

Проблемы синтеза коннекционистских представлений и континуальных моделей среды на примере мемристоров

© 2024 г. И. В. Матюшкин^{1,2,✉}

¹ АО «НИИ молекулярной электроники»,
ул. Акад. Валиева, д. 6, стр. 1, Зеленоград, Москва, 124460, Российская Федерация

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
пл. Шокина, д. 1, Зеленоград, Москва, 124498, Российская Федерация

✉ Автор для переписки: imatyushkin@niime.ru

Аннотация. Обсуждаются способы взаимодополнения локальных параметров К–системы и интегральных характеристик среды, в которую она погружена. Примерами такой модельной ситуации служит расчет проводимости области филамента мемристора, явления перколяции, химически усиленные фоторезисты. Простейший случай взаимодействия К–системы и среды связан с прыжковой проводимостью полимеров, а для анализа более сложных случаев нами выделены 4 пары оппозиций. Впервые обнаружено скрытое противоречие в формальной дефиниции К–системы. Чтобы избежать этого противоречия в моделях материаловедения необходимо использовать быстрые переменные при описании транспортных сигналов. Понятие среды формализуется нами как кортеж непрерывных функций, например, электрического поля, заданного в пространстве. Эти функции интерполируются по некоторому объему, из которого выколоты шары малого радиуса, находящиеся в точках расположения элементов К–системы. Непосредственная семантика такого шара это нанокристалл внутри аморфного диэлектрика.

Ключевые слова: мемристор, К–система, коннекционизм, методы моделирования

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Национального центра физики и математики, направление № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах».

Для цитирования: Матюшкин И.В. Проблемы синтеза коннекционистских представлений и континуальных моделей среды на примере мемристоров. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2024; 27(2): 117—124. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202311.567>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на V–й международной конференции «Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов», Москва, 23–25 октября 2023 г.

© 2024 National University of Science and Technology “MISIS”.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Problems of synthesis of connectionist representations and continuum models of the environs on the example of memristors

I. V. Matyushkin^{1,2}✉

¹*Molecular Electronics Research Institute, JSC,
6–1 Acad. Valieva Str., Zelenograd, Moscow 124460, Russian Federation*

²*National Research University of Electronic Technology,
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow 124498, Russian Federation*

✉ Corresponding author: imatyushkin@niime.ru

Abstract. The ways of complementarity of the local parameters of the C–system and the integral characteristics of the environment in which it is immersed are discussed. Examples of such model situation are the calculation of the conductivity of the memristor filament region, percolation phenomena, and chemically enhanced photoresists. The simplest case of interaction between a C–system and a medium is associated with the jumping conductivity of polymers, and for the analysis of more complex cases, we have identified 4 pairs of oppositions. For the first time, a hidden contradiction was discovered in the formal definition of the C–system. To avoid this contradiction in materials science models, it is necessary to use fast variables when describing transport signals. We formalize the concept of a medium as a tuple of continuous functions, for example, an electric field given in space. These functions are interpolated over a certain volume, from which small–radius balls located at the points of the elements of the C–system are punched out. The immediate semantics of such a ball is a nanocrystal inside an amorphous dielectric.

Keywords: memristor, C–system, connectionism, methods of modeling

Acknowledgments: This work was supported by the National Center for Physics and Mathematics, direction No. 9 “Artificial intelligence and big data in technical, industrial, natural and social systems”.

For citation: Matyushkin I.V. Problems of synthesis of connectionist representations and continuum models of the environs on the example of memristors. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2024; 27(2): 117—124. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202311.567>

Введение

Объективное основание рассматриваемой проблемы кроется в разделении материи на вещество и поле, причем само вещество представляется сеткой атомных остовов, соединенных условно химическими связями, внутри которой перемещаются, например, под действием внешнего поля, подвижные электроны. Сущность проблемы возникла из внутренних потребностей математического моделирования и абстрактного понятия К–системы [1]. Сходная задача возникает при моделировании поведения колоний бактерий, тьюрмитов и реализации муравьиных алгоритмов [2], хемотаксиса [3]. Указанные объекты служат примерами мультиагентных систем, характеризуются динамичной перестройкой связей. Для К–систем материалоуправления реализуется жесткость связей, хотя зачастую, условная, причем такие ситуации можно

описать через реконфигурируемые К–системы [1]. Диалектика непрерывное ↔ дискретное перетекает (рис. 1) в диалектику локальное ↔ глобальное. Например, зарядовое состояние системы ловушек внутри филамента мемристора влияет на подвижность носителей заряда и протекание тока. Укажем на возможность применения концепта К–системы при моделировании электрофизики полимеров, в частности, фоторезистов с химическим усилением (**CAR**) при их засветке; при этом реакционный центр полимера [4, 5] представляется узлом К–системы. В этой связи обратим внимание на базовые установки модели Гила—Пфистера (Gill—Pfister) [4, 6] среди моделей прыжковой проводимости [6, 7], например, для молекулярно допированных полимеров [8]. Базовая модель биполярного беспорядка (**DDF**) Борзенбергера и Бесслера [9] ставит вопрос диалектики порядка и хаоса, что в контексте К–систем представляется так — на-

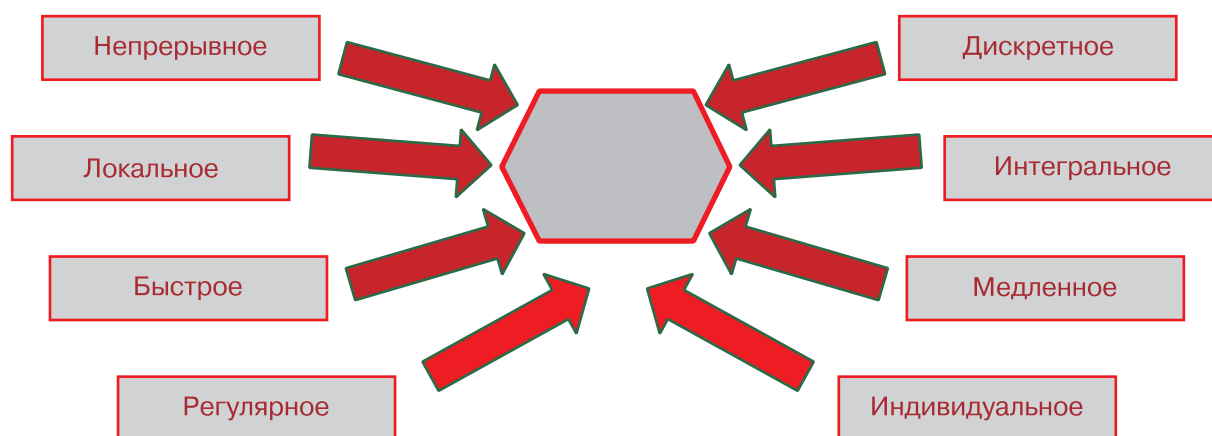


Рис. 1. Четыре пары противоположностей, относимых к К-системе, условно изображенной на правой стороне, и среде на левой стороне

Fig. 1. Four pairs of opposites related to the C-system, conventionally depicted on the right side, and the environment on the left side

сколько детализация коннектома К-системы влияет на ее интегральные свойства? Авторы [10] этот вопрос, до конца его не ощущая, пытаются решить обращением к нормальному статистическому распределению. Мы видим аналогичную ситуацию [11] для кристаллитов в роли элементов К-системы, что рассматривалось А.Н. Михайловым [12] при реализации мемристора. Макроскопический подход к области филамента мемристора, содержащей внутри К-систему, развит нами в [13] в рамках компактной модели. Модели перколяции [14–16], являющейся ярким примером DDF, также отвечают на этот вопрос для транспорта, обычно, жидкости через пористую среду, причем теория перколяции за последние 20–30 лет стала хорошо развитой. Другим примером служат фотополимеры. Химически усиленный резист (CAR), применение которого актуально для EUV-литографии с 1995 г., содержит три компонента: полимерную смолу, которая обеспечивает большинство свойств пленки фоторезиста, генератор фотокислоты (PAG, *Photoacid Generator*) для обеспечения чувствительности к ультрафиолетовому излучению и ингибитор растворения для обеспечения переключения растворимости до и после светового воздействия [17–19]. В работе [20] рассматривается перколяция в мемристоре на основе молекулярно допированного полимера, точнее композиции полимеров.

Диалектика взаимодействия К-системы и среды

Перечислим базовые сущности в определении К-системы [1], это: множество E элементов, однородных по своему строению; коннектом K , т.е. множество попарных связей элементов (ребра графа); множество S потенциальных состояний элемента; множество Q возможных сигналов, которые ассоциированы с ребрами; алгоритм действия A , в соот-

ветствии с которым элемент генерирует сигнал на основе входных сигналов и своего состояния, также изменяя его; функция искажения B , отражающая разницу между сгенерированным и принятым сигналами; линейно упорядоченное множество T моментов или интервалов на оси времени.

К-система $\langle E, S, K, Q, A, B, T \rangle$ обладает чертами большой системы, однородности и параметризуемости, из которой следует обучаемость. Заметим, имея в виду фон-Неймановскую интерпретацию клеточного автомата, что входной сигнал, может и, в каком-то смысле, должен нести информацию о состоянии элемента.

В материаловедении удобно считать, что К-система погружена в среду, но возможен взгляд с позиции инженерии нейроморфных систем, когда функционально значимая К-система получает материальное воплощение. Также следует помнить, что сам по себе дискретный объект может быть описан как дискретными средствами, так и непрерывными, и наоборот. Для рассматриваемого нами класса физико-химических ситуаций неочевидно различие между микроскопическим состоянием, точнее говоря, конфигурацией, и макросостоянием. К-система репрезентирует дискретные особенности материала-среды, которая априори считается однородной по свойствам. Для инженерной К-системы имеется три характерных времени: длительность прохождения сигнала между элементами; длительность изменения состояния элемента, обусловленная внутренними процессами релаксации и длительностью обработки (суммирование) и формирования сигнала; длительность реконфигурирования или перестройки коннектома (время существования попарной связи или элемента). Для К-системы в материаловедении также можно условно выделить много параметров времени, например: длительность испускания или поглощения фотона; длительность прохождения

электроном потенциального барьера; или характерная частота электрона, локализованного в яме, при квантовом конфайнменте, обусловленном наличием кристаллита; время релаксации импульса в электронном газе, или время свободного пробега электрона/дырки при дрейфе, связанная с подвижностью; частота фононных колебаний или время диффузионного прыжка; время жизни возбужденного состояния молекулы. Основной вопрос моделирования взаимодействия среды и К-системы в отношении времени (см. рис. 1, 3-я пара противоположностей), состоит в выборе уровня декомпозиции процессов до элементарных актов, описываемых вплоть до квантовой механики. В отличие от инженерных систем, где дискретность привносится извне, в природе элементарные акты расположены в непрерывном времени. 4-я пара противоположностей на рис. 1, относится к порядку и хаосу, точнее, к описанию кристаллов, пусть и с дефектами, с помощью статистики, распределения Ферми, понятий зонной теории, чему противостоит описание аморфных тел, полимерных глобул, явлений DDF и ближнего порядка. Можно вспомнить понятие магических чисел для нанокластеров, в котором попытка учесть дискретность фактически отражает учет уникальности, особого характера, неких атомных конфигураций. В более развитом виде это верно для К-систем; предположим наличие состояний «залипания-защелки» уже на атомарно-молекулярном уровне.

Обсудим на примере перколяции 4-ю, и отчасти 2-ю, пару противоположностей. Идея этого метода состоит в представлении материала в виде дискретной решетки, состоящей из узлов и связей между ними. Существует два подхода к решению: задача узлов и задача связей. Можно выборочно случайным образом красить (открывать) узлы решетки, считая долю крашенных узлов основным независимым параметром и полагая два крашенных узла принадлежащими одному кластеру, если их можно соединить непрерывной цепочкой соседних крашенных узлов. Такие вопросы, как среднее число узлов в кластере, распределение кластеров по размерам, появление бесконечного кластера и доля входящих в него крашенных узлов, составляют содержание задачи узлов. Но можно также выборочно красить (открывать) связи между соседними узлами и считать, что одному кластеру принадлежат узлы, соединенные цепочками открытых связей. Если все узлы (или все связи) закрыты, решетка является моделью изолятора. Когда они все открыты и по проводящим связям через открытые узлы может идти ток, то решетка моделирует проводник. При каком-то критическом значении произойдет перколяционный переход, являющийся геометрическим аналогом перехода проводник-изолятор, т.е. возникает за-

висимость макро-свойств от коннектома, причем сами свойства рассматриваются в первую очередь, как транспортные.

Теория перколяции важна именно в окрестности перехода. Вдали от перехода достаточно аппроксимации эффективной среды. Перколяционный переход аналогичен фазовому переходу второго рода. Этот подход к апробирован в области электрокинетических явлений на границе раздела твердой и жидкой фаз.

Инкорпорация свойств среды в формальные параметры К-системы

Рассмотрим, как применить абстракцию К-системы, для задачи о проводимости мемристивной МДМ-структуры. В области филамента диффузионно-ионные процессы под действием поля (рис. 2) обычно приводят к образованию кислородных вакансий, и, соответственно, ловушечных уровней (одного или нескольких) в запрещенной зоне. В самом примитивном случае одна такая ловушка есть денотат элемента К-системы и может находиться в состоянии «0», «1» или «2» по числу пойманных электронов. Часто возникает кластер вакансий размера $\sim 0,3 \div 0,5$ нм, область нарушенной стехиометрии и единая дискретная особенность электронной структуры аморфизированного тела, и тогда мощность множества состояний больше $3 \leq |S| \leq 12$. Этот кластер можно характеризовать не только спектром электронных состояний, но и экстенсивным параметром общего количества вакансий, который, по сути, есть параметр управления. Эти области разделены средой, а критерием попарной связности элементов К-системы выступает пространственная близость.

Два физических механизма связи это дрейф электронов в зоне проводимости и квантовомеханическое туннелирование. В роли сигнала выступает число и энергетический спектр перемещенных электронов. Вероятность туннелирования зависит от профиля потенциального барьера на дистанции между областями, исходных уровней ловушек и внешнего поля. Здесь имеется скрытое противоречие с формализмом алгоритма действия. Оно не чувствуется, если К-система базируется на сети Петри, когда сигнал представлен фишками, но оно становится видимым, если К-система опирается на модель формального нейрона, когда в явном виде не вводится состояние нейрона. Если же берется клеточный автомат (КА), как решетка конечных автоматов, тогда сигналы банально дублируют состояния соседей. Покажем в формуле (1) эту подмену в локальной функции перехода, т.е. в алгоритме действия, для полутоталистичного КА (здесь даны строчными буквами элементы множеств, элемент генерирующий действие (центральный) мы не ин-

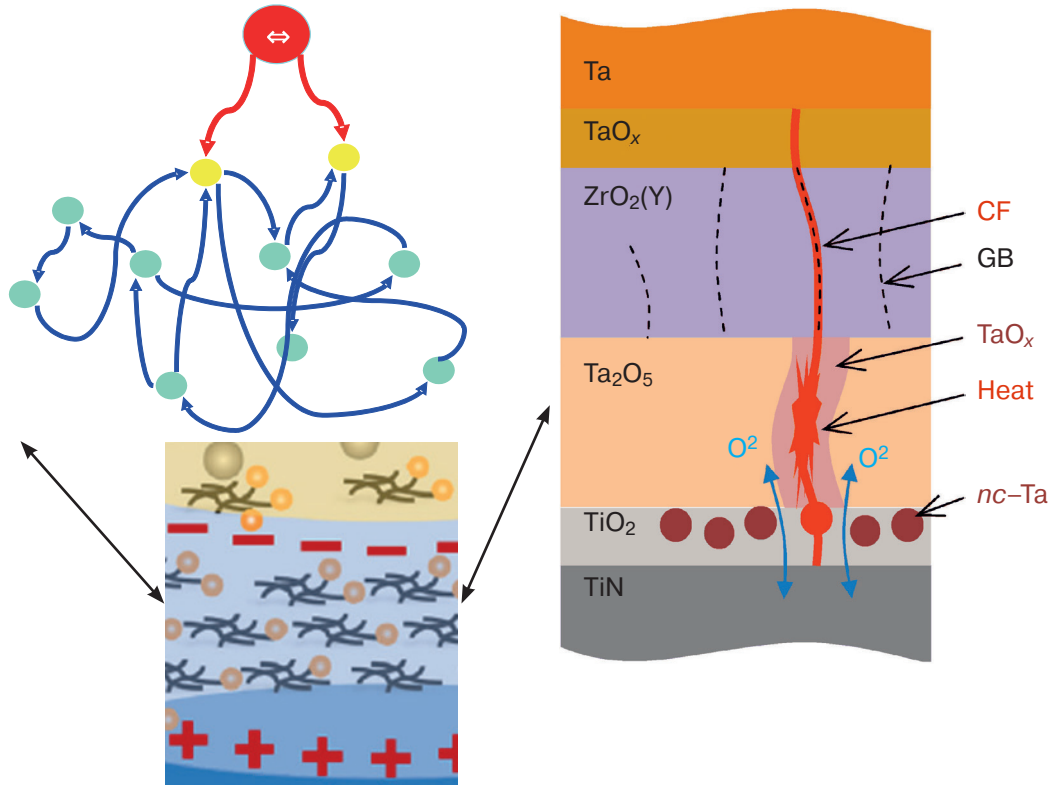


Рис. 2. К-система в составе мемристора. Слева схема разных состояний элементов (показано паутинкой, иногда с жёлтым или просто цветным кружочком), зависящих от потенциалов верхнего и нижнего электродов. Справа показан поток джоулева тепла в области филамента CF и более широком регионе теплового воздействия и измененной фазы GB, где происходит металлизация диэлектрика [12]. Запутанность связей между ловушками или кристаллитами показана кривыми линиями

Fig. 2. K-system in the memristor. On the left is a diagram of different states of the elements (shown as a spider web, sometimes with a yellow or simply colored circle), depending on the potentials of the upper and lower electrodes. On the right is the Joule heat flux in the filament region CF and a wider region of thermal action and altered phase GB, where the dielectric is metallized [12]. The entanglement of connections between traps or crystallites is shown by curved lines

дексируем снизу, как его соседей, а верхний индекс указывает на момент актуализации состояния):

$$s^{t+1} := \mathcal{A}(s^t, \sum q_i^t), \quad q_i^t \triangleq s_i^t, \\ q_i^t \triangleq w_{is_i^t}, \quad q_i^t \triangleq w_i(s_i^t - s^t), \quad t \in T. \quad (1)$$

Слева направо указаны три варианта подмены: наивный, с весами (возможность обучения КА), и отражающий физику, например, закон Фика, если в весах учесть коэффициент диффузии. По аналогии с автоматом Мили алгоритм действия должен обновить выходные сигналы для элемента с n входами и m выходами

$$q_j^{t+1} := \mathcal{A}(s^t, q_1^t, \dots, q_n^t), \quad i \in \overline{1, n}, \quad j \in \overline{1, m}, \\ q_j^{t+1} := \mathcal{A}(s^{t+1}, q_1^t, \dots, q_n^{t+1}). \quad (2)$$

Слева в формуле (2) дан синхронный вариант, подходящий для материаловедения, а вариант справа есть экзотика асинхронности, полезная в попытке ввести вероятные переходы. Формулы (1) и (2) должны применяться одновременно, отражая единство алгоритма действия и физического

процесса. Суть противоречия в том, элемент при генерации сигнала формально не «знает» текущего состояния соседа и, недостаточно зная свое состояние. Законы переноса включают градиенты физической величины, например, потенциала в законе Ома (Кирхгофа). Два энергетических параметра есть и в расчете, в ВКБ приближении (метод (Вентцеля — Крамерса — Бриллюэна), проницаемости барьера (3):

$$s_{1,2} \stackrel{\text{def}}{=} \phi_{1,2}, \quad J = \sigma \frac{\phi_2 - \phi_1}{d_{21}}, \quad w_{12} = w_{21}, \\ q_j \stackrel{\text{def}}{=} J, \quad J = w_{12}N_1 = w_{21}N_2, \\ w_{21} \sim \exp\left(\frac{-4\pi^2}{\hbar} \int_1^2 \sqrt{2n(W - U(x))} dx\right), \quad (3)$$

где W — энергия электрона; d_{21} — длина переноса из элемента 1 в элемент 2; J — плотность тока; N — переменная состояния, хранимое элементом число электронов. Проводимость среды σ и вероятность перескока между ловушками w , которые зависят от рассеяния на фононах, определяют интенсивность сигнала и зависят от среды. Указанное противоречие чувствуется для схемотехнических реализаций спайковых нейронных сетей,

когда из биофизики берется понятие мембранного потенциала.

Рассмотрим для данного примера семантику функции искажения $Q \xrightarrow{B} Q$. Очевидно здесь ведущая роль принадлежит среде. Если рассматривать механизм ТАТ (*Trap Assisted Tunneling*), то рассеяние энергии электрона можно учесть либо в алгоритме действия, либо в функции искажения. Высокоэнергетические (горячие) электроны, ускоренные полем, могут покидать область филамента геометрически или энергетически, попав с уровня ловушки в ансамбль электронов зоны проводимости. Процессы рекомбинации–генерации носителей заряда имеют вторичное значение для сигнала, но нужно учитывать при изменении состояния элемента как фоновый процесс (рис. 3). Простой пример на функцию искажения — было эмитировано 3 электрона, а целевой элемент принял 2 или 4.

Влияние К–системы на параметры среды

В качестве примера приведем первое уравнение Максвелла (Пуассона), в правой части которого (4) стоит артефакт К–системы. Вместе со связывающим индукцию $\mathbf{D}$ и напряженность поля $\mathbf{E}$ материальным соотношением.

$$\nabla \mathbf{D} = \rho, \mathbf{D} = \varepsilon(r)\varepsilon_0 \mathbf{E}. \quad (4)$$

В формуле (4) мы показали пространственную зависимость диэлектрической проницаемости. Как и для вектора поляризации, представление об этих величинах носит эмпирико–макроскопический

характер, хотя для объемов порядка 10 нм^3 сам их смысл, не только числовые значения, весьма неясен (с учетом квантовой механики). Помимо локальных характеристик, среда обладает интегральными, статистическими характеристиками: подвижность μ , теплопроводность и т.п.

Под средой мы, для целей моделирования, понимаем (5) кортеж $\langle \beta \rangle$ –непрерывных функций, определенных на границах $\delta\Omega$ (краевые условия, прежде всего для электрического поля) и внутри объема Ω за вычетом точек, занятых К–системой. Эти точки получают статус узлов интерполяции, как это делается в методе конечных элементов. Технически можно интегрировать эти функции по объему для получения параметров среды например, сопротивления мемристора; но влияние К–системы не прямое и более сложное. Фоновым процессом является непрерывная во времени диссипация энергии, рекомбинация носителей заряда, рост нанокристалла за счет стока атомов при коалесценции и т. п. (рис. 3).

$$\beta = \beta(\mathbf{r}), \mathbf{r} \in \Omega / U\Omega_k, \mathbf{r}_k \in \Omega_k, \beta \stackrel{\text{def}}{=} \int \beta(\mathbf{r}) d\Omega, \quad (5)$$

где $\mathbf{r}_k$ — координаты элементов К–системы; Ω_k — ассоциированные с ними окрестности–шары малого радиуса, условно равному размеру диполя в 2–3 атомных связи. Размер этих шаров зависит от параметров времени процессов, т. е. один элемент может порождать 2–3 шара.

Формулу (5) можно интерпретировать как дефиницию макропараметра среды, которая представлена непрерывной функцией, интерполируе-

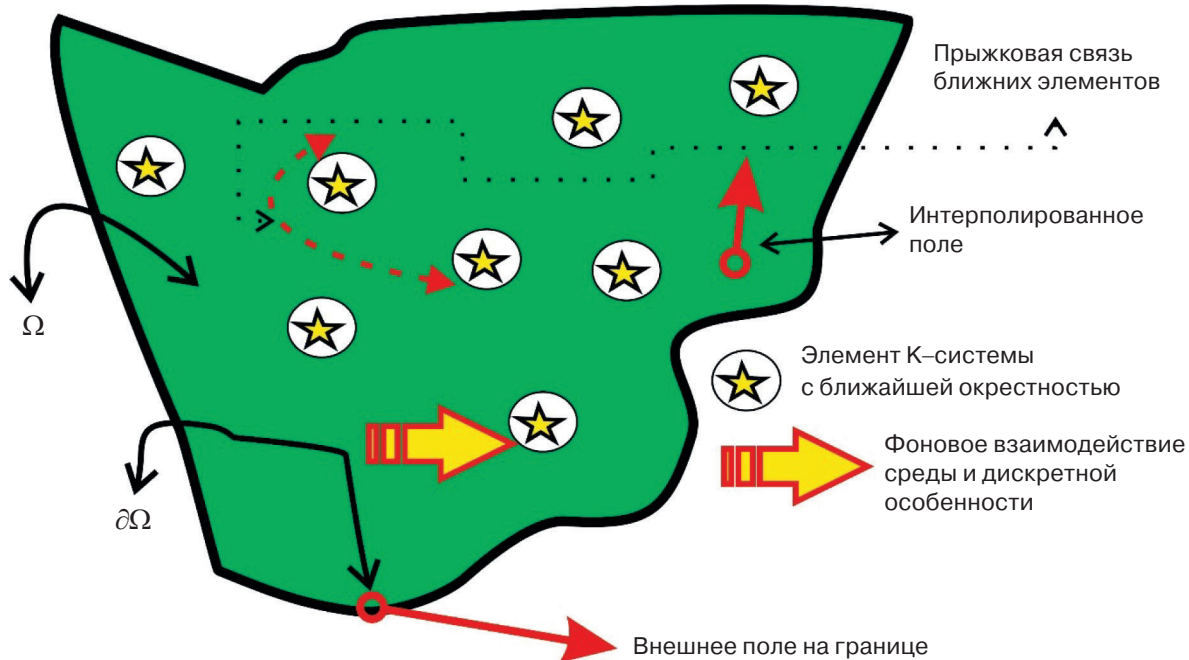


Рис. 3. Погруженная в среду К–система
Fig. 3. C–system immersed in the environment

мой на основе значений в узлах $\beta_k = \beta(\mathbf{r}_k)$, которые, в свою очередь, определяются динамикой элементов K -системы.

Примером такого сложного влияния выступает правило Матиссена для электропроводности сплавов. Под этим углом зрения можно посмотреть на зависимость коэффициента диффузии от концентрации вакансий в кристалле. Ни одна из известных формул не учитывает прядка расположения вакансий. Модель дипольных ловушек и DDF [2, 3] дает нам чуть более простой пример влияния на подвижность.

В действительности мы разбили мезо- или микросистему на две подсистемы, взаимодействие которых необходимо реализовать в рамках единой модели. Состояние элемента определяет числовое значение опорной точки или узла интерполянта для кортежа $\langle \beta \rangle$ на внутренних границах среды и K -системы. Для мемристора интегральное сопротивление определяется пулом электронов в зоне проводимости и пулом электронов на ловушках. Этот пул электронов является примером делокализованного объекта, и этот газ должен считаться в отдельной статистике, а локализованные (белые круги на рис. 3) на элементах K -системы электроны должны учитываться более сложно, но все-таки возможна интегральная характеристика (в рамках компактной модели) взаимодействия этих типов электронов. Мы оставили в стороне соотношение быстрых и медленных процессов, например, реконфигурирование K -системы при ионном дрейфе и росте филамента или электроформовке.

Резисты с химическим усилением CAR для литографии на длинах волн ~ 13 нм служат напоми-

нанием о том, что K -система образуется за счет материала среды в ходе процессов самоорганизации и кластеризации, что уводит нас в область коллоидной химии. Исходная наша позиция была в том, что динамика общего состояния, возможно, химерного (*Chimera State*, по терминологии моделей коллективной нелинейной динамики), влияет на макропараметры среды. Но само наличие K -системы, ее формирование, влияет, например, на вязкость или, как в случае CAR, взаимодействие с травителем.

В работе [18] исследовался механизм преобразования света гибридным фоторезистом, содержащим из наночастиц HfO_2 или оксидов других металлов (олова, цинка) или лигандов типа триметилалюминия, фторированных агрилсульфонатов с генерацией диметакриловой или бензойной кислот. В обычной схеме CAR присутствуют одновременно три лиганда-мономера. Основа, т. е. матрица композита, которая и служит средой для формирующейся K -системы, делается из ПММА (полиметилметакрилата) или, для негативного фоторезиста, из полистирена.

Заключение

В работе сделана попытка показать возможность применения концепции K -системы к моделированию наноструктурированных материалов. Скрытым препятствием для такого применения, как и для создания нейроморфных систем, реализующих точную поведенческую модель K -систем, является то, что сигнал обычно есть функция разности состояний элементов, а не одного только элемента-процессора.

Библиографический список / References

1. Матюшкин И.В., Тельминов О.А. Формально-философские вопросы коннекционизма и актуальные проблемы разработки нейроморфных систем. *Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника*. 2022; (2(186)): 49—59. <https://doi.org/10.7868/S2410993222020099>
2. Матюшкин И.В., Тельминов О.А. Formal and philosophical issues of connectionism and actual problems of neuromorphic systems design. *Electronic Engineering. Series 3: Microelectronics*. 2022; (2(186)): 49—59. (In Russ). <https://doi.org/10.7868/S2410993222020099>
3. Видеоролик «Странное явление, муравьи бегают по кругу пока все не погибнут!». https://youtu.be/i_25OGxAdC0?si=Do_TMfrQV-eKx_FDT
4. Video clip "Strange phenomenon, ants run in circles until they all die!". (In Russ.). https://youtu.be/i_25OGxAdC0?si=Do_TMfrQV-eKx_FDT
5. Painter K.J. Mathematical models for chemotaxis and their applications in self-organisation phenomena. *Journal of Theoretical Biology*. 2018; 481. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2018.06.019>
6. Gill W.B. Drift mobilities in amorphous charge-transfer complexes of trinitrofluorenone and poly-n-vinylcarbazole. *Journal of Applied Physics*. 1972; 43(12): 5033—5040. <https://doi.org/10.1063/1.16610655033>
7. Tyutnev A., Saenko V., Pozhidaev E. Dipolar disorder formalism revisited. *Chemical Physics*. 2011; 389(1–3): 75—80. <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2011.08.003>
8. Горнев Е.С., Матюшкин И.В., Калимова И.Ф. Сравнительный анализ моделей проводимости мемристивных структурах на основе тонких пленок нитрида кремния. *Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника*. 2021; (2(182)): 33—48. <https://www.elibrary.ru/mbfxfm>
9. Gornev E.S., Matushkin I.V., Kalimova I.F. Comparative analysis of conductivity models in memristive structures based on thin films of silicon nitride. *Electronic Engineering. Series 3: Microelectronics*. 2021; (2(182)): 33—48. (In Russ). <https://www.elibrary.ru/mbfxfm>
10. Serdouk F., Boumali A., Makhlof A., Benkhedi M.L. Solutions of q-deformed multiple-trapping model (MTM) for charge carrier transport from time-of-flight transient (TOF) photo-current in amorphous semiconductors. *Revista Mexicana de Física*. 2020; 66(5): 643—655. <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.66.643>
11. Никеров А.В. Транспорт носителей заряда в молекулярно допированных полимерах. Дисс. ... канд.

физ.-мат. наук. МИФИ; 2016. 100 с. <https://www.elibrary.ru/yxlrlcl>

Nikero A.V. Transport of charge carriers in molecularly doped polymers. Diss. ... Cand. Sci. Phys.-Math. ME-PhI; 2016. 100 p. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/yxlrlcl>

9. Dieckmann A., Bäessler H., Borsenberger P.M. An assessment of the role of dipoles on the density-of-states function of disordered molecular solids. *The Journal of Chemical Physics*. 1993; 99(10): 8136—8141. <https://doi.org/10.1063/1.465640>

10. Tyutnev A., Ikhsanov R., Saenko V., Pozhidaev E. Analysis of the carrier transport in molecularly doped polymers using the multiple trapping model with the Gaussian trap distribution. *Chemical Physics*. 2012; 404: 88—93. <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2012.03.004>

11. Burdakov Ya.V., Saunina A.Yu., Bäessler H., Köhler A., Nikitenko V.R. Modeling of charge transport in polymers with embedded crystallites. *Physical Review B*. 2023; 108(8/2): 085301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.108.085301>

12. Mikhaylov A., Belov A., Korolev D., Antonov I., Kotomina V., Kotina A., Gryaznov E., Sharapov A., Koryazhkina M., Kryukov R., Zubkov S., Sushkov A., Pavlov D., Tikhov S., Morozov O., Tetelbaum D. Multilayer metal-oxide memristive device with stabilized resistive switching. *Advanced Materials Technologies*. 2020; 5(1): 1900607. <https://doi.org/10.1002/admt.201900607>

13. Guseinov D.V., Matyushkin I.V., Chernyaev N.V., Mikhaylov A.N., Pershin Y.V. Capacitive effects can make memristors chaotic. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2021; 144: 110699. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2021.110699>; <https://www.elibrary.ru/bukycp>

14. Россоленко А.Н., Тулина Н.А., Шмытько И.М., Иванов А.А., Зотов А.В., Борисенко И.Ю., Сироткин В.В., Тулин В.А. Свойства перколяционных каналов в планарных мемристивных структурах на основе эпитаксиальных пленок оксидных перовскитных соединений $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ и $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_{3-\delta}$. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2023; 87(4): 541—545. <https://doi.org/10.31857/S036767652270096X>; <https://www.elibrary.ru/noxznr>

Rossolenko A.N., Tulina N.A., Shmytko I.M., Ivanov A.A., Zotov A.V., Borisenko I.Y., Sirotkin V.V., Tulina V.A. Properties of percolation channels in planar memristive structures base on epitaxial films of oxide perovskite compounds $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ and $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_{3-\delta}$. *Izvestiya rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya*. 2023; 87(4): 541—545. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S036767652270096X>; <https://www.elibrary.ru/noxznr>

15. Pasinetti P.M., Centres P.M., Ramirez-Pastor A.J. Jamming and percolation of k^2 -mers on simple cubic lattices. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. 2019; 2019(10): 103204. <https://doi.org/10.1088/1742-5468/ab409c>; <https://www.elibrary.ru/ropxjp>

16. Москалев П.В. Перколяционное моделирование пористых структур. М.: URSS; 2018. 240 с. <https://www.elibrary.ru/zrjswd>

Moskalov P.V. Percolation modeling of porous structures. Moscow: URSS; 2018. 240 p. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/zrjswd>

17. Liu J., Kang W. New chemically amplified positive photoresist with phenolic resin modified by GMA and BOC protection. *Polymers*. 2023; 15(7): 1598. <https://doi.org/10.3390/polym15071598>

18. Manouras T., Argitis P. High sensitivity resists for EUV lithography: A review of material design strategies and performance results. *Nanomaterials*. 2020; 10(8): 1593. <https://doi.org/10.3390/nano10081593>; <https://www.elibrary.ru/qdbice>

19. Funato S., Kinoshita Y., Kudo T., Masuda S., Okazaki H., Padmanaban M., Przybilla K.J., Suehiro N., Pawlowski G. Photodecomposable bases. A novel concept to stabilize chemically amplified resists. *Journal of Photopolymer Science and Technology*. 1995; 8(4): 543—553. <https://doi.org/10.2494/photopolymer.8.543>

20. Foulger S.H., Bandera Yu., Grant B., Vilčáková J., Sába P. Exploiting multiple percolation in two-terminal memristor to achieve a multitude of resistive states. *Journal of Materials Chemistry C*. 2021; 9(28): 8975—8986. <https://doi.org/10.1039/d1tc00987g>

Информация об авторе / Information about the author

Матюшкин Игорь Валерьевич — канд. физ.-мат. наук, АО «НИИ молекулярной электроники», ул. Акад. Валиева, д. 6, стр. 1, Зеленоград, Москва, 124460, Российская Федерация; доцент кафедры проектирования и конструирования интегральных микросхем, Национальный исследовательский университет «МИЭТ», пл. Шокина, д. 1, Зеленоград, Москва, 124498, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2988-8803>; e-mail: imatyushkin@niime.ru

Igor V. Matyushkin — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Molecular Electronics Research Institute, JSC, 6–1 Acad. Valieva Str., Zelenograd, Moscow 124460, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Design and Construction of Integrated Circuits, National Research University of Electronic Technology, 1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow 124498, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2988-8803>; e-mail: imatyushkin@niime.ru

Поступила в редакцию 14.11.2023; поступила после доработки 25.03.2024; принята к публикации 08.05.2024
Received 14 November 2023; Revised 25 March 2024; Accepted 8 May 2024