулирует количество попадающих в резонатор атомов золота. Находящиеся на расстоянии $d_{\text{QCM}} = 12,8$ см перпендикулярно направлению испарения взвешиваемых частиц, кварцевые микровесы (QCM, quartz crystal microbalance) выполняют функцию калибровочного устройства для нанотрубки, контролируя равномерность испарения атомов золота. Иными словами, предназначение этих весов — убедиться в постоянстве массового потока от вольфрамовой нити. Для детектирования механических колебаний резонатора ученые использовали уникальную особенность углеродных нанотрубок, заключающуюся в зависимости между ее механическими колебаниями и током автоэлектронной эмиссии (рис. 2). Как показали измерения, до открытия заслонки частота резонатора составила 328,5 МГц. Из соотношения между частотой резонатора и его массой (см. формулу выше) получаем, что поглощение одного центограмма массы (1 центограмм (цг) = 10^{-24} кг) соответствует уменьшению частоты резонатора на $\Delta f = 0,104$ МГц).

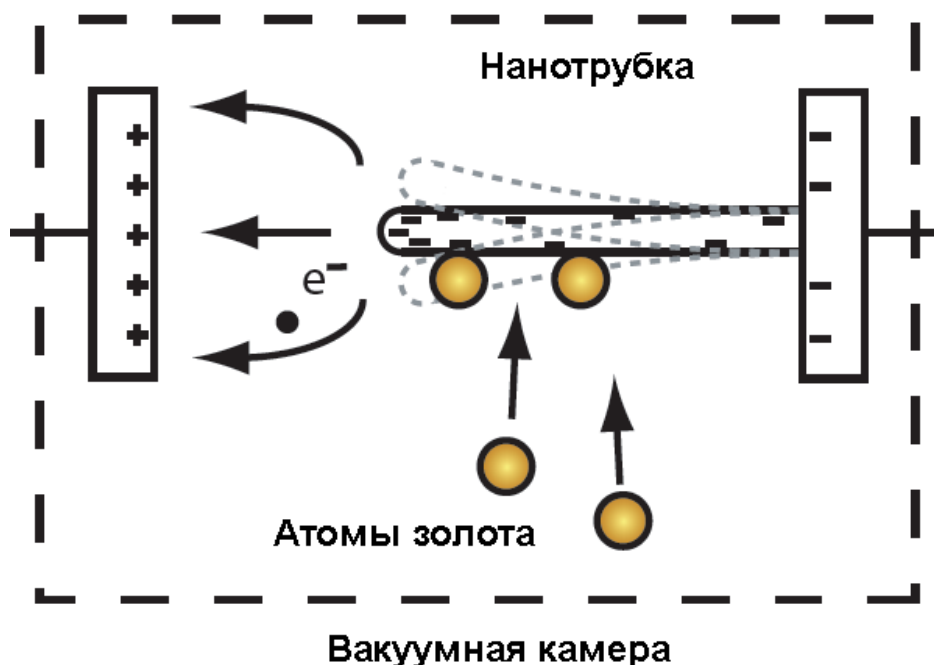


Рис. 2. Участок схемы, с помощью которой по величине тока автоэлектронной эмиссии детектируют частоту механических колебаний нанотрубки. Рисунок из обсуждаемой статьи [8]

Исследователи из США смогли внедрить углеродные нанотрубки в органические светоизлучающие транзисторы [organic light-emitting transistors (OLET)] [9], получив устройства, которые по производительности превосходят кремниевые аналоги. Новая технология позволит получить большие по размеру и менее дорогие плоские телевизионные и компьютерные экраны.

Органические светоизлучающие диоды [organic light-emitting diodes (OLED)] дают более яркий свет, чем жидкие кристаллы и дешевле в производстве, чем неорганические светоизлучающие кристаллы, что делает их перспективными альтернативными материалами для больших по размеру плоских экранов.

Для изготовления системных панелей экранов на основе органических светоизлучающих диодов применяются поликристаллические кремниевые транзисторы – полупроводниковые устройства для усиления и переключения электрических сигналов. Тем не менее, достаточно сложно получить однородные зерна кристаллического кремния, что задает ограничения на максимально возможные размеры плоских экранов.



Рис. 3. Большой плоский экран на основе углеродных нанотрубок [9]

Благодаря устройству, которое совмещает в себе функции транзистора и источника света, можно будет создать большие по размеру и менее дорогие плоские экраны.

Группа исследователей под руководством Эндрю Ринцлера (Andrew Rinzler) [9] из Университета Флориды решили проблему, добавив к транзистору тонкую сеть углеродных нанотрубок. Такой транзистор может переключать электронные функции экрана, требуя при этом незначительное напряжение, что позволит создавать большие по размеру плоские экраны. Далее в дизайне нанoeлектронных устройств был сделан еще шаг и исследователи объединили слой органических светоизлучающих диодов с транзисторами на основе органических нанотрубок, получив эффективный органический светоизлучающий транзистор – устройство, способное одновременно выполнять для электронного экрана функции как транзистора, так и источника света. Полученное устройство состоит из сети нанотрубок, нанесенной на тонкий слой диэлектрика. Такая композиция размещена между двумя электродами, над одним из которых расположен светоизлучающий материал.

Пропускания тока небольшой силы через материал оказывается достаточным для генерации излучения различных цветов. Введение в систему различных органических полупроводников позволило исследователям получить красный, зеленый и синий цвета без необходимости применения отдельных транзисторов и органических светоизлучающих диодов.

Из-за большей по сравнению с кремнием и многими полупроводниками подвижности носителей заряда графен считается перспективным материалом для электронных приборов. К числу его недостатков относят отсутствие в немодифицированном графене запрещенной зоны, а также технологическую сложность получения больших однородных листов. Сразу три группы физиков: из Австрии [10], Гонконга [11] и из США [12] представили прототипы фотодетекторов на основе графена. Эти устройства преобразуют инфракрасные оптические сигналы в электрические импульсы, причем эффективность графеновых фотодетекторов выше, чем у аналогичных устройств традиционного типа.

Все три разработки несколько различаются между собой, однако все они используют ключевую особенность графена, способность преобразовывать в электрические импульсы световые кванты с разной энергией. Традиционные фотодетекторы работают за счет того, что квант света передает носителю заряда энергию, достаточную для преодоления потенциального барьера, зазора между энергетическими уровнями в полупроводнике, но графен не является «полноценным» полупроводником и у него нет так называемой запрещенной зоны.

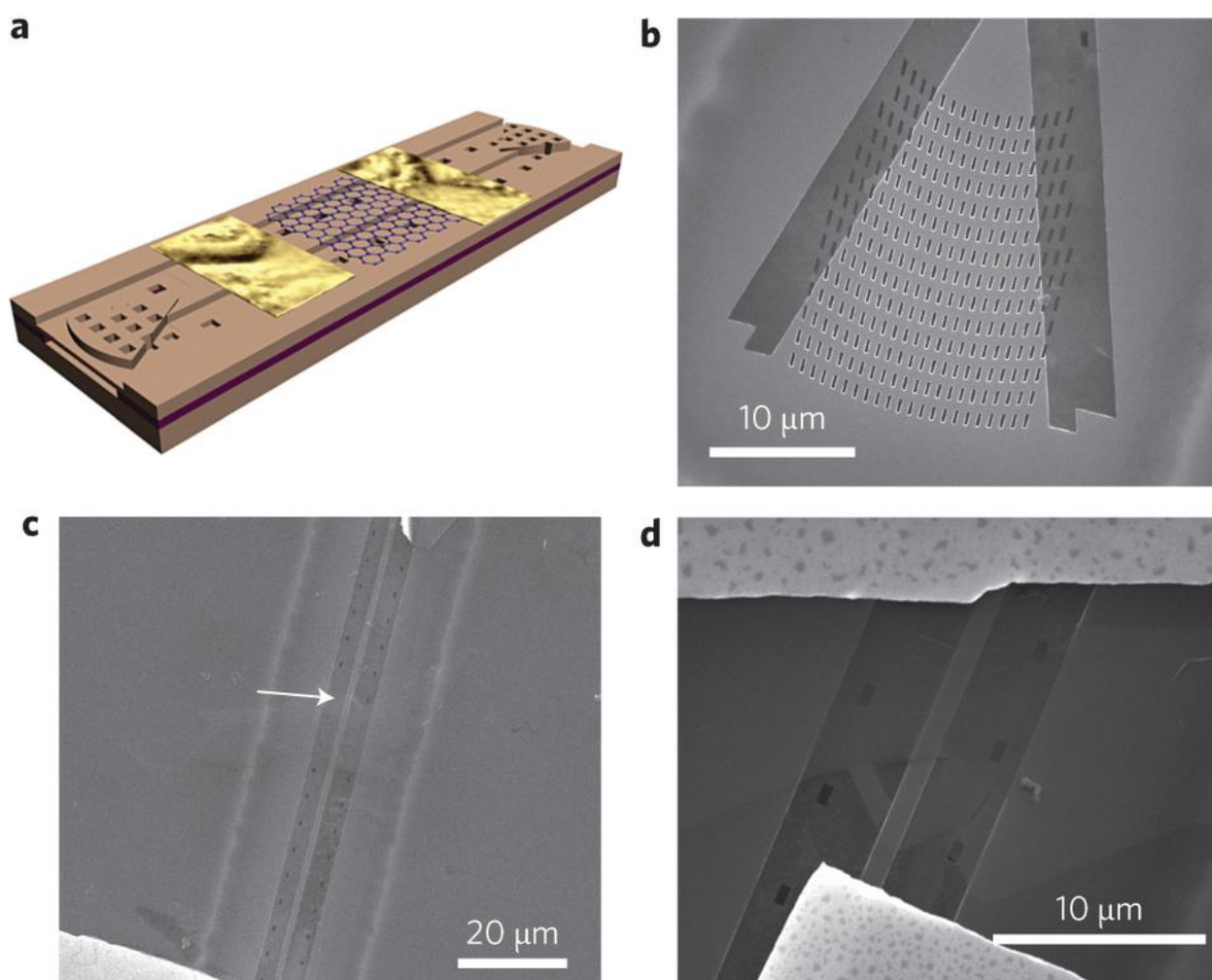


Рис. 4. Схематическое изображение фотодетектора на основе графена.

Список литературы.

1. S.J. Tans, A.R. M. Vershueren, C. Dekker Room temperature transistor based on a single carbon nanotubes. // Nature (London). – 1998. – V. 393. – P. 49-51

2. C.Wang, J. Zhang, K. Ryu, A. Badmaev, L. G. D. Arco, C. Zhou. Wafer-Scale Fabrication of Separated Carbon Nanotube Thin-Film Transistors for Display Applications. // Nano Lett. –2009.– Т.9 , №12.– P. 4285–4291
3. C. Masarapu, J. T.Ok, B. Wei. Thermal Stability of Carbon-Nanotube-Based Field Emission Diodes.// J Phys. Chem. C. – 2007. – V.111, № 32. – C.12112 – 12115
4. M. Rinkio, A. Johansson, G.S. Paraoanu, P.Torma. High-Speed Memory from Carbon Nanotube Field-Effect Transistors with High-K Gate Dielectric.// Nano Lett. –2009. – V. 9, №2, P. 643-647
5. А.В.Елецкий. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства. / А.В.Елецкий. //УФН. – 2002.– Т.172, № 4.– С.401–438
6. M.M. Shulaker, G. Hills, N.Patil, Hai Wei, H. Y. Chen, H. S. P. Wong, S. Mitra Carbon nanotube computer// Nature.–2013.– V. 501.–P. 526–530
7. J. N. Tey, I P. M. Wijaya, Z. Wang, W. H. Goh. et al. Laminated, microfluidic-integrated carbon nanotube based biosensors //Appl. Phys. Lett. – 2009.–V.94.–P.013107
8. K. Jensen, Kwanpyo Kim, A. Zettl. An atomic-resolution nanomechanical mass sensor // Nature Nanotechnology. –2008.–V. 3.– P. 533–537
9. M. A. McCarthy, B. Liu, E. P. Donoghue, I. Kravchenko, D. Y. Kim, F. So, A. G. Rinzler Low-Voltage, Low-Power, Organic Light-Emitting Transistors for Active Matrix Displays// Science.– 2011.– V. 332.–P. 570-573.
10. A. Pospischil, M. Humer, M. M. Furchi, D. Bachmann, R. Guider, T. Fromherz, T. Mueller. CMOS-compatible graphene photodetector covering all optical communication bands // Nature Photonics . –2013– V. 7.– P.892–896
11. X. Wang, Z. Cheng, K. Xu, H. K. Tsang, J. B. Xu High-responsivity graphene/silicon-heterostructure waveguide photodetectors // Nature Photonics.– 2013.– V.7.– P. 888–891
12. X. Gan, R.J. Shiue, Y. Gao, I. Meric, T. F. Heinz et.al Chip-integrated ultrafast graphene photodetector with high responsivity // Nature Photonics.– 2013–V. 7.– P. 883–887

Материал разработан в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, соглашение 14.В37.21.1094.