ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTRONICS

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.3.066.5

Р.А. Браже, Д.А. Долгов

НАНОРЕЛЕ И ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА И ГЕКСАГОНАЛЬНОГО НИТРИДА БОРА

Браже Рудольф Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, окончил физический факультет Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского, заведующий кафедрой «Физика» Ульяновского государственного технического университета. Имеет множество научных работ, в том числе монографии, учебные пособия и авторские свидетельства на изобретения. Область научных интересов – волновые процессы, наноматериалы и наноэлектроника, элементы вычислительной техники и систем управления. [e-mail: brazhe@ulstu.ru].

Долгов Дмитрий Андреевич, окончил инженерно-физический факультет высоких технологий Ульяновского государственного университета. Аспирант кафедры «Физика» УлГТУ. Имеет статьи в области физики наноструктур и элементов систем управления. [e-mail: deimosrffi@yandex.ru].

Аннотация

В последнее время весьма актуальной стала проблема создания новых типов запоминающих устройств, обладающих энергонезависимой памятью и соизмеримых по быстродействию и количеству циклов перезаписи с оперативными запоминающими устройствами. Однако микроминиатюризация большинства известных устройств подобного рода, по-видимому, уже достигла пределов масштабирования. В связи с этим многие разработчики вычислительной техники включились в работу по созданию маломощных процессоров на основе наноэлектромеханических релейных элементов.

В данной работе нами предлагаются нанореле и логические элементы на основе графена и гексагонального нитрида бора, обладающие пьезоэлектрическими свойствами. Описаны их конструктивные особенности, принципы работы и ожидаемые характеристики.

Отмечается, что для успешной практической реализации предложенной идеи целесообразно провести заключительные работы по синтезу новых двумерных пьезоэлектрических и электропроводящих наноструктур, позволяющих понизить управляющее напряжение и расстояние между контактами реле в выключенном состоянии.

Габаритные размеры предлагаемых пьезоэлектрических нанореле: 20 мкм × 10 нм.

Ключевые слова: графен, гексагональный нитрид бора, нанореле, логические элементы.

doi: 10.35752/1991-2927-2021-2-64-105-110

NANORELAY AND LOGICAL ELEMENTS BASED ON GRAPHENE AND HEXAGONAL BORON NITRIDE

Rudolf Aleksandrovich Brazhe, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Physics of Ulyanovsk State Technical University; graduated from the Faculty of Physics of Saratov State

University named after N.G. Chernyshevsky; an author of many scientific papers, monographs, tutorials, and invention certificates; research interests are in the field of wave processes, nanomaterials, and nanoelectronics, computational and control systems elements. e-mail: brazhe@ulstu.ru.

Dmitrii Andreevich Dolgov, graduated from the Engineering and Physics Faculty of High Technology of Ulyanovsk State University; a postgraduate student at the Department of Physics of UISTU; an author of publications in the field of physics of nanostructures and control system elements. e-mail: deimosrffi@yandex.ru.

Abstract

Recently, the problem of creating new types of storage devices having non-volatile memory and commensurate in speed and number of rewriting cycles with operational storage is getting more relevant. However, microminiaturization of most known devices of this kind appears to have already reached scaling limits. In this regard, many computer developers have become involved in the development of low-power processors based on nanoelectromechanical relay elements.

The article proposes nanorelay and logical elements based on graphene and hexagonal boron nitride having piezoelectric properties. It describes their design features, working principles and expected characteristics are described.

It is noted that for the successful practical implementation of the proposed idea it is advisable to carry out additional works on synthesis of new two-dimensional piezoelectric and electroconductive nanostructures, which allow to reduce control voltage and the distance between relay contacts even in the off state.

Keywords: graphene, hexagonal boron nitride, nanorelay, logical elements.

ВВЕДЕНИЕ

Создание быстродействующих вычислительных устройств, оперирующих большими объемами информации, требует все большей микроминиатюризации ячеек как статической, так и динамической памяти (Static Random Access Memory – SRAM и Dynamic Random Access Memory – DRAM соответственно). Первые в настоящее время выполняются, главным образом, на триггерах, а вторые – на конденсаторах (точнее, используется емкость между затвором и истоком полевого транзистора, выполняющего роль ключа). SRAM-ячейки энергонезависимы и используются в запоминающих устройствах (ЗУ) типа носителей информации, а DRAM-ячейки энергозависимы, но более быстродействующие и используются в оперативных запоминающих устройствах (ОЗУ) [1].

В последнее время внимание разработчиков элементной базы вычислительных устройств все больше привлекают новые типы ЗУ, обладающие энергонезависимой памятью (Non Volatile Random Access Memory – NVRAM) и сопоставимые с ОЗУ по быстродействию и количеству циклов перезаписи [2, 3]. В качестве кандидатов на такую «универсальную память» рассматриваются следующие устройства: магниторезистивная память (Magnetoresistive Random Access Memory – MRAM), сегнетоэлектрическая память (Ferroelectric Random Access Memory – FRAM), память с изменением фазового состояния (Phase Change Memory – PCM), память на базе программируемой металлизации ячейки (Programmable Metallization Cell – PMC), резистивная память (Resistive Random Access Memory – RRAM) и др.

При этом на пути многих из перечисленных видов памяти встала проблема, сопутствующая микроминиатюризации. В случае транзисторов – это потери мощно-

сти, обусловленные токами утечки, которые приближаются к потребляемой мощности. В случае FRAM, PCM, PMC и других устройств – приближение к физическим пределам масштабирования, например, к размерам сегнетоэлектрических доменов.

Понимая актуальность этой проблемы, многие зарубежные фирмы и университеты (IBM, STMicroelectronics, Федеральная политехническая школа Лозанны из Швейцарии, Королевский технологический институт Швеции и др.) включились в работу по созданию маломощных процессоров на основе наномасштабных механических реле [4], фактически возвращаясь к этапу электромеханических вычислительных устройств середины прошлого века.

Справедливости ради следует отметить, что еще в 2006 году российские ученые Л. Маслов и А. Попов предложили схемное решение создания электромеханического реле на основе двустенных и трехстенных углеродных нанотрубок и их использование в ячейках наноэнергонезависимой памяти [5–7].

В данной работе мы предлагаем технологически более простой способ создания нанореле и логических элементов на их основе – использование пьезоэлектрических свойств 2D-гексагонального нитрида бора в сочетании с металлическими электродами из графена.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ h-BN

Имея такую же, что и графен (Gr), кристаллическую структуру с почти таким же расстоянием между атомами ($1,42 \text{ \AA}$ у Gr и $1,45 \text{ \AA}$ у двумерного нитрида бора в его гексагональной модификации – h-BN), последний является не металлом, как Gr, а пьезоэлектриком. Это обу-

Рис. 1. Фрагмент атомной структуры h-BN, в котором выделена элементарная ячейка. Оси x_1 , x_2 кристаллофизической системы координат соответствуют базовой ориентации структуры

словлено тем, что в структуре h-BN (рис. 1) атомы трехвалентного бора, чередуясь с атомами пентавалентного азота, нарушают centrosymmetrichность кристаллической ячейки, что приводит к появлению пьезоэффекта в плоскости структуры [8, 9]. Матрица пьезомодуля для d_{ij} изоморфного графену h-BN имеет вид:

$$\begin{pmatrix} 0 & -d_{22} \\ 0 & d_{22} \\ -2d_{22} & 0 \end{pmatrix}.$$

Уравнение обратного пьезоэффекта, связывающее относительную деформацию 2D-структуры ε_m и напряженность приложенного электрического поля E_n , записывается в следующем виде:

$$\varepsilon_m = d_{mn} E_n; m = 1, 2, 3; n = 1, 2. \quad (1)$$

С учетом структуры матрицы пьезомодулей уравнение (1) распадается на три уравнения:

$$\varepsilon_1 = -d_{22} E_2; \varepsilon_2 = d_{22} E_2; \varepsilon_3 = -2d_{22} E_1. \quad (2)$$

Из (2) следует, что приложение электрического поля вдоль оси x_2 вызывает деформацию растяжения вдоль этой оси и одновременно деформацию сжатия вдоль оси x_1 , а приложение электрического поля вдоль оси x_1 вызывает деформацию сдвига в плоскости (x_1, x_2) .

Значение единственной независимой компоненты матрицы пьезомодулей для h-BN $d_{22} = 0,56 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н (или м/В).

ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИП РАБОТЫ НАНОРЕЛЕ

Конструкция предлагаемого нанореле изображена на рисунке 2. Цепь управления реле состоит из графеновых нанолент 4, между которыми находится монослой нитрида бора 5, обладающий пьезоэффектом. Изоморфность Gr и h-BN в сочетании с близостью их межатомных расстояний позволяет идеально срастить эти материалы. Контактная пара управляемой цепи также состоит из графеновых электродов, подвижного 7 и неподвижного 8, работающих по принципу «нож в ножны».

Рис. 2. Устройство нанореле с нормально разомкнутыми контактами:

1 – диэлектрическая подложка из карбида кремния (SiC); 2 – 6H-SiC подслей; 3 – Au подслей; 4 – графен (Gr); 5 – нитрид бора (h-BN); 6, 7, 8 – контакты. Нанореле с нормально замкнутыми контактами отличается от изображенного тем, что контакты 7, 8 в исходном состоянии замкнуты, а к контактам 6, 7 приложено напряжение противоположной полярности

Неподвижные графеновые электроды 6, 8 для фиксации на подложке нанесены путем термодесорбции на промежуточный подслей из карбида кремния 2, интеркалированного атомами водорода (6H-SiC). При приложении управляющего напряжения к наноленте 5 из нитрида бора, ее правый конец с ножевидным наконечником 7 из графена свободно скользит по золотому подслою 3 и по достижении определенной величины напряжения замыкает цепь управления. Реле срабатывает. Наличие Au подслоя обусловлено недавно открытым [10] свойством сверхмалого трения (англ. superlubricity – сверхмаслянистость) графена по поверхности золота.

Пьезоэлектрическая нанолента из h-BN ориентирована на подложке таким образом, что имеет место продольный пьезоэффект, описываемый вторым уравнением из (2), из которого легко получить выражение для абсолютного растяжения Δl пьезоэлектрика под воздействием напряжения U :

$$\Delta l = d_{22} U. \quad (3)$$

Из (3) видно, что свободный ход ножевого контакта описываемого нанореле на единицу приложенного напряжения в точности равен значению пьезомодуля d_{22} .

ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОРЕЛЕ

На рисунке 3 показаны релейно-контактные эквиваленты некоторых основных логических элементов, выполненных с использованием пьезоэлектрических нанореле на основе графена и гексагонального нитрида бора. Ниже, для удобства понимания их принципов работы, показаны соответствующие таблицы истинности.

Рис. 3. Релейно-контактные эквиваленты основных логических элементов на нанореле: а – конъюнкция (И), б – дизъюнкция (ИЛИ), в – отрицание (НЕ), г – дизъюнкция с отрицанием (ИЛИ-НЕ)

Таблицы истинности логических элементов, изображенных на рисунке 3

2И

Вход X1	Вход X2	Выход Y
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

2ИЛИ

Вход X1	Вход X2	Выход Y
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

НЕ

Вход X	Выход Y
0	1
1	0

2ИЛИ-НЕ

Вход X1	Вход X2	Выход Y
0	0	1
1	0	0
0	1	0
1	1	0

Логический элемент «2И» (на простом примере двух входов) содержит два последовательно включенных нанореле с нормально разомкнутыми контактами (рис. 3а). Как видно из соответствующей таблицы, выходной сигнал в управляющей цепи появляется лишь в том случае, когда входной сигнал подается на оба входа. Здесь предполагается, что в двоичной системе кодирования 0 соответствует отсутствию сигнала, а 1 – его наличию.

Логический элемент «2ИЛИ» выполнен на основе двух параллельно включенных нанореле с нормально замкнутыми контактами (рис. 3б).

Логический элемент «НЕ» инвертирует входной сигнал, который подается одновременно на два нанореле, одно из которых имеет нормально разомкнутые контакты, а другое – нормально замкнутые (рис. 3в).

Для выполнения операции дизъюнкции с отрицанием в соответствующем логическом элементе (рис. 3г) наряду с каждым из двух нанореле с нормально разомкнутыми контактами предусмотрена подача входного сигнала на два нанореле, выполняющих обратное действие.

ОЖИДАЕМЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Как видно из формулы (3) и значения пьезоконстанты d_{22} для h-BN, при подаче на вход управляющей цепи описываемого нанореле сигнала напряжением ~ 10 В его подвижный контакт перемещается всего на $0,56 \text{ \AA}$, что составляет около 0,4 межатомного расстояния. Этого достаточно, чтобы создать или прервать контакт. Однако, чтобы не допустить электрического пробоя пьезоэлектрика (в большинстве диэлектриков $E_0 = 10^6 - 10^7$ В/м), необходимо, чтобы его продольный размер l (см. рис. 2) значительно превышал 1 мкм и был равен $l \approx 10$ мкм.

Было бы лучше в качестве пьезоэлектрика h-BN в нанореле описываемого типа использовать более сильные пьезоэлектрические 2D-структуры. Например, в октаграфеноподобном наноаллотропе нитрида бора (BN)₄₄ продольный пьезомодуль превышает значение d_{22} для h-BN по величине почти в 2 раза [3], и его удобно применять в сочетании с октаграфеновыми (C)₄₄ контактными электродами. Но эти материалы еще нужно научиться синтезировать и, кроме того, под них нужно подбирать другую диэлектрическую подложку, поскольку 6H-SiC будет плохо сочетаться с (BN)₄₄ и (C)₄₄ по межатомным расстояниям и, вряд ли, сможет обеспечить хорошую адгезию указанных наноаллотропов с подложкой.

Однако, несмотря на имеющиеся технологические и технические сложности, которые еще следует преодолеть, налицо явное преимущество предлагаемых наноэлектромеханических пьезоэлектрических реле для использования в наноэлектронике, системах управления и вычислительной технике. Это преимущество обусловлено возможностью значительно большей миниатюризации элементной базы в перечисленных

областях техники. Действительно, габаритные размеры одного такого нанореле могут достигать по площади $20 \text{ мкм} \times 10 \text{ нм}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из изложенного следует, что нанореле и логические элементы из графена и гексагонального нитрида бора, обладающего пьезоэлектрическими свойствами, при соответствующей доработке имеют шансы занять достойное место в наномасштабной элементной базе вычислительной техники и систем управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гук М. Аппаратные средства IBM PC. Энциклопедия, 2 изд. СПб. : Питер, 2003. 923 с.
2. Overview of emerging non-volatile memory technologies. J.S. Meena et al. // *Nanoscale Res. Lett.* 2014. V. 9, №1. pp. 526–533.
3. Coughlin T., Grochowski E. Thanks for the memories: Emerging non-volatile memory technologies // *Nanoscale Research Lett.* 2014. № 9. Mat. of Storage Developer Conference. Article number 526. pp. 1–33.
4. Clark P. IBM, ST go back to the future with nanorelay logic. URL : <https://www.radiolocman.com/news/new.html?di=143870> (дата обращения: 24.09.2012).
5. Maslov L. Concept of nonvolatile memory based on multiwall carbon nanotubes // *Nanotechnology.* 2006. V. 17. pp. 2475–2482.
6. Nanoelectromechanical systems based on multiwalled nanotubes: nanothermometer, nanorelay, and nanoactuator. A.M. Popov et al. // *Phys. Status Solidi A.* 2007. V. 2011. pp. 1911–1917.
7. Лозовик Ю.Е., Попов А.М. Свойства и нанотехнологические применения нанотрубок // *УФН.* 2007. Т. 50, № 7. С. 786–799.
8. Droth M., Burkard G., Pereira V.M. Piezoelectricity in planar boron nitride via a geometric phase // *Phys. Rev. B.* 2016. V. 94. pp. 075404–075410.
9. Браже Р.А., Долгов Д.А. Пьезоэлектрические свойства 2D наноаллотропов нитрида бора // *ФТТ.* 2019. Т. 61, вып. 11. С. 2190–2194.
10. Superlubricity of graphene nanoribbons on gold surfaces / S. Kawai et al. // *Sciences.* 2016. V. 351, issue 6276. pp. 957–961.

REFERENCES

1. Hook M. *Apparatnye sredstva IBM PC. Entsiklopedia*, 2 izd. [IBM PC Hardware. Encyclopedia, 2nd Edition]. St. Petersburg, Piter Publ., 2003. 923 p.
2. Meena J.S. et al. Overview of Emerging Non-Volatile Memory Technologies. *Nanoscale Res. Lett.*, 2014, vol. 9, no. 1, pp. 526–533.
3. Coughlin T., Grochowski E. Thanks for the Memories: Emerging Non-Volatile Memory Technologies. *Nanoscale Research Lett. Mat. of Storage Developer Conference.* 2014, no. 9, Article number 526, pp. 1–33.

4. Clark P. *IBM, ST go back to the Future with Nanorelay Logic*. Available at: <https://www.radiolocman.com/news/new.html?di=143870> (accessed 24.09.2012).
5. Maslov L. Concept of Nonvolatile Memory based on Multiwall Carbon Nanotubes. *Nanotechnology*, 2006, vol. 17, pp. 2475–2482.
6. Popov A.M. et al. Nanoelectromechanical Systems based on Multiwalled Nanotubes: Nanothermometer, Nanorelay, and Nanoactuator. *Phys. Status Solidi A.*, 2007, vol. 204 (6), pp. 1911–1917.
7. Lozovik Iu.E., Popov A.M. Svoistva i nanotehnologicheskie primeneniia nanotrubok [Properties and Nanotechnological Applications of Nanotubes]. *UFN* [Physics – Uspekhi. Advances in Physical Sciences], 2007, vol. 50, no. 7, pp. 786–799.
8. Droth M., Burkard G., Pereira V.M. Piezoelectricity in Planar Boron Nitride via a Geometric Phase. *Phys. Rev. B.*, 2016, vol. 94, pp. 075404–075410.
9. Brazhe R.A., Dolgov D.A. Piezoelectricheskie svoistva 2D nanoallotropov nitrida bora [Piezoelectric Properties of 2D Nanoallotropes of Boron Nitride]. *FTT* [Physics of Solids], 2019, vol. 61, iss. 11, pp. 2190–2194.
10. Kawai S. et al. Superlubricity of Graphene Nanoribbons on Gold Surfaces. *Sciences*, 2016, vol. 351, iss. 6276, pp. 957–961.