

Транзисторная структура с каналом из углеродных нанотрубок и ионным затвором для аппаратной реализации нейроморфных вычислений

© А.И. Савицкий¹, С.Ю. Переверзева¹, Ю.О. Василевская¹, А.В. Куксин², Р.Т. Сибатов¹

¹ Научно-производственный комплекс „Технологический центр“,
124498 Москва, Россия

² Национальный исследовательский университет „МИЭТ“,
124498 Москва, Россия

E-mail: savitskij-andrey@mail.ru

Поступила в Редакцию 5 мая 2026 г.

В окончательной редакции 7 июня 2026 г.

Принята к публикации 7 июля 2026 г.

Исследован полевой транзистор с двойным электрическим слоем на основе сети углеродных нанотрубок и гелевого электролита из поливинилового спирта с LiCl. Релаксация тока канала после подачи импульса на затвор описывается функцией со степенным хвостом, обусловленным субдиффузией ионов. Наблюдаемая кинетика позволяет совместить в одном транзисторе свойства кратковременной и долговременной памяти. Сочетание нелинейной динамики и затухающей памяти делает представленное устройство перспективным физическим резервуаром для нейроморфных вычислений.

Ключевые слова: транзистор с ионным затвором, углеродные нанотрубки, ионная динамика, аномальная диффузия, нейроморфные вычисления.

DOI: 10.61011/FTP.2026.07.63946.9782

1. Введение

Нейроморфные вычисления требуют создания новой элементной базы, способной эффективно обрабатывать пространственно-временные сигналы. Особое место среди разрабатываемых подходов занимают резервуарные вычисления (РВ) — парадигма, в которой нелинейный отклик динамической системы-резервуара преобразует входные сигналы в высокоразмерное представление, а обучается лишь линейный выходной слой, что резко упрощает и ускоряет анализ временных последовательностей [1].

Транзисторы с ионным затвором (ТИЗ) рассматриваются как многообещающий класс приборов для нейроморфных систем благодаря уникальному механизму, сочетающему ионный и электронный типы проводимости. К их основным достоинствам относятся высокая энергоэффективность, низкое рабочее напряжение, возможность аналоговой (многоуровневой) настройки проводимости канала и высокая плотность интеграции [2]. Среди различных типов ТИЗ особый интерес представляют транзисторы с двойным электрическим слоем (ДЭС), в которых управление проводимостью канала осуществляется за счет емкостной индукции заряда в приповерхностном слое. Транзисторы с ДЭС в отличие от органических электрохимических транзисторов, в которых ионы проникают в объем канала, обладают более высоким быстродействием (единицы мкс против мс). Перспективными материалами, используемыми в качестве канала в таких транзисторах, являются органические полупроводники (РЗНТ-(3-гексилтиофен) и др.) [3],

оксиды металлов (ZnO, IGZO и др.) [4], 2D материалы (MoS₂, WSe₂ и др.) [5], углеродные нанотрубки (УНТ), графен [6] и др.

Для эффективной работы в архитектуре РВ физический резервуар должен обладать рядом свойств, среди которых ключевыми являются нелинейность преобразования сигнала и затухающая память. Нелинейное преобразование сигнала обеспечивает проекцию входных данных в пространство признаков, где даже сложные временные зависимости становятся линейно разделимыми. Затухающая память обеспечивает зависимость отклика от предыстории входных сигналов и их „забывание“ за характерное время релаксации. Сочетание данных факторов делает ТИЗ привлекательными кандидатами для построения физических резервуаров.

В нашей работе представлен полевой транзистор с нижним затвором на основе сетки полупроводниковых углеродных нанотрубок и гелевого электролита. В такой структуре нелинейность достигается за счет особенности вольт-амперной характеристики сетки УНТ и эффектов квантовой емкости [7], а затухающая память формируется за счет динамики перезарядки ДЭС на границе нанотрубка–электролит [8].

2. Методика эксперимента

Предложенная в работе конструкция транзистора выполнена на основе высоколегированной кремниевой подложки марки КЭМ-0.003. На лицевой стороне подложки методом термического окисления сформирован слой диэлектрика SiO₂ ~ 100 нм. Поверх диэлектрика

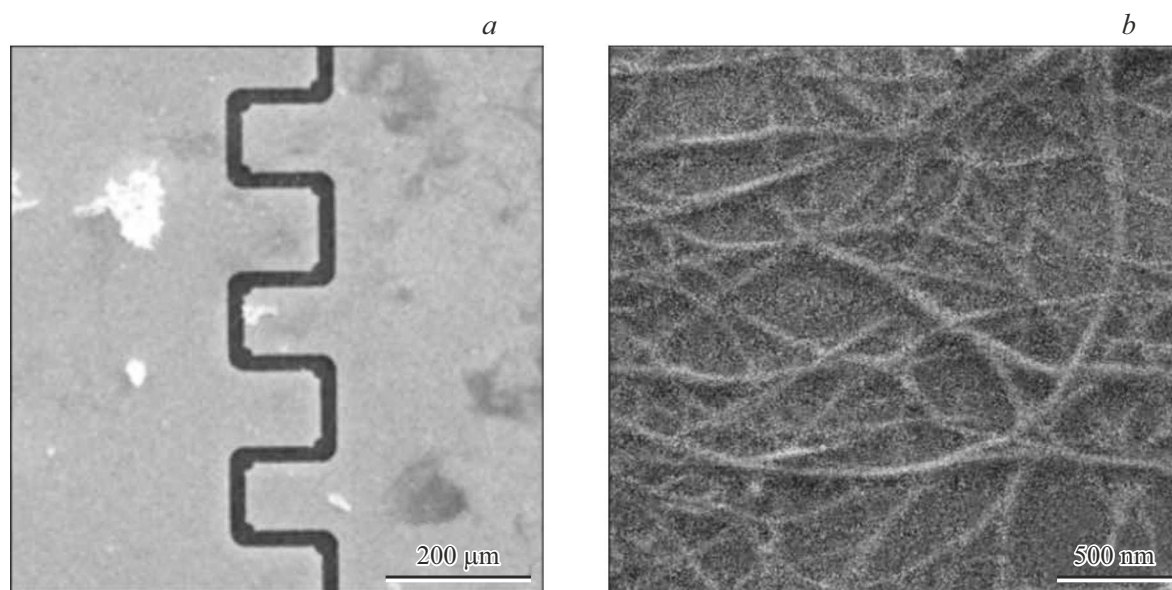


Рис. 1. РЭМ-изображения поверхности электродов ТИЗ вблизи зазора (a) и полученной сети ОСУНТ (b).

сформированы планарные золотые электроды истока и стока толщиной 150 нм с адгезионным подслоем титана 30 нм. Электроды выполнены в виде встречно-штырьевых структур с расстоянием между ними в 20 мкм. На обратную сторону подложки методом магнетронного осаждения нанесен алюминиевый контакт толщиной 1 мкм. Это позволяет использовать легированный кремний в качестве нижнего затвора.

Между электродами истока и стока методом послойного спрей-осаждения через жесткую маску сформирована сеть полупроводниковых одностенных углеродных нанотрубок (ОСУНТ), выполняющая функцию канала транзистора. Метод основан на распылении под давлением дисперсной среды, содержащей углеродные наноматериалы, с последующим осаждением на нагретые подложки [9]. В качестве дисперсии использовалась суспензия на основе изопропилового спирта и полупроводниковых ОСУНТ (TUBALL, компании OCSiAl) с концентрацией 0.01 мг/мл. Для разрушения крупных агломератов углеродных наноматериалов после смешивания дисперсия подвергалась комплексной ультразвуковой обработке с использованием погружного гомогенизатора и ультразвуковой ванны в течение 90 мин. Последующее центрифугирование использовалось для удаления осадка из дисперсии. Для осаждения ОСУНТ использовалась установка Nordson E2V с диаметром пульверизационного сопла 0.5 мм. Структуры для осаждения размещались на предметном столике, нагреваемом до 120 °С, обеспечивающем ускорение испарения растворителя из формирующихся слоев. Распыление дисперсии осуществлялось при подаче давления 5 кПа. Плотность сети УНТ определялась количеством проходов аэрографа над обрабатываемой поверхностью. На рис. 1 представлены РЭМ-снимки (растровой электронной микроскопии) об-

ласти осаждения УНТ на ТИЗ между электродами (a) и сформированной сети УНТ, полученной в результате 20 проходов (b).

Поверх сети ОСУНТ методом капельного осаждения формировался слой проводящего электролита на основе поливинилового спирта (ПВС) с добавлением соли LiCl. Для его приготовления сначала получали 0.5 М водный раствор LiCl, который нагревали до 70 °С. Затем при постоянном перемешивании постепенно добавляли порошок ПВС до достижения концентрации 50 г/л. Раствор перемешивали в закрытой емкости в течение нескольких часов до полного растворения ПВС, после чего оставляли на 3 ч для удаления пузырьков воздуха. В данной конфигурации транзистора ПВС обеспечивает механическую стабильность, а диссоциированные ионы Li^+ и Cl^- обеспечивают высокую ионную проводимость.

Исследование вольт-амперных характеристик ТИЗ было осуществлено при помощи зондовой станции Summit 12000 (Cascade Microtech) и параметрического анализатора B1500A (Keysight). На рис. 2 представлена конструкция исследуемого ТИЗ на основе сети ОСУНТ и электролита ПВС/LiCl. Управление потенциалом затвора (U_g) осуществлялось через металлический столик зондовой станции. Использование нижнего затвора дает возможность полевой модуляции проводимости УНТ. Это потенциально открывает дополнительные степени свободы для настройки свойств физического резервуара.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) полученных ТИЗ показало, что током стока можно управ-

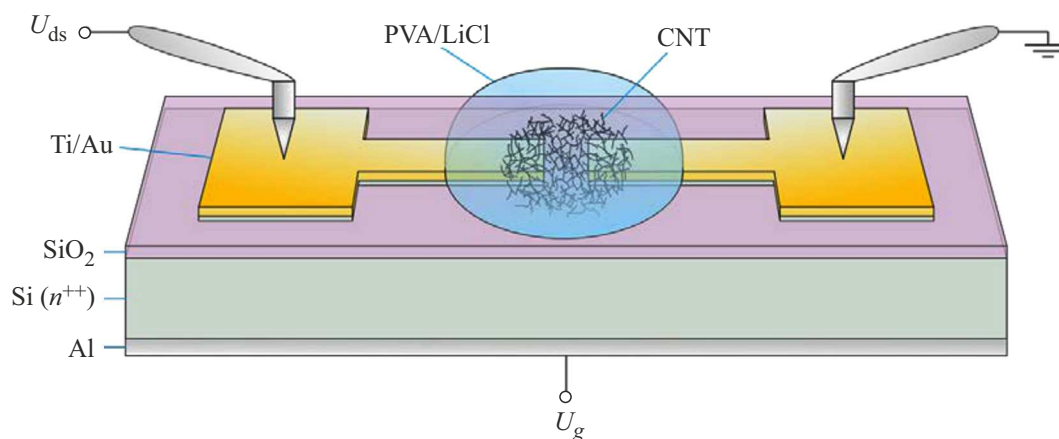


Рис. 2. Конструкция полевого ТИЗ с нижним затвором на основе сети ОСУНТ и электролита ПВС/LiCl.

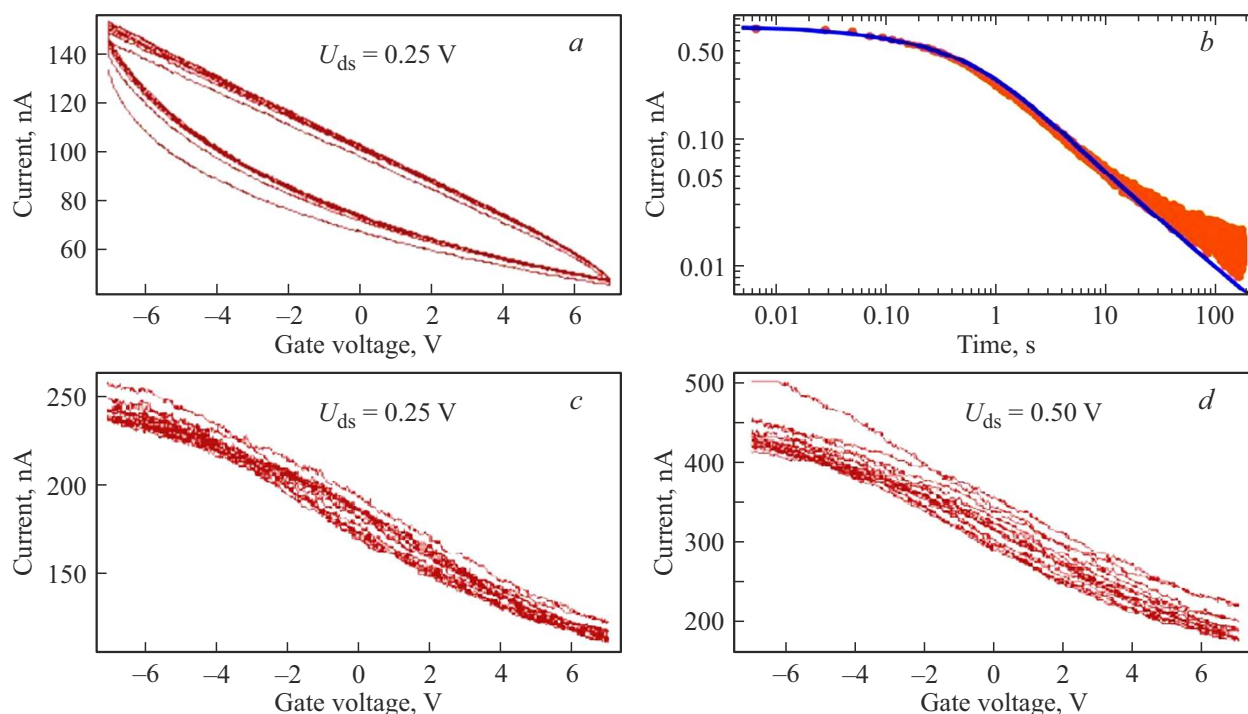


Рис. 3. ВАХ ТИЗ в зависимости от U_g при постоянном $U_{ds} = 0.25$ В (a) и релаксация тока стока после приложенного потенциала на нижний затвор $U_g = -5$ В (b). ВАХ для структуры с УНТ без электролита при вариации потенциала на затворе при заданном напряжении между истоком и стоком: $U_{ds} = 0.25$ В (c) и $U_{ds} = 0.5$ В. Скорость развертки напряжения затвора составляла 0.2 В/с.

лять за счет напряжения затвора. В качестве примера на рис. 3, a приведены ВАХ, иллюстрирующие зависимость тока канала от напряжения на нижнем затворе при напряжении между стоком-истоком (U_{ds}) 0.25 В. Наблюдаемая ширина петли гистерезиса уменьшается с увеличением скорости развертки, что соответствует модели замедленной диффузии ионов. На рис. 3, b показан спад тока сток-исток после приложения потенциала на нижний затвор -5 В. В отсутствие ПВС/LiCl на ВАХ гистерезиса не наблюдается (рис. 3, c, d).

На рис. 4 представлена реакция системы на последовательные короткие импульсы напряжения на затворе.

ре. Каждый импульс имел амплитуду 10 В и длительность 15 нс.

При подаче короткого импульса на затвор ток канала релаксирует к исходному значению не экспоненциально, а по степенному закону. Отклики могут быть описаны функцией Миттаг-Леффлера $F(t) = I_0 E_\alpha(-\mu t^\alpha)$. Данная функция является обобщением экспоненциальной функции и определяется через ряд:

$$E_\alpha(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(\alpha k + 1)}, \quad \alpha > 0,$$

где $\Gamma(x)$ — γ -функция.

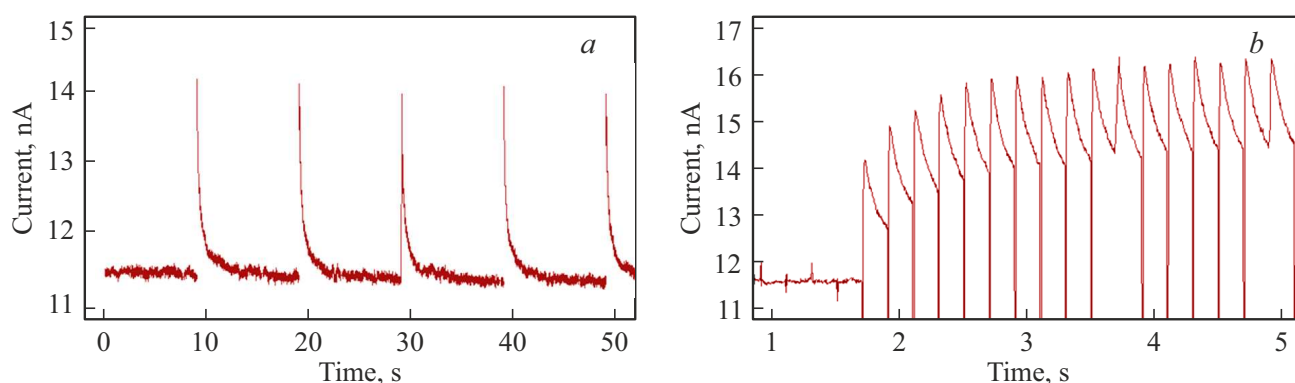


Рис. 4. Токовые отклики ТИЗ на серию импульсов на затворе с межимпульсными интервалами 10 с (а) и 0.2 с (b).

На малых временах асимптотика этой функции является растянутой экспонентой, а на больших временах — степенным законом [8]. Рассматриваемая функция Миттаг–Леффлера является собственной функцией субдиффузионного уравнения релаксации с дробной производной по времени.

Наблюдаемый тип релаксации указывает на субдиффузионный транспорт ионов в геле ПВС/LiCl. Для релаксационной кривой, представленной на рис. 3, *b*, параметры аппроксимации составили $\alpha = 0.7$, $\mu = 1.1 \text{ с}^{-\alpha}$, $I_0 = 0.8 \text{ нА}$. Ключевым следствием является затухающая память: система сохраняет информацию о предшествующем импульсе, но влияние этой информации со временем уменьшается, что соответствует требованию к физическому резервуару.

Наблюдается нарушение принципа временной суперпозиции: амплитуда отклика на второй импульс в паре нелинейно зависит от длительности межимпульсного интервала из-за релаксации ионного заряда в ПВС, что свидетельствует о нелинейности системы по отношению к предыстории входного сигнала. При достаточном интервале ток полностью возвращается к исходному уровню (рис. 4, *a*). Сокращение интервала приводит к смещению минимального значения тока, что демонстрирует нелинейную зависимость текущего состояния от истории стимуляции и свидетельствует о наличии памяти в системе (рис. 4, *b*). Субдиффузия ионов влияет на рекуррентные свойства вычислительной среды, способствует стабилизации динамики ТИЗ и потенциально улучшает распознавание сложных временных зависимостей с масштабно-инвариантными свойствами.

Сочетание затухающей памяти и нелинейного отклика позволяет интерпретировать структуру как пороговый интегратор с утечкой — базовую модель искусственного синапса. Субдиффузионный характер релаксации, обуславливающий замедленное „забывание“ состояния, создает основу для реализации долговременной пластичности и гибкого управления потенциацией и депрессией.

4. Заключение

Предложенный транзистор с двойным электрическим слоем на основе сети полупроводниковых углеродных нанотрубок и электролита ПВС/LiCl демонстрирует два ключевых свойства, необходимых для ПВ: затухающая память и нелинейность. Мы интерпретируем степенную релаксацию тока в канале после подачи импульса на затвор как следствие субдиффузионного транспорта ионов в электролите. Возможность управления запаздывающей нелинейной динамикой тока в канале через нижний электростатический затвор позволяет модулировать свойства физического резервуара, что перспективно для создания архитектур с адаптивной обработкой временных последовательностей.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект FNRМ-2025-0010).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] X. Liu, C. Sun, Z. Guo, X. Xia, Q. Jiang, X. Ye, J. Shang, Y. Zhang, X. Zhu, R.-W. Li. *Adv. Sci.*, **10** (15), 2300471 (2023). DOI: 10.1002/advs.202300471
- [2] X. Wan, S. Cui, C. Li, J. Yan, F. Tian, H. Luo, Z. Luo, L. Zhu, Z. Yu, D. Khim, L. Sun, Y. Xu, H. Sun. *Org. Electron.*, **135**, 107144 (2024). DOI: 10.1016/j.orgel.2024.107144
- [3] F.-C. Wu, C.-Y. Chen, Y.-W. Wang, C.-B. You, L.-Y. Wang, J. Ruan, W.-Y. Chou, W.-C. Lai, H.-L. Cheng. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **16** (31), 41211 (2024). DOI: 10.1021/acsami.4c05966
- [4] A. Gaurav, X. Song, S.K. Manhas, P.P. Roy, M.M. De Souza. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **17**, 17590 (2025). DOI: 10.1021/acsami.5c00092

- [5] Y. Hwang, B. Park, S. Hwang, S.-W. Choi, H.S. Kim, A.R. Kim, J.W. Choi, J. Yoon, J.-D. Kwon, Y. Kim. *Small Methods*, **7**, 2201719 (2023). DOI: 10.1002/smt.202201719
- [6] F. Lin, J. Liu, H. Lu, X. Liu, Y. Liu, Z. Hu, P. Lyu, Z. Zhang, J. Martin, W. Guo, Y. Liu. *Adv. Funct. Mater.*, **34**, 2400553 (2024). DOI: 10.1002/adfm.202400553
- [7] T. Hennequin, M. Manghi, A. Noury, F. Henn, V. Jourdain, J. Palmeri. *J. Phys. Chem. Lett.*, **15** (8), 2177 (2024). DOI: 10.1021/acs.jpclett.3c03248
- [8] R.T. Sibatov, A.K. Gavrilova, A.I. Savitskiy, Yu.P. Shaman, A.V. Sysa. *Chaos*, **35**, 053155 (2025). DOI: 10.1063/5.0251233
- [9] A.Yu. Gerasimenko, A.V. Kuksin, Y.P. Shaman, E.P. Kitsyuk, Y.O. Fedorova, A.V. Sysa, A.A. Pavlov, O.E. Glukhova. *Nanomaterials*, **11** (8), 1875 (2021). DOI: 10.3390/nano11081875

Редактор Г.А. Оганесян

A transistor structure featuring a carbon nanotube channel and an ion-based gate for the hardware implementation of neuromorphic computing

*A.I. Savitskiy¹, S.Yu. Pereverzeva¹,
Yu.O. Vasilevskaya¹, A.V. Kuksin², R.T. Sibatov¹*

¹ Scientific-Manufacturing Complex
„Technological Centre“,
124498 Moscow, Russia

² National Research University of Electronic
Technology,
124498 Moscow, Russia

Abstract We investigated an electric double-layer field-effect transistor based on a network of carbon nanotubes and a gel electrolyte composed of polyvinyl alcohol and LiCl. The relaxation of the channel current following a gate pulse is described by a function with a power-law tail, caused by ion subdiffusion. The observed kinetics allow the properties of short-term and long-term memory to be combined in a single transistor. The combination of nonlinear dynamics and fading memory makes the presented device a promising physical reservoir for neuromorphic computing.