

ЛОГИЧЕСКИЙ НАНОЭЛЕМЕНТ 2ИЛИ-НЕ НА ОСНОВЕ БЕЛКОВЫХ НИТЕЙ *Geobacter sulfurreducens*

Бушуев А.С.¹, Тумаркина Д.Д.¹, Горшков К.А.¹

¹ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых», Владимир, Россия (600000, Владимир, ул. Горького, 87), e-mail: artem_bushuev_1996@mail.ru.

В работе приведен обзор основных биологических, структурных и электрофизических свойств анаэробных бактерий *Geobacter sulfurreducens*. Сопоставлены результаты исследований проводящих свойств белковых нитей и углеродных нанотрубок диаметром 150 нм. Рассмотрены изменения проводящих свойств белковых нитей бактерии *Geobacter sulfurreducens* при изменении биологической структуры путем исключения ароматических аминокислот с дальнейшей заменой их на аланин, а также при изменении показателя кислотности окружающей среды как на более щелочную, так и на более кислотную. Предложен вариант наноэлемента 2ИЛИ-НЕ с использованием проводников из белковых нитей бактерии *Geobacter* с учетом того, что наименьший размер транзистора, соответствующий элементам наносхем, порядка 14 нм. Рассмотрены перспективы использования макромолекулярных полимеров в качестве токопроводящих материалов в составе интегральных наносхем.

THE LOGICAL NANO-ELEMENT OR-AND-INVERT BASED ON THE PROTEIN THREADS OF *Geobacter sulfurreducens*

Bushuyev, A.S.¹ Tumarkina, D.D.¹ Gorshkov, K.A.¹

¹Vladimir State University n.a. A.G. and N.G. Stoletovs, Vladimir (600000, Vladimir, Gorky Street, 87), e-mail: artem_bushuev_1996@mail.ru.

This article presents the survey of the main biological, structural and electro-physical parameters of the anaerobic bacteriae *Geobacter sulfurreducens*. The results of the comparison between the conducting qualities of the protein threads as well as the carbon nano-tubes with the diameter amounting to 150 nm are made public.

Changes in the conductive properties of protein filaments of *Geobacter sulfurreducens* are examined when the biological structure is changed by excluding amino acids and changing the index of the acidity of the environment. A proposal is made for a nano-element's or-and-invert version using the conductors based upon the protein threads of the *Geobacter* given that the smallest transistor size corresponding to nanoscheme elements is of the order of 14 nm. The future usage of macro-molecular polymers as electric conductors within the integral nano-circuit is being considered.

Введение

Тенденция к миниатюризации элементной базы устройств микро- и нанoeлектроники при разработке систем с высокой степенью интеграции приводит к необходимости развития технологий, связанных с использованием не только молекулярных транзисторов и наноустройств памяти, но и наноразмерных проводников. Одним из методов создания токопроводящих элементов является нанесение на интегральную схему наноразмерного проводящего слоя из металлов, обладающих низким сопротивлением. Однако существующие на данный момент литографические технологии, реализующие такой метод, довольно ресурсозатратны. В качестве перспективных токопроводящих наноматериалов также используются углеродных нанотрубки, модифицированные атомами металла. С целью

уменьшения затрат и, как следствие, стоимости конечной продукции проводится поиск материалов в областях макромолекулярных полимеров, проводящих электрический ток [4,6]. Особый интерес вызвали исследования микроорганизмов *Geobacter Sulfurreducens*, в ходе которых было установлено, что бактерии обладают проводящими нитями, помогающими им расти на минералах железа[9]. Теоретически, это позволит использовать *Geobacter* как основу для производства нанoeлектронных компонентов из экологически чистых аминокислот.

1. Микроорганизмы *Geobacter Sulfurreducens*

Бактерия *Geobacter Sulfurreducens* (рисунок 1) относится к отряду анаэробных, то есть живущих в земле на больших глубинах и способных существовать без кислорода или солнечного света, питаясь металлами, такими как железо и марганец, а также сульфидами. Микроорганизм имеет необычную тактику выживания: он использует своеобразные «датчики»-пили для собственного передвижения и поиска металлов. Если металлических отложений рядом не обнаруживается, *Geobacter Sulfurreducens* может спонтанно отращивать пили, чтобы найти новые источники энергии [4].

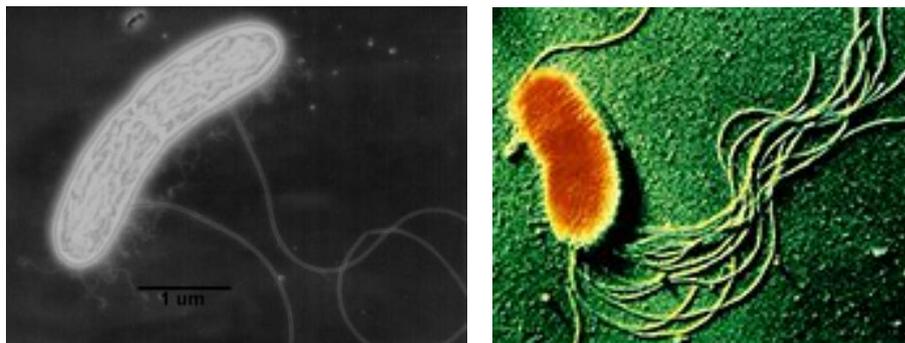


Рисунок 1. Вид бактерии *Geobacter sulfurreducens* [15].

Пили (рисунок 2) состоят из аминокислот, упакованных в нить шириной 3-5 нм и длиной, превышающей размер самих бактерий в десятки раз. С их помощью отдельные микроорганизмы объединяются в биопленки с сетчатой структурой.

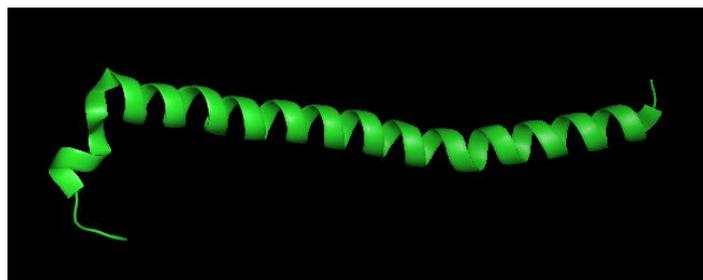


Рисунок 2. Спиралевидная модель белковой нити *Geobacter Sulfurreducens*, полученная в программе визуализации PyMOL

До открытия пилей считалось, что биологические материалы очень плохо проводят электрический ток. Начальные эксперименты с пиллями давали противоречивые результаты, а свойства и величина их проводимости, так же как механизм, лежащий в ее основе, были абсолютно непонятны. [2,3]

2. Структурные и электрофизические характеристики *Geobacter Sulfurreducens*

Для измерения собственной проводимости пилей был проведен эксперимент. [1,7] Электроды из золота шириной 2 мкм и длиной 10 мкм, разделенные непроводящим зазором в 500 нм, были изготовлены на n-легированных кремниевых пластинах с изолирующим слоем толщиной 100 нм из термически выращенного оксида (рисунок 3). Электроды подключены к контактам размерами 100 мкм × 100 мкм. Все измерения проводились при температуре 22°C и влажности 55% в контролируемых чистых помещениях.

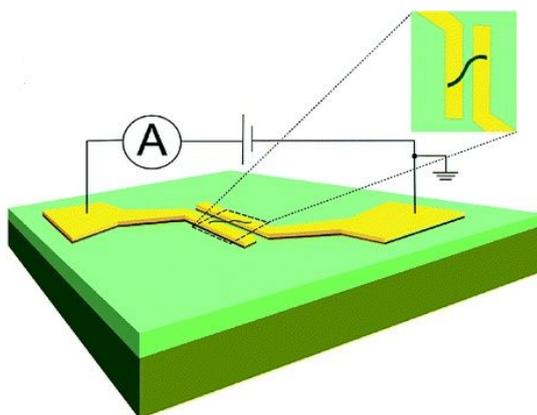


Рисунок 3. Схема установки для проведения эксперимента [6].

На первом этапе измерялось сопротивление углеродных нанотрубок диаметром 150 нм. Результаты эксперимента показали, что омическое сопротивление, а следовательно, проводимость, равная $6 \text{ кСм} \cdot \text{см}^{-1}$, соответствуют известным свойствам углеродных нанотрубок (рисунок 4) [9].

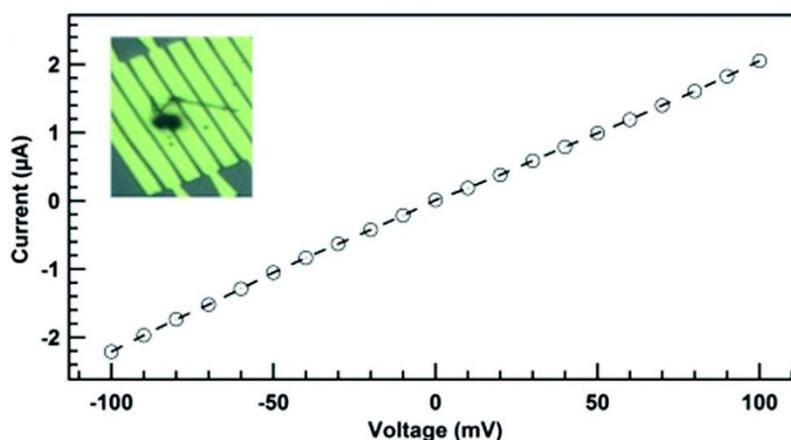


Рисунок 4. ВАХ углеродной нанотрубки [9].

На следующем этапе рассмотрены пилы природного типа (WT) *Geobacter sulfurreducens* и генетически модифицированного штамма (Aro-5), в котором ключевые ароматические аминокислоты были заменены на аланин.

В результате эксперимента выяснилось, что проводимость пилей типа WT равна 51 ± 11 мСм·см⁻¹. Проводимость модифицированного штамма Aro-5 оказалась существенно ниже (38 ± 1 мкСм·см⁻¹), что можно аргументировать отсутствием основных ароматических аминокислот, необходимых для электропроводности (рисунок 5) [6].

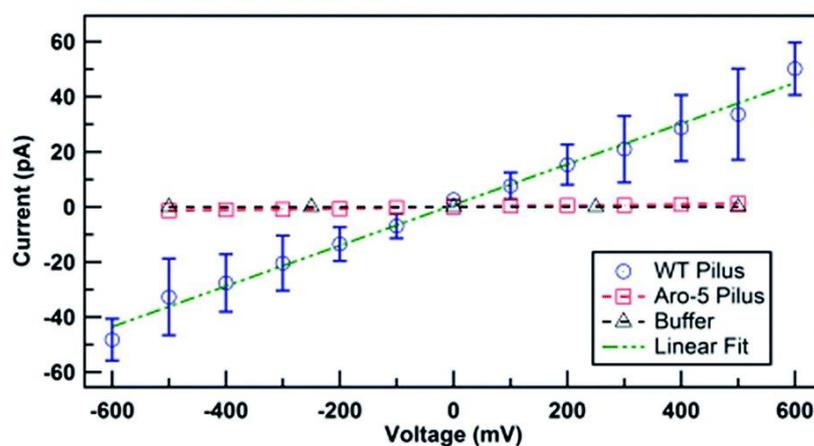


Рисунок 5. ВАХ пилей *Geobacter sulfurreducens* [6].

Для дальнейшего анализа проводящих свойств отдельных ворсинок проводимость измеряли при различных значениях pH. Увеличение pH до 10,5 резко снизило проводимость природного типа фимбрий до 37 ± 15 мкСм·см⁻¹, в то время как уменьшение pH до 2 существенно повышало проводимости пилей до 188 ± 33 мСм·см⁻¹ (рисунок 6) [8]. Несмотря на это, проводимость буфера с изменением pH существенно не изменилась.

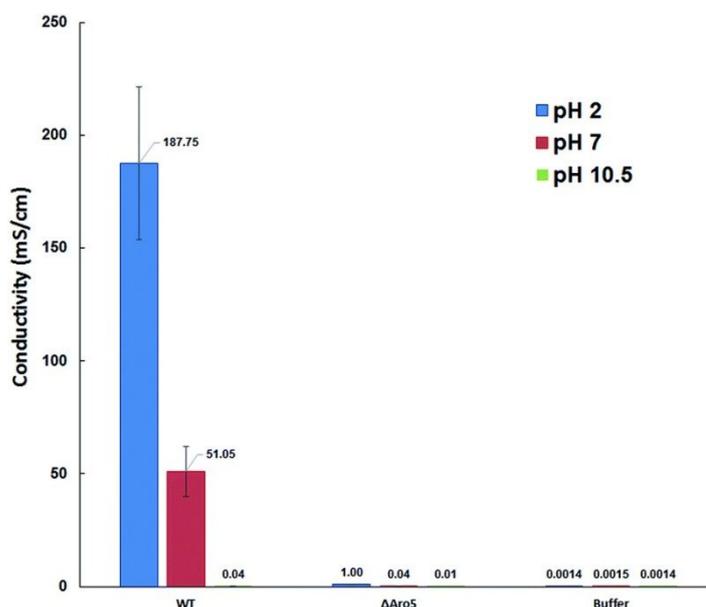


Рисунок 6. Диаграмма зависимости проводимости WT, Аго-5 и буфера от показателя рН [8].

Значение рН также влияет на проводимость Аро-5 ворсинок, но гораздо в меньшей степени, чем природный тип. Этот факт вновь подтверждает, что ароматические аминокислоты способствуют проведению тока через пили, что было доказано выше.

3. Проект модели логического элемента 2ИЛИ-НЕ на основе белковых нитей *Geobacter Sulfurreducens*

При проектировании модели электронного устройства учитывалось, что наименьший размер транзистора, соответствующий элементам наносхем, порядка 14нм [1]. Сечение проводящей белковой нити *Geobacter Sulfurreducens* было принято в виде круга с диаметром 2нм [8].

Проектирование производилось в среде графического редактора Autodesk AutoCAD 2014 с использованием возможности моделирования трехмерной структуры.

По результатам проектирования была получена трехмерная модель логического элемента 2ИЛИ-НЕ на основе белковых нитей *Geobacter Sulfurreducens* с размерами непроводящей подложки 41×48 нм (рисунок 7,8).

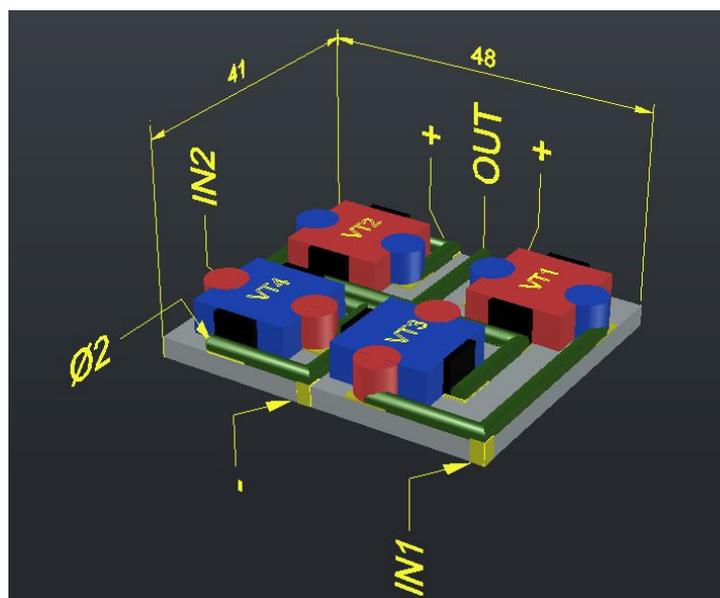


Рисунок 7. Трехмерная модель логического элемента 2ИЛИ-НЕ на основе белковых нитей *Geobacter Sulfurreducens*. Серым цветом показана диэлектрическая подложка, зеленым – проводящие нити *Geobacter Sulfurreducens*, синим и красным цветом обозначены зоны n- и p-проводимости КМОП-транзисторов.

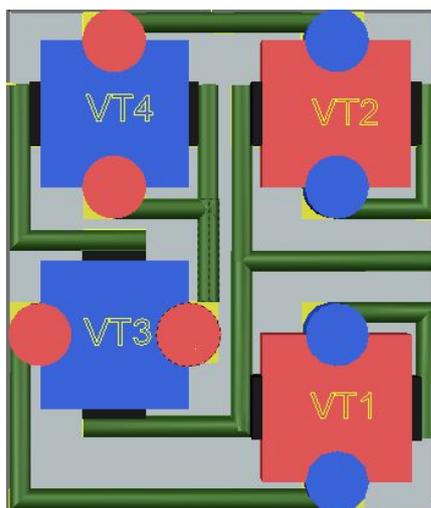


Рисунок 8. Трехмерная модель. Вид сверху.

Следует заметить, что данный вариант компоновки проводящих слоев и элементов схемы не является единственным, поэтому при иных вариациях возможны изменения линейных размеров устройства.

Необходимо учитывать, что стандартным компонентом микро- и наноэлектроники является элемент 4-2ИЛИ-НЕ (состоит из 4-х элементов 2ИЛИ-НЕ), поэтому, сравнивая спроектированную модель с уже изготавливаемыми аналогами, в которых используется проводящий слой из металлов [4,5], можно прийти к выводу, что белковые нанонити могут заметить ранее известные проводники при изготовлении наносхем.

Список литературы

1. Добровольский Н. А. Объемные FinFET-транзисторы: конструирование на 14 нм узле и ключевые характеристики // Молодой ученый. — 2016. — №11. — С. 335-344.
2. Жигула Е.А., Петухов В.И., Жигула Л.Д. Характеристика процессов переноса электронов между анодным микробиологическим консорциумом и анодом как ключевых факторов производительности микробного топливного элемента. // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 4.
3. Самойлов Л.Ю. Медицинская биофизика. Л.: Изд-во Военно-медицинской академии им.С.М.Кирова, 1988, с. 297.
4. Яковлев А. В. Нанотехнологии в России. Производство микросхем // Ридус, - 2012. №12.
5. <http://www.micro-m.ru>.
6. M. Vargas, N. S. Malvankar, P.-L. Tremblay, C. Leang, J. A. Smith, P. Patel, O. Synoeyenbos-West, K. P. Nevin and D. R. Lovley, mBio, 2013, 4, e00105–13.
7. N. S. Malvankar, M. Vargas, K. P. Nevin, A. E. Franks, C. Leang, B. C. Kim, K. Inoue, T. Mester, S. F. Covalla, J. P. Johnson, V. M. Rotello, M. T. Tuominen and D. R. Lovley, Nat. Nanotechnol., 2011, 6, 573–579.

8. N. S. Malvankar, M. Vargas, K. Nevin, P.-L. Tremblay, K. Evans-Lutterodt, D. Nykypanchuk, E. Martz, M. T. Tuominen and D. R. Lovley, *mBio*, 2015, 6, e00084.
9. Reguera, G. *et al.* Biofilm and nanowire production leads to increased current in *Geobacter sulfurreducens* fuel cells. *Appl. Environ. Microb.* **72**, 7345–8 (2006).