

Наблюдение динамического флуктуационного фазового перехода проводимости островковой пленки серебра

П.О. Ксенофонтова *^{1,2}, Р.Т. Сибатов^{1,2}, М.А. Сауров¹, А.П. Орлов^{3,4}

¹ Научно-производственный комплекс «Технологический центр», Москва, Россия

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

³ Институт нанотехнологий и микроэлектроники РАН, Москва, Россия

⁴ Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 21.05.2025

Одобрена после рецензирования 29.08.2025

Принята к публикации 29.08.2025

Аннотация

В данной работе предложен метод формирования островковых плёнок серебра (ОПС) в критической области перехода металл-диэлектрик, основанный на оптимизации времени отжига исходно проводящей плёнки. Обнаружено, что полученная ОПС обладает фрактальной структурой с размерностью Хаусдорфа наибольших кластеров $D = 1.6$. При приложении постоянного напряжения проводимость ОПС начинает флуктуировать во времени. Проведенный статистический анализ флуктуаций проводимости показал, что ниже некоторого порога существуют малые гауссовы флуктуации, выше порога наблюдаются события падения и роста (скачки) проводимости, временные интервалы между которыми распределены по степенному закону. Распределение величины скачков согласуется с асимптотикой устойчивого закона Леви. Таким образом, мы рассматриваем статистику проводимости ОПС в критической области перехода металл-диэлектрик как флуктуационный фазовый переход, разделяющий малые гауссовы флуктуации и большие скачки, соответствующие распределению Леви.

Ключевые слова: островковые серебряные пленки, критическое поведение, нейроморфные вычисления, распределение Леви

EDN: MLODOA

doi:10.24412/2949-0553-2025-418-04-12

Observation of dynamic fluctuation phase transition of conductivity of silver island film

P.O. Ksenofontova*^{1,2}, R.T. Sibatov^{1,2}, M.A. Saurov¹, A.P. Orlov^{3,4}

¹ Scientific-Manufacturing Complex “Technological Center”, Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technologies, Moscow, Russia

³ Institute of Nanotechnologies of Microelectronics RAS, Moscow, Russia

⁴ Kotelnikov institute of radio engineering and electronics of RAS, Moscow, Russia

* polina.ksenofontova.2002@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку: Полина Олеговна Ксенофонтова, polina.ksenofontova.2002@mail.ru

Abstract

In this paper, we propose a method for forming silver island films (SIF) in the critical region of the metal-insulator transition based on the optimization of the annealing time of the initially conducting film. It was found that the resulting SIF has a fractal structure with the Hausdorff dimension of the largest clusters $D = 1.6$. When a constant voltage is applied, the SIF conductivity begins to fluctuate in time. The statistical analysis of the conductivity fluctuations showed that below a certain threshold there are small Gaussian fluctuations, and above the threshold, events of decrease and increase (jumps) in conductivity are observed, the time intervals between which are distributed according to a power law. The distribution of the jump values is consistent with the asymptotics of the stable Levy law. Thus, we consider the statistics of the SIF conductivity in the critical region of the metal-insulator transition as a fluctuation phase transition separating small Gaussian fluctuations and large jumps corresponding to the Levy distribution.

Key words: silver island films, critical behavior, neuromorphic computing, Levy distribution

Введение

Перколяционные системы, такие как островковые плёнки серебра (ОПС) или сети серебряных наностержней, в критической области перехода металл-диэлектрик проявляют сложную динамику, включая самоорганизованную критичность и свойства, аналогичные наблюдаемым в биологических нейронных сетях [1]. Эти системы являются перспективными кандидатами для аппаратной реализации нейроморфных вычислений, что подтверждается их успешным применением в прогнозировании нелинейных временных рядов [2] и задачах распознавания образов [3]. ОПС обладают двумя ключевыми свойствами резервуарных вычислений [4]: затухающей памятью и нелинейным преобразованием входных сигналов в многомерное пространство.

Первое свойство связывают со следующими физическими механизмами. Ниже порога перколяции ОПС состоит из кластеров, разделенных туннельными промежутками; приложенное напряжение вызывает образование мостиков (филаментов) атомарного масштаба в промежутках между кластерами [1–3]. Разрушение проводящих мостиков происходит вследствие диффузии атомов серебра и обусловлено стремлением системы минимизировать свою поверхностную энергию. Разрыв может быть вызван также разогревом мостика из-за высокой плотности тока. Акты роста/разрушения нитей соединяют/разрывают соседние кластеры, вызывая скачок в виде увеличения/падения проводимости ОПС. Из-за инерционности и обратимости процессов проводимость изменяется с запаздыванием, что приводит к характерной для систем с памятью (мемристивных систем) петле гистерезиса на вольтамперной характеристике, проходящей через начало координат [4–7]. Подобные мемристивные системы, управляемые напряжением, отличаются тем, что способны удерживать состояние проводимости при отсутствии внешнего напряжения [7]. В связи с тем, что сформированные нити являются термодинамически неустойчивыми, они разрушаются при отсутствии внешнего воздействия, тем самым проводимость постепенно затухает до минимального значения, демонстрируя эффект затухающей памяти.

Второе свойство обусловлено критическим поведением системы. Высокая размерность вычислительного пространства связана с большой вариацией перколяционных путей в критической области [8]. Корреляционная длина ξ ведёт себя как: $\xi \sim |p - p_c|^{-\nu}$ при $a \ll \xi \ll d$, где d – размер системы, a – микроскопический масштаб, а ν – универсальный критический индекс, зависящий от размерности системы. Вдали от порога перколяции, при $\xi \ll d$, флуктуации проводимости ОПС, как правило, имеют гауссово распределение [8]. Однако в критической области, где корреляционная длина существенно превышает размеры образца, распределение флуктуаций проводимости демонстрирует степенной (безмасштабный) характер [9,10], и статистика системы отлична от гауссовой. ОПС могут функционировать в динамическом перколяционном режиме, при котором макроскопическая структура остаётся стабильной, а стохастические флуктуации проводимости между нанокластерами обеспечивают высокую чувствительность системы к внешним воздействиям и нелинейный отклик [1].

В данной работе методом термически-вакуумного испарения получены ОПС в критической области перехода металл-диэлектрик при фиксированной массе испаряемого материала и температуре отжига за счет контроля времени отжига. Вследствие отжига пленка переходит из резистивного состояния в мемристивное, при котором наблюдается гистерезис на вольтамперной характеристике, сохраняющий поведение в условиях высокого вакуума. Исследованы статистические особенности временной динамики проводимости при постоянном внешнем напряжении в условиях воздуха и высокого вакуума. Показано, что проводимость ОПС состоит из гауссовых флуктуаций, сопровождающихся событиями скачков и падений проводимости, временные интервалы между которыми распределены по степенному закону. Знание статистических свойств проводимости (распределение скачков, интервалов между скачками, временные корреляции, параметры мелкомасштабных флуктуаций) в перколяционных

плёнках серебра позволяет прогнозировать их поведение в нейроморфных системах [11].

1. Методика получения образцов с ОПС вблизи порога перколяции

Исследуемый образец представляет собой ОПС на мультиэлектродной ячейке с изготовленными методом электронно-лучевого испарения золотыми электродами толщиной 100 нм, рис. 1а. Осаждение пленки серебра выполнено через маску в зазор между электродами методом резистивного вакуум-термического испарения, подробно описанным в работе [12]. Была изготовлена плёнка с массой навески 20 мг, рис. 1а, демонстрирующая металлическое поведение, что подтверждается резистивным характером её вольтамперной характеристики.

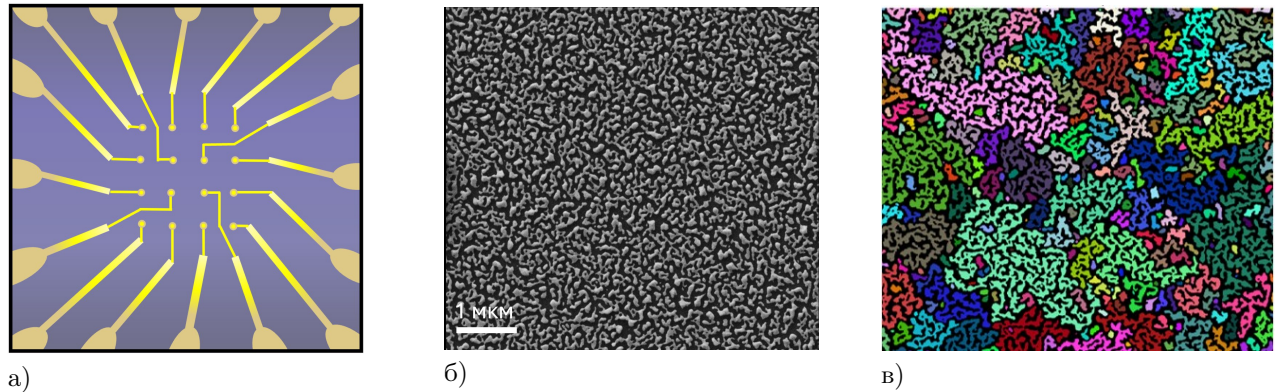


Рисунок 1 – Исследуемый образец с ОПС а) изображение мультиэлектродной ячейки в оптический микроскоп, зазоры 80 мкм, б) РЭМ изображение пленки серебра после отжига, в) цветное выделение изолированных кластеров, свидетельствующее о широком распределении кластеров по размерам

Первоначальная пленка с массой навески 20 мг, представленная на рис. 2а, обладает островковой структурой со стягивающим кластером, вследствие которого наблюдается резистивное поведение на вольтамперной характеристике. При отжиге в течение 30 минут в условиях высокого вакуума 10^{-5} Торр сформировалась плёнка, состоящая из фрактальных кластеров, разделенных туннельными промежутками рис. 1б, рис. 2б, с широким распределением кластеров серебра по размерам, рис. 1в. Определена размерность Хаусдорфа для наибольшего кластера, она оказалась равной $D = 1.6$. В процессе отжига происходит релаксация внутренних напряжений в островках, сопровождающаяся их частичным разрывом, при этом улучшается адгезия плёнки к подложке и повышается её кристалличность. При отжиге 40 минут, рис. 2в, наблюдается существенное изменение морфологии кластеров, увеличение размера и количества туннельных промежутков, размерность Хаусдорфа для наибольшего кластера оказалась равной $D = 1.5$. Имеет место коалесценция (слияние) соседних наноостровков, обусловленная поверхностной диффузией атомов серебра и стремлением системы к минимизации поверхностной энергии. В результате увеличивается средний размер островков, уменьшается их плотность и происходит утолщение пленки.

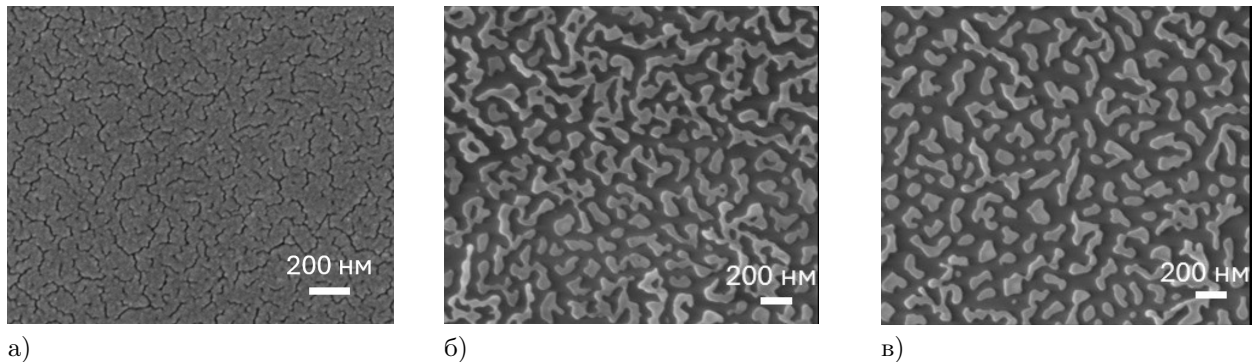


Рисунок 2 – РЭМ изображение морфологии ОПС а) исходная ОПС масса навески 20 мг, б) отжиг 30 минут, в) отжиг 40 минут

В критической области система проявляет масштабно-инвариантное поведение, характеризующееся широким степенным распределением кластеров по размерам, что соответствует критическому

состоянию между изолированными фрагментами и единым перколяционным кластером. Для ОПС после 30-минутного отжига наблюдается широкое распределение размеров кластеров, указывающее на нахождение системы в критической области.

Вольтамперная характеристика данной плёнки имеет нелинейный мемристивный характер, рис. 3а. Для исключения влияния атмосферы вольтамперная характеристика дополнительно измерялась в вакуумных условиях. Предварительно образец подвергали термической обработке при температуре 80°C в течение 1 часа в условиях высокого вакуума для десорбции поверхностных загрязнений. Вольтамперная характеристика ОПС в вакууме (10^{-6} Торр) представлена на рис. 3б: наблюдается увеличение рабочих напряжений и рабочих токов, что, вероятно, связано с влиянием этапа удаления адсорбатов и изменением исходной морфологии образца, однако мемристивный эффект в данных условиях сохраняется.

Гистерезис на ВАХ наблюдался ранее в работах с наночастицами серебра, где осаждение происходило параллельно с контролем значений тока при приложении малых напряжений [1–3]. Согласно ряду работ, гистерезис свидетельствует о мемристивных свойствах, возникающих из-за реконфигурации токопроводящих путей между нанокластерами в критической области и миграции ионов серебра под действием поля [1,2]. Это обеспечивает память сопротивления, зависящую от истории воздействий, и аналоговую переключаемость состояний. Однако точные механизмы, приводящие к подобному поведению на ВАХ ОПС, до сих пор обсуждаются.

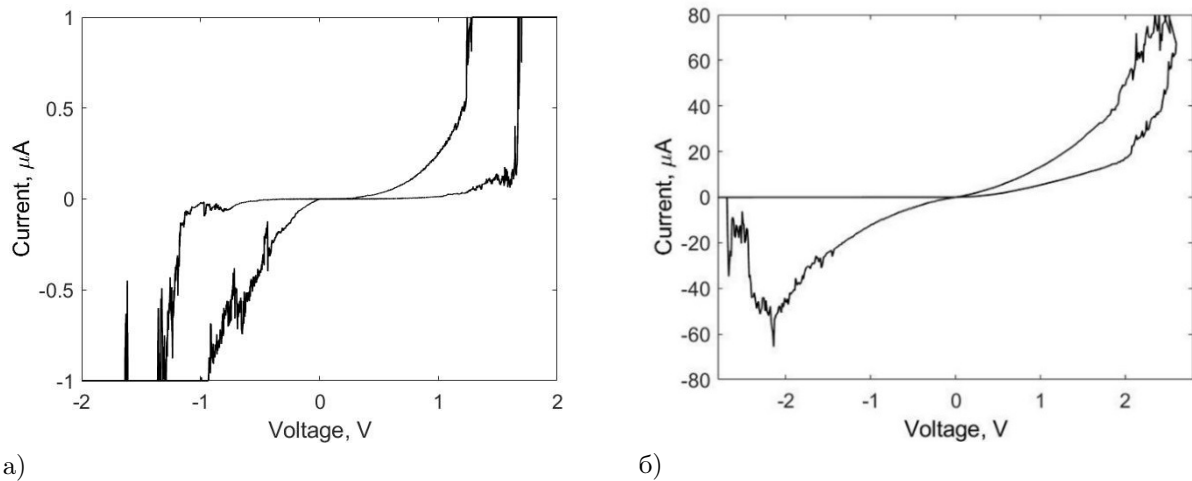


Рисунок 3 – Вольтамперные характеристики а) исходной пленки выше порога перколяции, б) пленки после отжига, в) пленки после отжига в условиях вакуума 10^{-6} Торр

Таким образом, подобрав время отжига, мы приблизили ОПС к критической области металл-диэлектрик из проводящего состояния. Близость к критической области подтверждается нелинейностью ВАХ с выраженным гистерезисом, рис. 3, резким увеличением тока (на несколько порядков) при небольших вариациях напряжения, свидетельствующих о чувствительности ОПС к малым возмущениям, существенными флуктуациями проводимости, наблюдаемыми на ветвях гистерезиса, а также наличием фрактальных кластеров серебра, рис. 1б, различных масштабов, рис. 1в. Вакуумные условия увеличили рабочие напряжения образцов за счет исключения влияния атмосферы и возможного изменения морфологии пленки в процессе отжига при 80°C . Диапазон рабочих напряжений для последующего измерения проводимости в режиме постоянного напряжения составляет 1-2 В.

2. Временная динамика проводимости в режиме постоянного напряжения

Проведено сравнение динамики проводимости ОПС при постоянном напряжении в условиях высокого вакуума и на воздухе с длительностью снятия сигнала 500 сек. Наблюдаемые скачки проводимости на рисунке 4а, представленные в значениях кванта кондактанса $G_0 = 77.5$ мкСм, свидетельствуют об актах роста и разрушения нитей атомарного масштаба в туннельных зазорах.

Для определения события «скачка» проводимости от гауссова шума график представляется в виде зависимости разницы соседних точек проводимости ΔG от t . Использовался метод интерквартильного размаха (IQR): значение IQR соответствует разнице между 25-ым Q_1 и 75-ым Q_3 квантилями для ΔG .

Верхняя (HB) и нижняя (LB) границы шумовых значений определены как $HB = Q_3 + 1.5 \cdot IQR$ и $LB = Q_1 - 1.5 \cdot IQR$, рис. 4б.

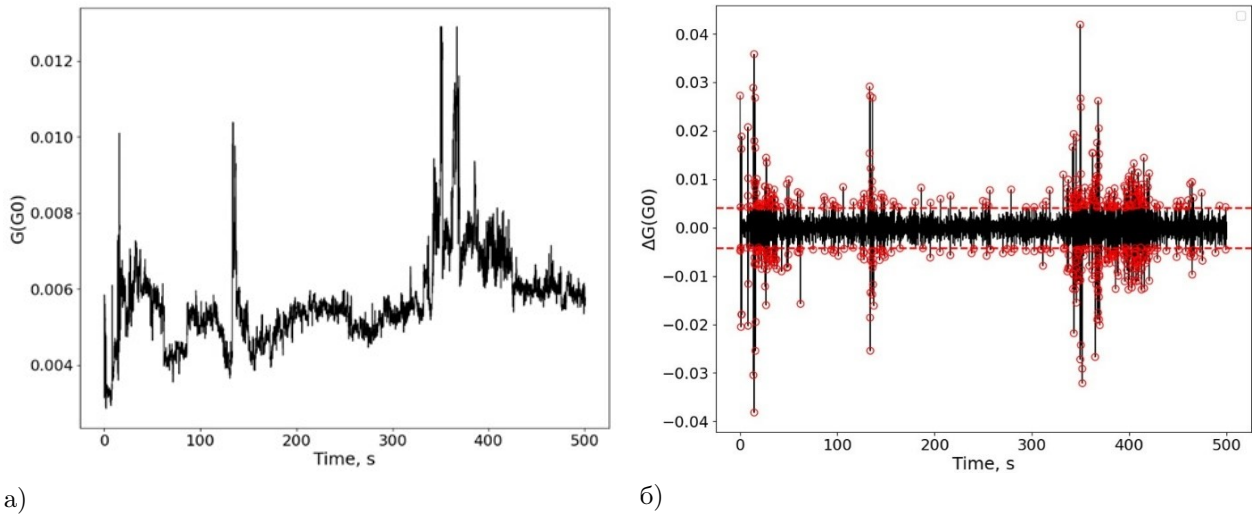


Рисунок 4 – Скачки проводимости при напряжении 1В а) исходное измерение проводимости, б) определение скачков проводимости IQR методом, красные точки – скачки проводимости

Данные внутри диапазона HB и LB соответствуют распределению Гаусса, рис. 5а, что подтверждается на квантильном-квантильном графике (QQ - график), рисунок 5б.

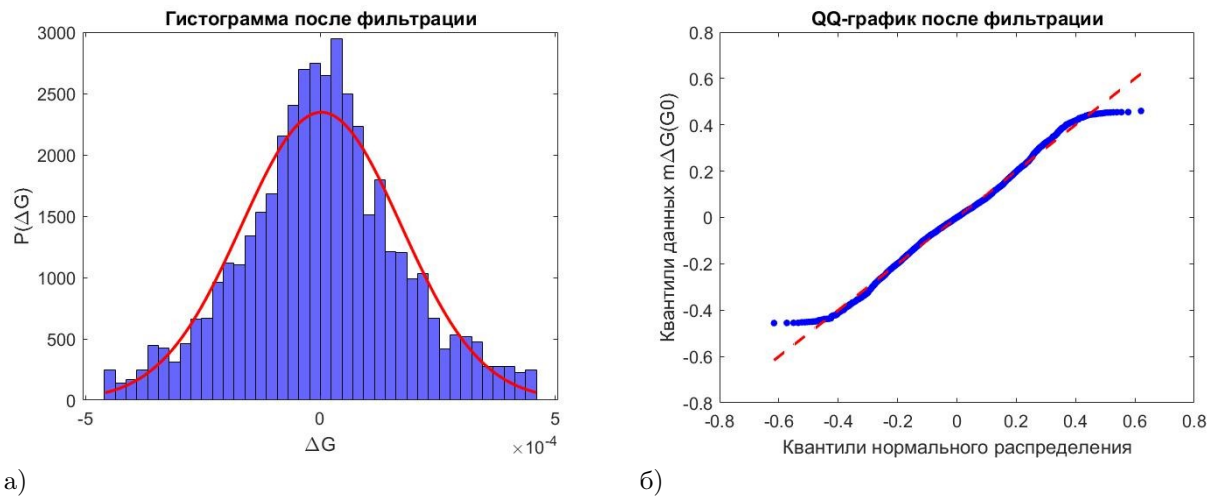


Рисунок 5 – а) Гистограмма приращений проводимости после фильтрации и удаления скачков проводимости при $U = 1В$, красная линия – аппроксимация гауссовой плотностью распределения, б) QQ - график скачков проводимости, красная прямая – нормальное распределение

Пример определения степенных показателей представлен на рисунке 6. Степенные показатели $P(\Delta G) \sim \Delta G^{-\alpha-1}$, $P(T) \sim T^{-\beta-1}$ описывают «тяжелые хвосты» асимптотики Леви распределения.

На рисунках 6а,б представлены распределения модуля изменений проводимости (разницы соседних значений) для измерений на воздухе и в условиях высокого вакуума. Аппроксимация степенным законом производилась на прямолинейном (в двойном логарифмическом масштабе) участке, соответствующем скачкам проводимости, определенным после фильтрации. Распределение временных интервалов между скачками, рис. 6в,г, также имеет степенной вид.

Распределение приращений проводимости успешно описывается смесью гауссова закона и устойчивого распределения Леви как в случае измерений на воздухе, так и для данных измерений в вакууме, рисунок 7.

Оценки степенных показателей представлены в таблице 1. В условиях высокого вакуума значение показателя $\alpha = 0,90$ меньше 1, то есть распределение скачков имеет существенно больший разброс значений ΔG .

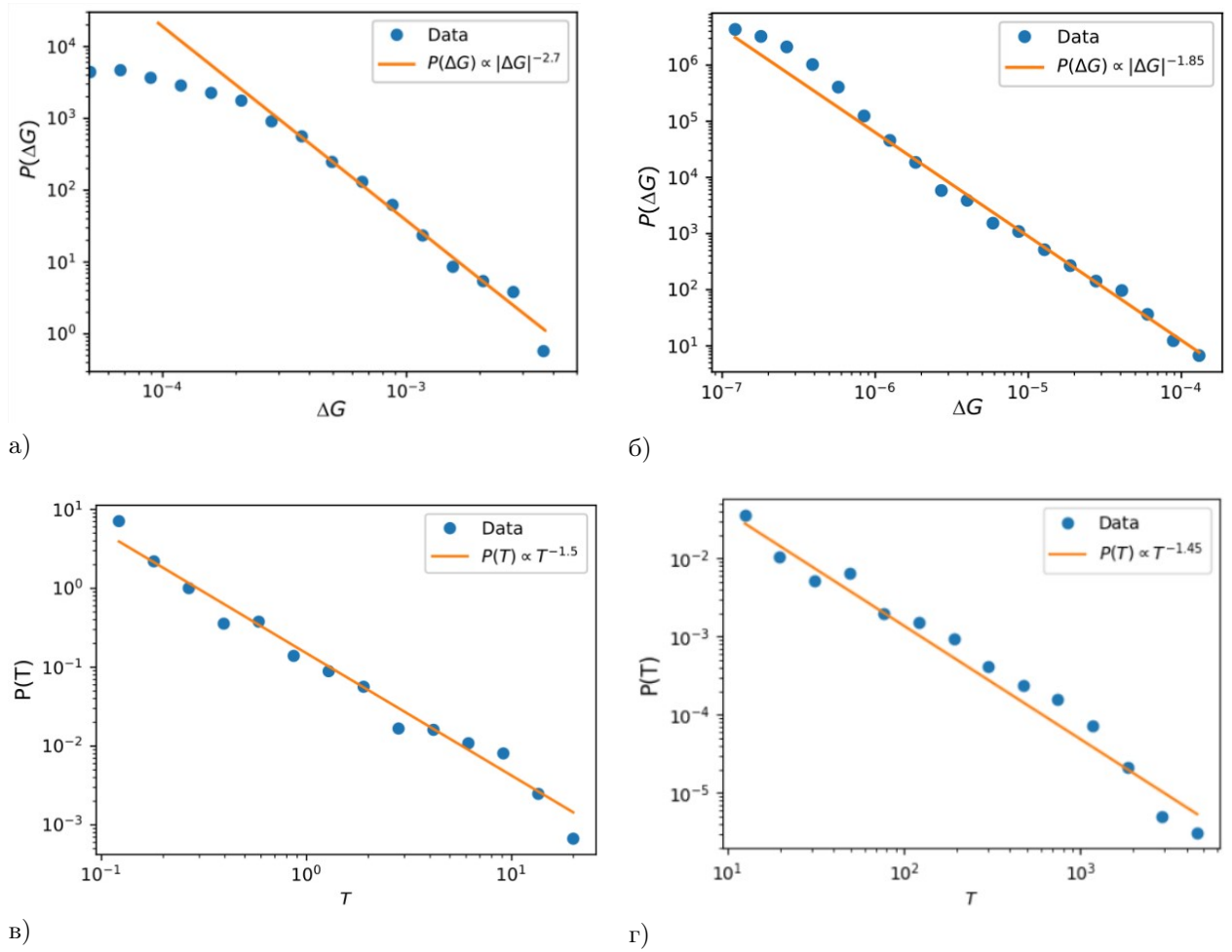


Рисунок 6 – Степенные хвосты распределений модуля изменения скачков (а, б) и времени ожидания между скачками (в, г). Рисунки (а) и (в) соответствуют данным измерений на воздухе при $U = 1$ В; (б) и (г) соответствуют данным измерений в вакууме при $U = 2$ В

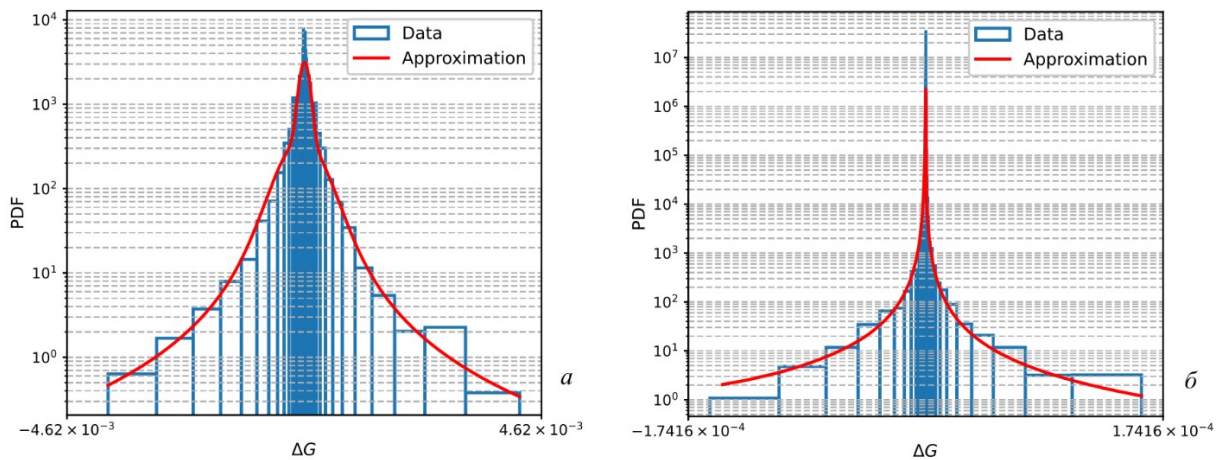


Рисунок 7 – Аппроксимация гистограммы приращений проводимости плотностью смеси гауссова закона и устойчивого распределения Леви, а) для данных при $U = 1$ В на воздухе, показатель $\alpha = 1.6$, вес гауссова закона $w_G = 0.62$, показатель асимметрии устойчивого закона $\theta = 0$, б) для данных в вакууме при $U = 2$ В, показатель $\alpha = 0.90$, вес гауссова закона $w_G = 0.85$, показатель асимметрии устойчивого закона $\theta = -0.17$

Таблица 1 – Сравнение степенных показателей в условиях воздуха и вакуума

Образец, среда	U, B	α	β	Вес гауссовой компоненты
ПМСН Ag, воздух	1	1.70 ± 0.05	0.50 ± 0.02	0.62
ПМСН Ag, воздух	1.5	1.93 ± 0.03	0.64 ± 0.05	0.61
ПМСН Ag, воздух	1.8	1.95 ± 0.03	0.74 ± 0.04	0.64
ПМСН Ag, вакуум	2	0.85 ± 0.11	0.45 ± 0.11	0.35

Плотность устойчивого распределения Леви $g^{(\alpha, \gamma)}(x)$ в общем случае не выражается в элементарных функциях. Её характеристическая функция может быть выражена формулой (1):

$$\tilde{g}^{(\alpha, \gamma)}(k) = \langle e^{ikS^{(\alpha, \gamma)}} \rangle = \exp\{-|k|^\alpha [1 - i\gamma \tan(\alpha\pi/2) \operatorname{sign}(k)]\}, \quad -\infty < k < \infty, \quad (1)$$

где α - степенной показатель, γ - параметр асимметрии, $S^{(\alpha, \gamma)}$ - устойчивая случайная величина.

Это стандартная характеристическая функция в форме А. Существует несколько других форм [13], наиболее популярной из них является форма С, определенная выражением (2):

$$\tilde{g}(k; \alpha, \theta) = \langle e^{ikS^{(\alpha, \theta)}} \rangle = \exp\{-|k|^\alpha \exp[-i\alpha\theta(\pi/2) \operatorname{sign}(k)]\}, \quad (2)$$

где α - степенной показатель, аналогичный форме А, θ - параметр асимметрии такой, что $\theta \in [-\theta_\alpha, \theta_\alpha]$, $\theta_\alpha = \min\{1, 2/\alpha - 1\}$. Параметр θ связан с параметром γ формулой (3):

$$\gamma = \tan(\theta\alpha\pi/2) / \tan(\alpha\pi/2). \quad (3)$$

Для соответствующих случайных величин S имеет место формула (4):

$$S(\alpha, \theta) \stackrel{d}{=} [\cos(\theta\alpha\pi/2)]^{1/\alpha} S^{(\alpha, \gamma)}, \quad (4)$$

где $\cos(\theta\alpha\pi/2) \geq 0$, $\theta \in [-\theta_\alpha, \theta_\alpha]$, $\alpha \in (0, 2]$.

В приложениях наиболее популярны два подкласса. Первый из них образован симметричными устойчивыми распределениями, характеристическая функция которых представлена формулой (5):

$$\tilde{g}(k; \alpha, 0) \equiv \tilde{g}(k; \alpha) = e^{-|k|^\alpha}, \quad -\infty < k < \infty, \quad 0 < \alpha \leq 2. \quad (5)$$

В частных случаях формула (5) представляет собой гауссову плотность, формула (6):

$$g(x; 2) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} e^{-x^2/4}, \quad -\infty < x < \infty, \quad (6)$$

и плотность Коши, формула (7):

$$g(x; 1) = \frac{1}{\pi(1+x^2)}, \quad -\infty < x < \infty. \quad (7)$$

Второй подкласс состоит из односторонних устойчивых распределений (субординаторов), формула (8):

$$g_+(x; \alpha) \equiv g(x; \alpha, 1), \quad S_+(\alpha) \equiv S(\alpha, 1), \quad 0 < \alpha < 1. \quad (8)$$

Их удобнее описывать с помощью характеристической функции Лапласа. В частности, для субординатора, распределенного на положительной полуоси, справедлива формула (9):

$$\hat{g}(\lambda; \alpha, 1) \equiv \hat{g}_+(\lambda; \alpha) = \langle e^{-\lambda S^{(\alpha, \theta)}} \rangle = e^{-\lambda^\alpha}, \quad 0 < \alpha \leq 1, \quad (9)$$

где λ - переменная Лапласа.

Характеристические показатели устойчивых распределений соответствуют значениям α , приведённым в таблице 1. Согласно таблице 1, измеренные на воздухе показатели соответствуют $1 < \alpha < 2$, что соответствует расходимости моментов порядка $m \geq 2$, включая дисперсию. Измеренный в вакууме показатель $\alpha < 1$ соответствует расходимости моментов порядка $m \geq 1$. Устойчивые распределения

Леви обладают свойством автомодельности и применяются для описания систем с дальнедействующими корреляциями и масштабной инвариантностью [13–15].

Во всех рассмотренных случаях степенной показатель β распределения времён ожидания между скачками проводимости меньше единицы, то есть система демонстрирует выраженную кластеризацию событий – скачки происходят не равномерно во времени, а своеобразными «лавинами», между которыми наблюдаются продолжительные периоды «покоя». Подобное поведение типично для систем, находящихся вблизи критической точки, где корреляции становятся масштабно-инвариантными, а динамика приобретает черты самоорганизованной критичности.

По-видимому, это можно объяснить иерархической организацией проводящих путей в перколяционной системе. В пленках серебра, находящихся в критической области, проводимость обеспечивается сложной сетью туннельных переходов между металлическими кластерами. Процессы формирования и разрыва отдельных проводящих мостиков оказываются сильно коррелированными, что приводит к кооперативному характеру перестроек всей проводящей сети. Наблюдаемое степенное распределение с $\beta < 1$ для времен ожидания согласуется с наличием эффекта памяти в системе [14].

Корректное статистическое описание флуктуаций проводимости в ОПС, согласованное с физическими механизмами, имеет важное значение для моделирования нейроморфных вычислительных систем на их основе [11, 16]. Показано, что динамика проводимости в ОПС вблизи критической области представляет собой суперпозицию гауссовых фоновых флуктуаций, обусловленных непрерывными процессами (по-видимому, связанными с тепловым шумом, туннелированием зарядов и незначительными изменениями в проводящих путях), и редких, но значительных скачков проводимости, связанных с перестройкой структуры сети проводящих каналов.

Заключение

В данной работе предложен метод формирования островковых плёнок серебра вблизи критической области перехода металл-диэлектрик, основанный на контролируемом отжиге исходно проводящей плёнки путём оптимизации времени отжига. Полученные плёнки обладают фрактальной структурой с размерностью Хаусдорфа $D = 1.6$ с широким распределением кластеров по размерам. Наблюдаемый гистерезис на вольтамперных характеристиках свидетельствует о наличии мемристивного эффекта в ОПС, по-видимому, связанного с коллективной перестройкой нитей атомарного масштаба между кластерами. Сравнительные исследования, проведенные в условиях высокого вакуума (10^{-6} Торр) и в атмосфере воздуха, выявили различия в динамике проводимости ОПС. Наблюдаемые отличия могут быть обусловлены изменением морфологии поверхности в результате десорбции адсорбированных молекул газовой среды для измерений в условиях вакуума. Статистический анализ динамики флуктуаций скачков проводимости выявил их критический характер. Показано, что динамика флуктуаций проводимости в системе при постоянном напряжении (на воздухе и в высоком вакууме) представляет собой смесь гауссова процесса с коррелированными полётами Леви, соответствующими редким скачкам проводимости с расходящейся дисперсией, и степенным распределением времени ожидания между скачками. Определены параметры статистических распределений скачков проводимости и временных интервалов между скачками. Нахождение исследуемых пленок, соответствующее критическому состоянию системы, обуславливает совокупность функциональных свойств: низкое напряжение резистивного переключения (1–2 В), высокую чувствительность отклика ОПС к слабым электрическим воздействиям и нелокальный во времени характер динамики проводимости. Это создает перспективы для реализации устройств, работающих в критическом режиме на основе динамического фазового перехода флуктуаций проводимости, для обработки сигналов с долговременными степенными корреляциями.

Финансирование

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

Список литературы

- [1] Mallinson J.B., Shirai S., Acharya S.K., Bose S.K., Galli E., Brown S.A. Avalanches and criticality in self-organized nanoscale networks // Science advances. 2019. Vol. 5. No. 11. P. eaaw8438. doi: 10.1126/sciadv.aaw8438

- [2] Mallinson J.B., Steel J.K., Heywood Z.E., Studholme S.J., Bones P.J., Brown S.A. Experimental demonstration of reservoir computing with self-assembled percolating networks of nanoparticles // *Advanced Materials*. 2024. Vol. 36. No. 29. P. 2402319. doi: [10.1002/adma.202402319](https://doi.org/10.1002/adma.202402319), EDN: [OQOWBO](#)
- [3] Milano G., Pedretti G., Montano K., Ricci S., Hashemkhani S., Boarino L., Lelmini D., Ricciardi C. In materia reservoir computing with a fully memristive architecture based on self-organizing nanowire networks // *Nature materials*. 2022. Vol. 21. P. 195-202. doi: [10.1038/s41563-021-01099-9](https://doi.org/10.1038/s41563-021-01099-9), EDN: [KTDCVC](#)
- [4] Tanaka G., Yamane T., Herox J.B., Nakane R., Kanazawa N., Takeda S., Numata H., Nakano D., Hirose A. Recent advances in physical reservoir computing: A review // *Neural Networks*. 2019. Vol. 115. P. 100-123. doi: [10.1016/j.neunet.2019.03.005](https://doi.org/10.1016/j.neunet.2019.03.005), EDN: [VOGBIE](#)
- [5] Ксенофонтова П.О., Василевская Ю.О., Сибатов Р.Т. Кинетическая модель эволюции филаментов в перколяционном массиве наночастиц серебра // *Ученые записки физического ф-та Московского университета*. 2024, №4, 2441401. EDN: [AJNOED](#)
- [6] Diaz-Alvarez A., Higuchi R., Sanz-Leon P., Marcus I., Shingaya Y., Stieg A.Z., Gimzewski J.K., Kuncic Z., Nakayama T. Emergent dynamics of neuromorphic nanowire networks // *Scientific reports*. 2019. Vol. 9, No 1. P. 14920. doi: [10.1038/s41598-019-51330-6](https://doi.org/10.1038/s41598-019-51330-6), EDN: [KEQMRN](#)
- [7] Chua L. O., Kang S. M. Memristive devices and systems // *Proceedings of the IEEE*. 1976. Vol. 64. No 2. P. 209-223. doi: [10.1109/PROC.1976.10092](https://doi.org/10.1109/PROC.1976.10092)
- [8] Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников, 1979.
- [9] Fostner S., Brown R., Carr J., Brown S.A. Continuum percolation with tunneling // *Physical Review B*. 2014. Vol. 89. No 7. P. 075402. doi: [10.1103/PhysRevB.89.075402](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.89.075402), EDN: [SPVBJP](#)
- [10] Ambrosetti G., Balberg I., Grimaldi C. Percolation-to-hopping crossover in conductor-insulator composites // *Physical Review B-Condensed Matter and Materials Physics*. 2010. Vol. 82. No 13. P. 134201. doi: [10.1103/PhysRevB.82.134201](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.134201), EDN: [OFDWHD](#)
- [11] Milano G., Michieletti F., Pilati D., Ricciardi C., Miranda E. Self-organizing neuromorphic nanowire networks as stochastic dynamical systems // *Nature Communications*. 2025. Vol. 16. No 1. P. 3509. doi: [10.1038/s41467-025-58741-2](https://doi.org/10.1038/s41467-025-58741-2)
- [12] Sibatov R.T., Savitskiy A.I., L'vov P.E., Vasilevskaya Y.O., Kitsyuk E.P. Self-Organized Memristive Ensembles of Nanoparticles Below the Percolation Threshold: Switching Dynamics and Phase Field Description // *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13. No 14. P. 2039. doi: [10.3390/nano13142039](https://doi.org/10.3390/nano13142039), EDN: [LGQKZL](#)
- [13] Uchaikin V.V., Zolotarev V.M. Chance and stability: stable distributions and their applications // *Walter de Gruyter*, 2011.
- [14] Sornette D. Critical phenomena in natural sciences: chaos, fractals, selforganization and disorder: concepts and tools. Springer Science & Business Media, 2006.
- [15] Сибатов Р.Т., Учайкин В.В. Дробно-дифференциальный подход к описанию дисперсионного переноса в полупроводниках // *Успехи физических наук*. 2009. Vol. 179. No 10. P. 1079-1104. EDN: [LKFGTD](#)
- [16] Uchaikin V. V., Cahoy D. O., Sibatov R. T. Fractional processes: from Poisson to branching one // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2008. Vol. 18. No. 9. P. 2717-2725. doi: [10.1142/S0218127408021932](https://doi.org/10.1142/S0218127408021932) EDN: [LLOJIB](#)

Ссылка для цитирования:

Ксенофонтова П.О., Сибатов Р.Т., Сауров М.А., Орлов А.П. Наблюдение динамического флуктуационного фазового перехода проводимости островковой пленки серебра // *Современная электродинамика*. 2025. Т. 4, № 4(18). С. 04-12. EDN [MLODOA](#), doi: [10.24412/2949-0553-2025-418-04-12](https://doi.org/10.24412/2949-0553-2025-418-04-12)

Citation link:

Ksenofontova P.O., Sibatov R.T., Saurov M.A., Orlov A.P. Observation of dynamic fluctuation phase transition of conductivity of silver island film // *Modern Electrodynamics*. 2025. Vol. 4, No. 4(18). P. 04-12. EDN [MLODOA](#), doi: [10.24412/2949-0553-2025-418-04-12](https://doi.org/10.24412/2949-0553-2025-418-04-12)