

УДК 621.38.049.77.002.3

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОЛЕКУЛЫ ДНК В КАЧЕСТВЕ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА

Н.В. НОВИК, Ю.А. БЕРАШЕВИЧ, В.Е. БОРИСЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 29 мая 2003

Предложена электрическая эквивалентная схема молекулы ДНК, которая описывает перенос носителей заряда через молекулу и состоит из параллельно включенных туннельных и выпрямляющих диодов, проводимость которых определяется скоростью переноса носителей заряда через различные последовательности динуклеотидов посредством туннельного и термоактивированного механизмов переноса соответственно. Показана возможность создания приборных структур на основе молекулы ДНК, выполняющих логические операции инверсии, дизъюнкции и конъюнкции. Преимуществами таких приборов являются возможность регулирования проводимости молекулы с помощью изменения набора образующих ее нуклеотидных оснований, высокая скорость протекания процессов переноса, порядка 10^{-14} – 10^{-12} с, широкий диапазон рабочих температур.

Ключевые слова: молекула ДНК, транспорт носителей заряда, переходные характеристики

Введение

Научно-техническое направление, связанное с исследованием и возможным применением молекул ДНК для реализации новых сверхбыстродействующих устройств электронной обработки информации, в последние годы интенсивно развивается и во многих отраслях современной науки в настоящее время занимает ключевые позиции [1, 2]. Это обусловлено большой перспективностью таких структур для изготовления уникальных наноэлектронных приборов и возможностью их использования в качестве модельных объектов для изучения поведения различных биологических систем.

Согласно экспериментальным данным [1–3], молекула ДНК любой конфигурации отличается возможностью совмещения с различными материалами благодаря имеющимся в ее полимерной цепи химически активным концам. В перспективе это позволит помещать ее как между металлическими контактами, так и между полупроводниковыми контактами. Для использования структуры молекулы ДНК в качестве активного переключающего элемента в твердотельных приборах возникает необходимость создания адекватного аппарата моделирования характеристик проектируемого устройства в составе интегральных схем. Одной из важнейших составляющих такого конструкторского инструментария является разработка эквивалентной схемы, построенной на базе молекулы ДНК. Кроме того, функция базовой приборной структуры, заключающаяся в переключении двух основных состояний, соответствующих высокому и низкому уровням сигнала, т. е. высокопроводящих участков молекулы на низкопроводящие, может обеспечить создание на ее основе логических переключающих элементов, однако эти возможности не изучены в полной мере.

Целью данной работы является разработка эквивалентной схемы молекулы ДНК и логических элементов, пригодных для использования в стандартных пакетах схемотехнического моделирования типа Pspice.

Эквивалентная электрическая схема молекулы ДНК

Полинуклеотидная последовательность в молекуле ДНК может быть представлена в виде периодической наноразмерной структуры, в которой за счет различного энергетического положения нуклеотидных оснований образуется система потенциальных барьеров и ям. При этом тимин-адениновые (А-Т) основания выполняют функцию потенциального барьера как для дырок, так и для электронов, а гуанин-цитозиновые (G-C) — потенциальной ямы (рис. 1) [4].

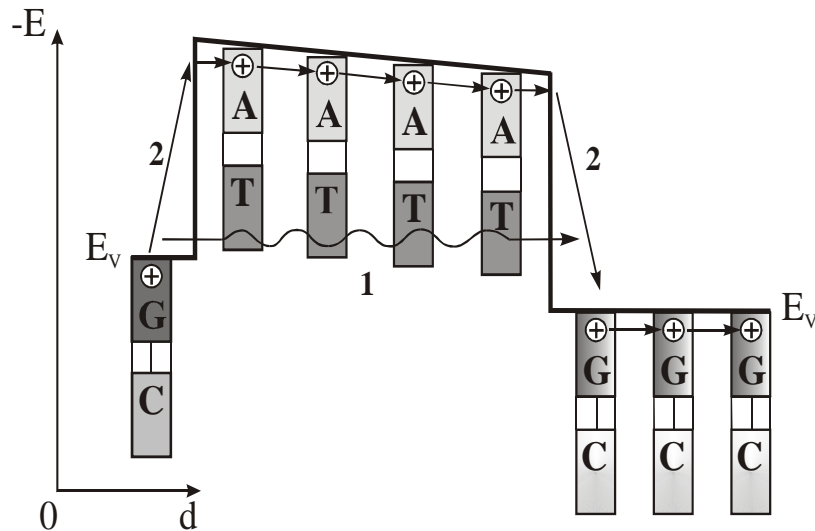


Рис. 1. Энергетическая диаграмма и механизмы переноса дырок в 5'-G-(A)₄-GGG-3' молекуле ДНК: 1 — туннельный механизм переноса, 2 — термоактивированный перенос носителей заряда

Из результатов экспериментальных данных следует [3, 5, 6], что перенос дырок в молекуле ДНК является более эффективным по сравнению с электронным переносом, что связано с иерархией потенциалов окисления нуклеотидных оснований ($G < A < C, T$). Низкоэнергетическое расположение азотистого основания гуанина G обеспечивает наилучшие условия для захвата, последующего возбуждения и перемещения дырки от одного нуклеотидного основания к другому, что открывает возможность для наблюдения транспорта носителей вдоль молекулы ДНК, в то время как захват и возбуждение отрицательного носителя заряда в молекуле затруднены из-за подобия потенциалов окисления тимина и цитозина [7]. При этом при образовании дуплетов GG и триплетов GGG в структуре молекулы ДНК увеличивается вероятность захвата дырки гуанином за счет изменения его потенциала окисления [6].

Рассмотрим возможные механизмы переноса носителей заряда в молекуле ДНК. В случае образования потенциального барьера, сформированного нуклеотидной А-Т парой, расположенной между двумя парами G-C динуклеотидов, возбужденная дырка может перескакивать или туннелировать через потенциальный барьер, как представлено на рис. 1. Увеличение числа А-Т пар ведет к росту ширины потенциального барьера. В этом случае вероятность туннелирования экспоненциально уменьшается, а термоактивированный перенос осуществляется в несколько этапов. Первый этап включает термоактивированный захват дырки первой А-Т парой, последующий электронный суперобмен между двумя одинаковыми парами и переход дырки в G-C пару (рис. 1). При этом ввиду перекрытия π -электронных орбиталей нуклеотидных оснований, которое имеет наибольшее влияние в случае идентично расположенных динуклеотидов вдоль полимерной цепи ДНК, предполагается сохранение энергии и импульса переносимых таким образом носителей заряда [8]. Механизм такого транспорта носителей заряда был описан в рамках туннельной суперобменной теории электронного переноса [8].

Изменение пространственного расположения и числа нуклеотидных остатков в спирали молекулы ДНК приводит к варьированию условий, определяющих механизм переноса в различных молекулярных последовательностях, и влияет как на величину скорости протекания процессов переноса, так и на время перемещения носителей заряда по полимеру. Положение донорного участка молекулы E_d на более высоком энергетическом уровне относительно уровня акцепторной области E_a обеспечивает наиболее выгодные условия для перемещения возбужденного носителя заряда через углеводно-фосфорный скелет ДНК, т. е. при выполнении условия $E_d \geq E_a$. Такое условие соблюдается в $5'$ -G-(A) $_n$ -GGG- $3'$ конфигурации молекулы ДНК. Увеличение числа последовательно соединенных пар гуанина за счет перекрывания электронных орбиталей ведет к появлению энергетического зазора между $5'$ -G участком и GGG- $3'$. Вследствие существования этого энергетического зазора между G-нуклеотидом и триплетом GGG, равного порядка $E_G - E_{GGG} = 0,68$ эВ [8], появляются идеальные условия для переноса возбужденных дырок от донора, в качестве которого выступает $5'$ -G, к акцептору. При этом перенос носителей заряда в последовательно соединенных идентичных участках молекулы осуществляется за счет делокализации π -электронов при перекрывании их электронных орбиталей, имеющих возможность свободно перемещаться вдоль колец нуклеотидов.

Для моделирования протекающих в структуре молекулы ДНК механизмов переноса примем следующие допущения. Перенос носителей заряда в направлении действия приложенного внешнего смещения значительно выше, чем в противоположном направлении, перенос носителей заряда через потенциальный барьер рассматривается как одномерный процесс, а составляющие импульса носителя, простирающиеся в других направлениях, перпендикулярных направлению переноса, задаются как фиксированные параметры.

Исходя из принятых предположений, темп носителей заряда посредством термоактивированного механизма переноса в приближении термодиффузионной теории определяется как

$$k^{hop} = \frac{4\pi n^* k_B^2 T^2}{h^3} \left(1 - \exp\left(\frac{qnV_{bias}}{ak_B T}\right) \right) \cdot \left(\int_0^W \exp\left(\frac{\Delta E - \sqrt{q^3 V_{bias} n (8a\pi\epsilon x)^{-1}}}{k_B T}\right) dx \right)^{-1}, \quad (1)$$

где h — постоянная Планка; m_e^* — эффективная масса электрона; k_B — постоянная Больцмана; T — температура; a — число нуклеотидных оснований в молекуле ДНК; n — число нуклеотидных оснований, образующих потенциальный барьер; $\Delta E \propto k_B T$ — высота потенциального барьера; ϵ — диэлектрическая проницаемость барьера; V_{bias} — внешнее приложенное напряжение.

Темп туннельного переноса можно описать в рамках аппроксимации Вентцеля–Крамерса–Бриллюэна [9]:

$$k^{tun} = \frac{4\pi n^*}{h^3 d} \int_E^0 [F(E) - F(E + qV_{bias} a / n)] dE \int_{\Delta E}^0 D(E - E_{\perp}) dE_{\perp}, \quad (2)$$

где $d = aW$ — длина молекулы; $F(E)$ — функция распределения Ферми–Дирака; $D(E)$ — вероятность туннелирования, которая равна:

$$D = \exp\left(-\frac{4\pi}{h} \int_{x_1}^{x_2} \left[2m^* \left[\Delta E - \left[\frac{q^3 n V_{bias} / a}{4\pi\epsilon d} \right]^{1/2} - E + E_{\perp} \right] \right]^{1/2} dx \right), \quad (3)$$

где E — энергия туннелирования электронов; x_1, x_2 — классические точки поворота; E_{\perp} — энергия электрона, связанная с поперечной составляющей импульса.

Для учета взаимосвязи явлений на всех периодах структуры ДНК рассмотрим кинетику изменения заряда в i -й квантовой яме структуры, описываемую следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = G_p - k_1^{hop} - k_1^{tun}, \\ \frac{dp_i}{dt} = k_{i-1}^{hop} + k_{i-1}^{tun} - k_i^{hop} - k_i^{tun}, \\ \frac{dp_N}{dt} = k_{N-1}^{hop} + k_{N-1}^{tun} - k_N^{hop} - k_N^{tun}, \end{cases} \quad (4)$$

где i — период структуры ($i=1\dots N$); G_p — скорость возбуждения дырки; p_i — концентрация дырок в i -яме; k_i^{hop} , k_i^{tun} — темп термоактивированного и туннельного переноса носителей заряда через i -потенциальный барьер, сформированный набором А-Т пар. Для описания переноса электронов через полинуклеотидную структуру молекулы можно построить аналогичную систему кинетических уравнений.

Для моделирования переходных процессов, протекающих в периодической структуре молекулы ДНК, находим решение системы кинетических уравнений (4) в нестационарных условиях. Основным параметром при этом является время переключения приборной структуры (рис. 1) из одного состояния в другое, что позволяет определить быстродействие этого прибора и моделировать работу переключающего элемента в импульсном режиме. Так, за время распространения импульса напряжения t_1 захваченные А-Т парами дырки накапливаются в ямах, при этом уравнение, описывающее процесс накопления в нестационарных условиях, имеет вид

$$p_i(t_1) = \frac{p_{i-1}(t_1) \cdot \tau_i}{\tau_{i-1}} (1 - \exp(-t_1 / \tau_i)) + p_i(t=0) \cdot \exp(-t_1 / \tau_i), \quad (5)$$

$$\tau_i = \frac{\tau_i^{hop} \cdot \tau_i^{tun}}{\tau_i^{hop} + \tau_i^{tun}}, \quad (6)$$

где τ_i^{hop} , τ_i^{tun} определяются из темпов переноса носителей заряда [7]. При этом первый член уравнения описывает процесс накопления носителей заряда в i -яме за счет прихода носителей из $(i-1)$ ямы. Второй член уравнения учитывает рассасывание носителей заряда в i -яме и имеет место в случае ненулевой концентрации носителей заряда в ямах при подаче импульса напряжения.

За время задержки импульса t_2 происходит рассасывание дырок, в течение которого импеданс переключающего элемента сохраняется низким и выходной ток определяется внешней цепью. При этом темп генерации дырок на инжектирующем контакте принимается равным нулю. В этом случае решение системы кинетических уравнений (4) для процесса рассасывания на всех периодах структуры молекулы ДНК в нестационарных условиях имеет вид

$$p_i(t_2) = \frac{p_{i-1}(t_2) \tau_i}{\tau_{i-1}} (1 - \exp(-t_2 / \tau_i)) + p_i(t=0) \exp(-t_2 / \tau_i). \quad (7)$$

Причем для первой ямы, так как генерация носителей заряда на инжектирующем контакте принимается равной нулю, это уравнение выглядит следующим образом:

$$p_1(t_2) = p_1(t=0) \exp(-t_2 / \tau_1). \quad (8)$$

Предложенная кинетическая модель переноса носителей заряда через систему потенциальных ям и барьеров описывает транспорт носителей заряда в молекуле ДНК через темп перехода носителей в i -ю яму и темп ухода из этой ямы посредством упругого туннелирования и термоактивированного переноса заряда через потенциальные барьеры.

Помещение молекулы ДНК между двумя металлическими контактами и приложение к ее структуре внешнего электрического поля увеличивает смещение энергетических зон донорного и акцепторного уровней в контактных областях молекулы. В результате выполнения условия $E_d > E_a$ возникает беспрепятственный переход носителей заряда от одной квантовой ямы к другой посредством двух упомянутых выше механизмов, что можно охарактеризовать как прямое включение молекулы ДНК.

Иначе, в случае обратного смещения происходит уменьшение энергетического зазора между донором и акцептором вплоть до появления условия, когда $E_d < E_a$. Соответственно при небольшом обратном смещении, когда условие $E_d < E_a$ еще не достаточно, туннелирование носителей заряда в молекуле ДНК отсутствует, а высокий потенциальный барьер между E_a и валентной зоной А-Т пар уменьшает вероятность переноса носителей заряда по термоактивированному механизму. При достаточно большом внешнем напряжении ($V_{bias} \geq E_a - E_d$) появляется компонента туннельного переноса, и общий перенос носителей заряда через структуру экспоненциально возрастает с увеличением внешнего смещения. Однако скорость экспоненциального роста ниже, чем для прямого смещения, за счет разницы потенциальных барьеров в структуре для возбужденных носителей заряда в двух этих случаях. Таким образом, поведение молекулы ДНК при приложении к ней внешнего напряжения V_{bias} определенной полярности и величины можно положить в основу работы переключающего элемента.

На основе описанных выше закономерностей электронного переноса носителей заряда в молекуле ДНК была предложена следующая приборная структура на основе 5'-G-(A)₃-GGG-3' последовательности молекулы ДНК (рис. 2). Схема переключающего элемента включает три параллельных диода: туннельный диод D1, в основе работы которого лежит практически независимый от температуры туннельный перенос носителей заряда, и два выпрямляющих диода D2 и D3, характеризующихся экспоненциальной зависимостью тока от температуры. Вторым выпрямляющий диод D3 учитывает дополнительный процесс термоактивированного переноса носителей заряда, имеющий место в случае изменения конфигурации молекулы ДНК, например в 5'-G-(A-T-A-A)-GGG-3' последовательности. Возникающий в этом случае дополнительный потенциальный барьер, сформированный тимином за счет различного энергетического положения нуклеотидных оснований, нарушает условия электронного переноса по суперобменному механизму и снижает общий перенос дырок в пределах А-Т-А участка. Однако появление дополнительной компоненты переноса носителей по термоактивированному механизму через сформированный тимином потенциальный барьер компенсирует снижение тока, протекающего через приборную структуру.

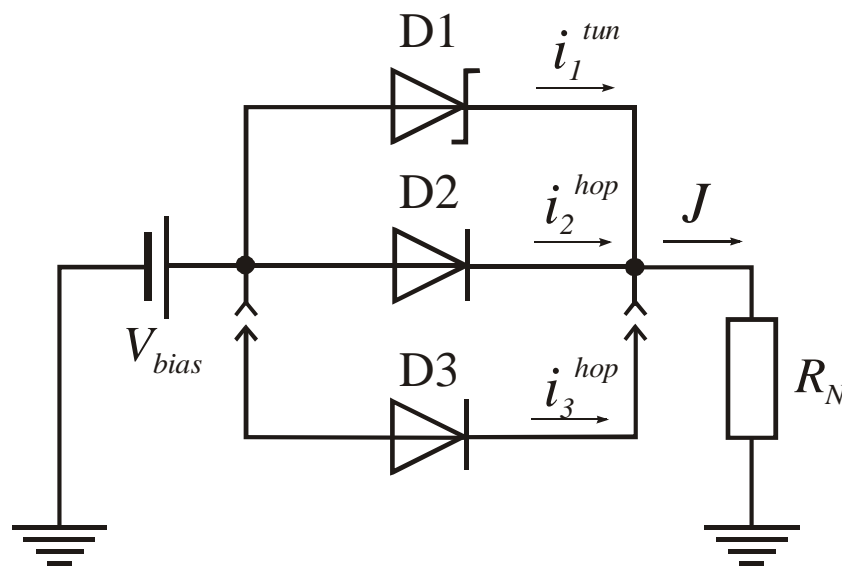


Рис. 2. Эквивалентная схема переключающего элемента, разработанного на базе 5'-G-(A)₃-GGG-3' последовательности молекулы ДНК

Результаты расчета и их обсуждение

Согласно экспериментальным данным [3, 8, 10], скорость переноса носителей заряда в молекуле ДНК определяется энергетическим смещением донорного и акцепторного участков относительно друг друга при воздействии на систему внешнего электрического поля, временем накопления заряда в молекуле во время протекания прямого тока, а после переключения рассматриваемой системы – временем рассасывания заряда при протекании обратного тока, а также температурой. Поэтому моделирование эквивалентной схемы молекулы ДНК и ее переключающих характеристик проводили с учетом перечисленных факторов. Параметры, использованные в расчетах, приведены в таблице.

Параметры, используемые для моделирования эквивалентной схемы 5'-G-(A)_n-GGG-3' структуры молекулы ДНК

Параметр	Значение
Расстояние между соседними нуклеотидными основаниями	0,34 нм [8]
Высота барьера для дырок между G-A нуклеотидами	0,5 эВ [4]
Высота барьера для дырок между (G) ₂ -A нуклеотидами	0,9 эВ [11]
Высота барьера для дырок между (G) ₃ -A нуклеотидами	1,1 эВ [11]
Число динуклеотидов в молекуле ДНК	5–12
Число динуклеотидов, образующих потенциальный барьер	1–7
Эффективная масса дырки	$0,9 m_e^*$
Относительная диэлектрическая проницаемость молекулы	4 [5]
Температура	50–350 К

Результаты моделирования ВАХ переключающего элемента на базе однопериодных 5'-G-(A)_n-GGG-3' и 5'-GG-(A)_n-GGG-3' молекул ДНК приведены на рис. 3. Очевидно, что увеличение числа А-Т динуклеотидов ведет к пропорциональному изменению как прямого, так и обратного тока, в то время как изменение конфигурации 5'-G-(A)_n-GGG-3' молекулы ДНК на 5'-GG-(A)_n-GGG-3' уменьшает различие между этими токами на два порядка.

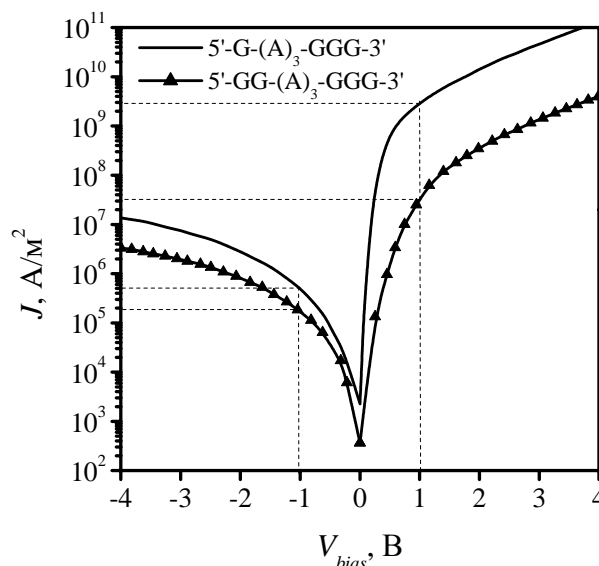


Рис. 3. ВАХ переключающего элемента, разработанного на базе 5'-G-(A)₃-GGG-3' и 5'-GG-(A)₃-GGG-3' последовательностей молекулы ДНК

Моделирование переходных процессов в приборной структуре, построенной на базе двухбарьерной $5'-G-(A)_n-G-(A)_n-GGG-3'$ молекулы ДНК, показало, что основными параметрами, определяющими переключательные свойства подобного прибора, являются время накопления и время рассасывания заряда (дырок) на определенном периоде полинуклеотида. Результаты моделирования переходных процессов в двухбарьерной $5'-G-(A)_2-G-(A)_2-GGG-3'$ структуре молекулы ДНК представлены на рис. 4. Время накопления дырок в первой потенциальной яме, зависящее от положения первой G-C пары оснований относительно дна квантовой ямы и A-T динуклеотида, лежит в фемтосекундном диапазоне и составляет 1 пс, причем во второй потенциальной яме процесс накопления носителей заряда происходит с некоторой задержкой (кривая 3, рис. 4). При этом рассасывание дырок во второй потенциальной яме, а также вблизи области акцепторного участка молекулы, сформированного триплетом гуанина GGG, происходит с учетом вклада концентрации дырок в предыдущих потенциальных ямах, о чем свидетельствуют кривые 2, 4 (рис. 4). Кроме того, уменьшение количества A-T пар, приводящее к сужению потенциальных барьеров в структуре молекулы ДНК, уменьшает время переключения приборной структуры в два раза.

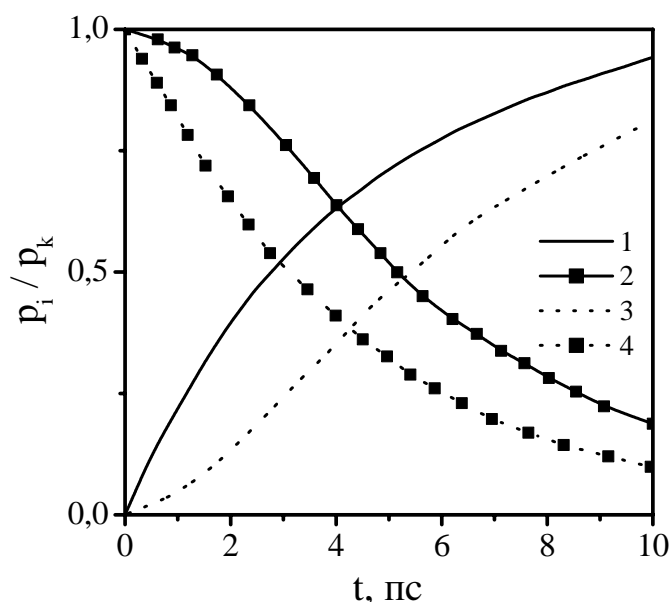


Рис. 4. Зависимость концентрации дырок от времени действия приложенного смещения в двухбарьерной $5'-G-(A)_2-G-(A)_2-GGG-3'$ молекуле ДНК: 1, 2 — накопление и рассасывание дырок в первой потенциальной яме соответственно; 3, 4 — накопление и рассасывание дырок в контактной области GGG триплета соответственно

Темп термоактивированного переноса носителей через потенциальный барьер экспоненциально снижается с уменьшением температуры, в то время как туннельный перенос носителей практически не зависит от температуры. Поэтому на графике зависимости плотности протекающего в $5'-G-(A)_3-GGG-3'$ молекуле ДНК тока от температуры (рис. 5) наблюдается участок перекрытия термоактивированного механизма с туннельным, который с увеличением напряжения сдвигается в область более высоких температур. Уменьшение числа динуклеотидов ведет к превалированию туннельного переноса носителей заряда в широком диапазоне внешних смещений и соответственно к стабильности тока при изменении температуры. В свою очередь, увеличение числа n приводит к росту вклада термоактивированного переноса и к его очевидному преобладанию над туннельным механизмом переноса при температуре свыше 200 К.

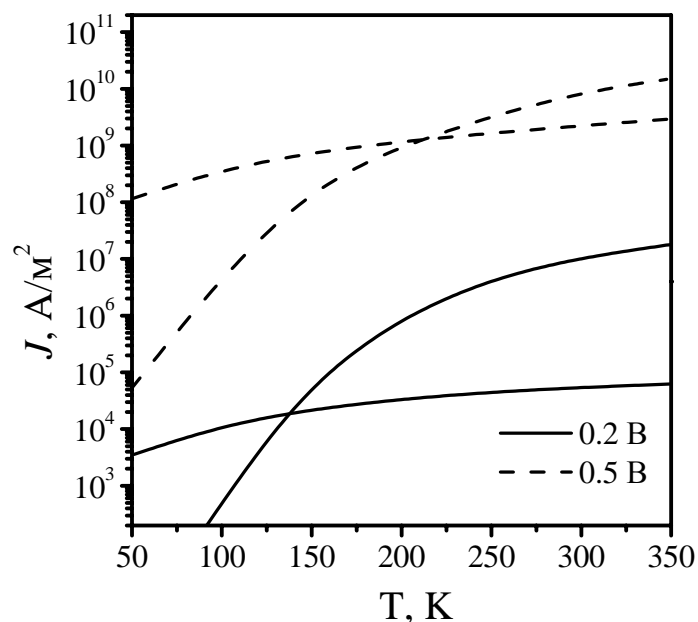


Рис. 5. Зависимость плотности протекающего в 5'-G-(A)₃-GGG-3' молекуле ДНК тока от температуры

Таким образом, перспектива создания переключающих элементов, построенных на базе молекулы ДНК, очевидна. Это обусловлено в первую очередь высоким быстродействием таких структур, которое создает предпосылки для разработки новых сверхбыстродействующих наноэлектронных приборов. Кроме того, существует возможность уменьшения времени переключения приборных структур на основе молекулы ДНК до 0,1 пс за счет использования частичного насыщения и рассасывания заряда в них. При этом роль температуры в проектируемых устройствах на основе молекулы ДНК достаточно велика, так как диапазон ее значений определяет превалирование того или иного механизма переноса в полинуклеотиде молекулы и может обеспечить адекватный выбор конфигурации ДНК для получения наилучших переключающих свойств биоэлектронного устройства в целом.

На основе переключающих свойств однопериодной структуры 5'-G-(A)_n-GGG-3' молекулы ДНК с несимметричной вольт-амперной характеристикой, определяемой полярностью внешнего смещения (рис. 3), схемотехнически могут быть реализованы цифровые цепочки для интегральных схем. Так, предложенная приборная структура (рис. 2) с двумя устойчивыми состояниями может использоваться в логических схемах как элемент, выполняющий операцию инверсии, так как при подаче на его вход смещения высокого уровня $V_1=0,8\div 1,3$ В, соответствующего прямому включению, на выходе прибора имеет место низкий уровень сигнала, а при подаче на этот же вход отрицательного смещения низкого уровня $V_0=-0,6\div -1$ В, соответствующего обратному смещению — высокий уровень сигнала (рис. 3). В рамках стандартной полупроводниковой диодно-резисторной логики операция сложения на основе приборной структуры реализуется при параллельном включении двух структур, а при их антипараллельном включении реализуется операция умножения. Кроме того, выбором числа последовательностей в молекуле ДНК можно регулировать не только быстродействие переключения данных элементов, но и зависимость их электрических характеристик от температуры за счет различной зависимости темпа термоактивированного и туннельного переноса от ширины потенциального барьера.

Заклучение

Разработана эквивалентная электрическая схема приборной структуры на базе молекулы ДНК, состоящая из параллельно включенных туннельных и выпрямляющих диодов, проводимость которых определяется скоростью переноса носителей заряда через различные последовательности динуклеотидов посредством туннельного и термоактивированного механизмов переноса соответственно.

Преимуществами приборов на основе молекулы ДНК являются возможность регулирования проводимости молекулы с помощью изменения набора образующих ее динуклеотидов, высокая скорость протекания процессов переноса, порядка 10^{-14} – 10^{-12} с, низкая потребляемая мощность, отсутствие реактивного сопротивления, широкий диапазон рабочих температур, а также простота разработки переключающих и логических элементов для наноэлектроники на ее основе.

APPLICATION OPPORTUNITIES OF DNA MOLECULE FOR THE SWITCHING ELEMENT

N.V. NOVIK, J.A. BERASHEVICH, V.E. BORISENKO

Abstract

The electric equivalent circuit of molecule DNA, which describes charge carrier transport via molecule, is proposed. The circuit consists of parallel-connected tunnel and rectifying diodes. Their conductivity is determined by rate of charge carrier transport composed of activated and tunneling mechanism and depended on prevalence of these mechanisms in the case of various sequences of nucleotides. Based on DNA molecule, the opportunities of elaboration of logical devices performed the inversion, disjunction and conjunction operations, are considered. It is shown that advantages of such devices are possibility to regulate a conductivity of a molecule in dependence on molecular sequences, high rate of transport processes with the switching time of 10^{-14} – 10^{-12} s and operation in a wide range of temperatures.

Список литературы

1. Collier C. P., Jeppesen J. O., Luo Y., Perkins J., Wong E. W., Heath J. R., Stoddart J. F. // J. Am. Chem. Soc. 2001. Vol. 123. P. 12632–12641.
2. Storm A. J., Noort J., Vries S., Dekker C. // Appl. Phys. Lett. 2002. Vol. 79, № 23. P. 3881–3883.
3. Giese B., Amaudrut J., Kothrin A.-K., Spormann M., Wessely S. // Nature. 2001. Vol. 412. P. 318–320.
4. Berashevich J. A., Filonov A. B., Borisenko V. E. // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. Singapore: World Scientific. 2003. P. 235–238.
5. Bixon M., Giese B., Wessely S., Langenbacher T., Michel-Beyerle M. E., Jortner J. // PNAS. 1999. Vol. 96, № 21. P. 11713–11716.
6. Meggers E., Kusch D., Spichty M., Wille U., Giese B. // Angew. Chem. Ent. Ed. 1998. Vol. 37. P. 460–461.
7. Берашевич Ю. А. // Изв. Белорус. инж. акад. 2002. № 2 (14)/2. С.5–7.
8. Troissi A., Orlandi G. // Chem. Phys. Lett. 2001. № 344. P. 509–518.
9. Duke C. B. In: Tunneling in solids. Solid physics supplement // New York: Academic Press, 1969. Vol. 10.
10. Wan C., Fiebig T., Kelley S. O., Treadway C. R., Barton J. K., Zewail A. H. // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1999. Vol. 96. P. 6014–6019.
11. Sugiyama H., Saito I. // J. Am. Chem. Soc. 1996. № 118. P. 7063–7068.