

УДК 53.097

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ЗАРЯДА ПО МОДЕЛИ МОТТА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА

**В. А. Сокурено**, аспирант ТУСУР, м.н.с., Томск, Россия;

orcid.org/0009-0007-3378-0380, e-mail: sokurenko.sl.08@mail.ru

**Ю. В. Сахаров**, д.т.н., профессор, и.о. заведующего кафедрой ФЭ ТУСУР, Томск, Россия;

orcid.org/0000-0002-7044-6900, e-mail: iurii.v.sakharov@tusur.ru

**П. Е. Троян**, д.т.н., профессор кафедры ФЭ ТУСУР, Томск, Россия;

orcid.org/0000-0002-7349-0536, e-mail: tpe@tusur.ru

*Проведено исследование электропроводности углеродной резистивной плёнки методом совместного анализа вольт-амперных характеристик и характеристик низкочастотного  $1/f$ -шума в координатах Мотта в температурном диапазоне от  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+110\text{ }^{\circ}\text{C}$ , напряжении  $3\text{ В}$  и полосе частот  $\Delta f$ :  $0,5\text{ Гц} - 10\text{ Гц}$ ;  $0,5\text{ Гц} - 1\text{ кГц}$ ;  $0,5\text{ Гц} - 10\text{ кГц}$ . **Целью работы** является сопоставление уточнения модели проводимости и оценки возможностей шумового анализа как инструмента диагностики и прогнозирования надёжности резистивных элементов. Показано, что частотный диапазон измерений шума существенно влияет на определяемый механизм переноса заряда: от ближайших прыжков при низких частотах ( $n = 1$ ) до классических двумерных и трёхмерных режимов прыжковой проводимости при более высоких частотах ( $n = 3 - 4$ ). Полученные результаты позволяют уточнить модель электропроводности исследуемого материала и подтверждают высокую информативность шумового анализа для диагностики структурных особенностей. Результаты анализа могут использоваться для прогнозирования надёжности резистивных элементов.*

**Ключевые слова:** низкочастотный шум, ВАХ, переходы Мотта, энергия активации, электропроводность, диагностика.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2026-95-270-278

### Введение

Одним из эффективных методов изучения электропроводности является совместный анализ вольт-амперных характеристик (ВАХ) и характеристик низкочастотного  $1/f$ -шума. Если ВАХ отражает усреднённый отклик системы, то шумовые измерения фиксируют флуктуации, возникающие при взаимодействии носителей заряда со структурой материала. Например, в туннельных контактах [1] или на локализованных состояниях в диэлектрической матрице [2]. Такой подход позволяет выявлять изменения механизма проводимости и ранние признаки деградации, которые могут оставаться незаметными при анализе только ВАХ. Ранее проведённые исследования показали, что шумовые характеристики часто демонстрируют более высокую чувствительность к структурным дефектам и микроскопическим изменениям, чем стандартные электрические измерения ВАХ [3]. Совместный анализ ВАХ и ампер-шумовых характеристик (АШХ) должен позволить сопоставить экспериментальные данные с различными теоретическими моделями переноса и использовать шумовые характеристики для оценки структурных особенностей материала.

Ранее опубликованная работа [4] была посвящена анализу механизмов электропроводности резистивных углеродных плёнок на основе сопоставления ВАХ и АШХ в координатах, соответствующих барьерным и туннельным моделям. Основной целью работы было установить, какие классические модели полевой эмиссии применимы при описании процессов переноса заряда в углеродной керметной плёнке. В данной работе исследуется вклад прыжкового механизма в формирование как проводимости, так и низкочастотных шумов для тех же образцов, что и в ранее опубликованной работе. Целью работы является исследование электропроводности резистивной плёнки на основе углерода по ВАХ и АШХ низкочастотного

шума в координатах Мотта в широком температурном диапазоне от  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+110\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при фиксированном напряжении 3 В и полосе частот  $\Delta f$ : 0,5 Гц – 10 Гц; 0,5 Гц – 1 кГц; 0,5 Гц – 10 кГц.

В настоящей работе предполагается, что низкочастотный шум описывается механизмом Макуортерса, согласно которому флуктуации тока обусловлены захватом и высвобождением носителей заряда на локализованных состояниях. Каждая ловушка формирует спектр Лоренца, а широкое распределение времен релаксации  $\tau$  приводит к суммарному спектру типа  $1/f$ , что подробно рассмотрено в работах [5, 6]. Следует подчеркнуть, что локализованные состояния ответственны не только за шумовые процессы, но и за перенос заряда, что позволяет связать данный шумовой механизм с моделью Мотта.

Прыжковая проводимость в аморфных твердых телах и наноструктурах описывается законом Мотта переменного радиуса, где перенос заряда осуществляется за счёт термически активированного туннелирования между локализованными состояниями с переменными расстояниями и энергиями активации [7-9]. В этой модели ток или проводимость подчиняются выражению:

$$I(T) = I_0 \exp \left[ - \left( \frac{T_0}{T} \right)^n \right],$$

где  $I_0$  – предэкспоненциальный множитель, определяющий масштаб тока в модели Мотта;  $T_0$  – характеристическая температура Мотта;  $n$  – показатель степени в модели Мотта, определяющий размерность системы и характер прыжков.

При практической оценке наличия прыжковой проводимости по закону Мотта при анализе ВАХ используют логарифмическую зависимость  $\ln(I) = f(T^{-n})$  или  $\ln(I/T^2) = f(T^{-n})$  для усиления температурной составляющей зависимости.

Показатель степени  $n$  в модели Мотта отражает физический механизм переноса заряда в неупорядоченном материале. Этот параметр определяет, какое именно множество локализованных состояний участвует в переносе и на какие расстояния и с какой энергетической выгодой происходит прыжок носителя заряда. Например, при  $n = 1$  перенос осуществляется преимущественно между ближайшими локализованными центрами. Такой механизм называется ближним переходом. При увеличении значения  $n$  процесс переноса переходит в область дальних переходов. При этом носители заряда перемещаются на более дальние, но энергетически более выгодные состояния. Это соответствует механизму переменного-диапазонной прыжковой проводимости. В инженерной практике допускается использование целочисленных значений  $n = 1 \div 7$  и подбора такого показателя степени, при котором зависимость становится наиболее линейной. Линейность этой зависимости указывает на соответствие экспериментальных данных конкретному режиму прыжковой проводимости. Именно изменение показателя  $n$  позволяет установить, какой механизм переноса доминирует в исследуемом материале при данных условиях температур. Таким образом значения  $n = 1 \div 7$  соответствуют различным типам прыжков в зависимости от размерности системы, плотности состояний и влияния кулоновских корреляций [10-12].

Обычно механизм прыжковой проводимости рассматривается в контексте полупроводниковых материалов. Однако, как отмечено в работе [13], теория Мотта применима также к диэлектрикам и резистивным плёнкам. Причиной этого является наличие в подобных материалах системы локализованных состояний, обусловленных структурной неупорядоченностью, высоким уровнем дефектов и сильным рассеянием носителей. В таких условиях перенос заряда осуществляется на разную длину прыжка. Учитывая, что углеродные пасты, применяемые для получения толстоплёночных резисторов, основаны на техническом углероде, а данный материал имеет неупорядоченную структуру [20], и сама плёнка представляет собой композит с диэлектрическими связками, формирующими дополнительные ловушки и барьеры, наличие локализованных состояний в таком материале неизбежно. Это делает примененные модели Мотта и соответственно анализ в координатах прыжковой проводимости физи-

чески обоснованными для исследуемой углеродной резистивной плёнки. Следовательно, применение модели Макуртерса является физически обоснованным и согласуется с моделью Мотта, описывающей прыжковую проводимость в подобных материалах.

Исследование направлено на выявление возможного вклада переменного-диапазонного прыжкового механизма в формирование как проводимости, так и шумовых характеристик, а также на установление взаимосвязи между механизмами переноса заряда и генерацией  $1/f$ -шума. Такой подход позволит не только уточнить модель электропроводности в различных температурно-полевых режимах, но и оценить перспективность применения анализа шумовых характеристик как дополнительного инструмента диагностики и прогнозирования надёжности резистивных элементов.

### Материалы и методы

Для исследования были изготовлены толстопленочные резисторы на основе углеродной пасты методом принтерной печати. В качестве основания (подложки) был выбран фольгированный стеклотекстолит марки FR-4, медная пленка которого использовалась для формирования контактных площадок. Для резистивной пленки использовалась паста ПУРП-0,05 с поверхностным сопротивлением  $\rho_s = 50 \text{ Ом}/\square$ .

Для измерения низкочастотного шума использовалось разработанное устройство на основе малошумящего усилителя (рисунок 1). На входе фильтр ФВЧ, а выход последнего каскада соединен с блоком фильтров ФНЧ для измерения шума в полосе частот: 0,5 Гц – 10 Гц; 0,5 Гц – 1 кГц; 0,5 Гц – 10 кГц. Выход блока фильтров соединен с осциллографом. В качестве источника внешнего питания использовались Mh-Ni батареи. Экранированные блоки источника питания, исследуемого образца, усилителя и осциллографа соединены с помощью экранированного высокочастотного кабеля.

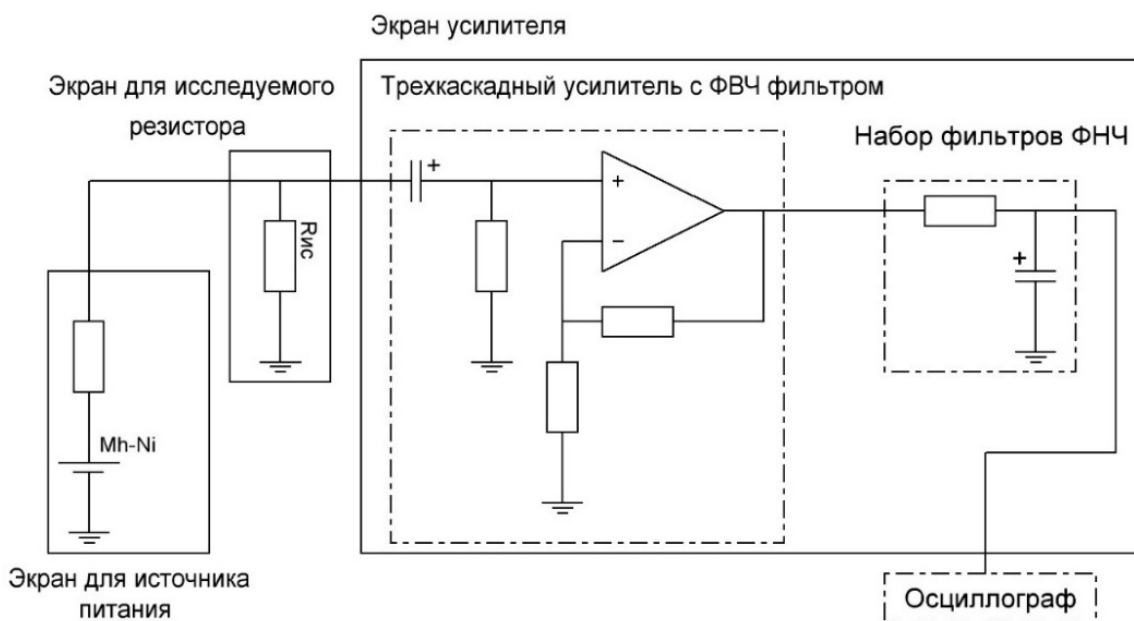


Рисунок 1 – Блок-схема для измерения низкочастотного шума  
Figure 1 – Block diagram for measuring low frequency noise

Для построения ВАХ (I-U) измерялись падение напряжения на исследуемом резисторе и ток через делитель напряжения. Рассчитанное сопротивление исследуемого образца, по значению тока через делитель напряжения и падения напряжения на образце, использовалось для расчета тока низкочастотного шума по следующей формуле:

$$I_{ш} = \frac{U_{ш}}{R},$$

где  $U_{ш}$  – среднеквадратичное напряжение низкочастотного шума, измеренное с помощью усилителя в полосе частот 0,5 Гц – 10 кГц и при падении напряжения на образце 3 В;  $R$  – сопротивление исследуемого образца при падении напряжения на образце 3 В.

Выбор напряжения смещения 3 В обусловлен необходимостью соблюдения двух условий. Во-первых, при более высоких напряжениях проявляется нагрев резистивной пленки, что приводит к неконтролируемому увеличению температуры образца и, как следствие, к искажению результатов при анализе температурной зависимости проводимости и шумовых характеристик. Во-вторых, напряжение ниже 3 В является недостаточным для устойчивой регистрации флуктуации шума. При повышении напряжения до 3 В амплитуда флуктуации увеличивается и тогда появляется возможность точной оценки изменения уровня шума при изменении температуры. Таким образом, напряжение 3 В обеспечивает оптимальный компромисс между минимизацией нагрева и достаточным уровнем сигнала шумовых флуктуаций.

Для нагрева резистора блок с исследуемым резистором помещался в климатическую камеру СМ-60/100-120 ТВХ. Через внешнее отверстие в камере осуществлялся вывод высокочастотных разъемов к батарейному блоку и блоку усилителя. Таким образом осуществлялось устранение влияния нагрева на батареи, резистор для ограничения тока и усилитель, а изменение электрофизических параметров исследуемого образца определялось только нагревом. Для охлаждения резистора в металлический короб с исследуемым образцом заливался жидкий азот. В обоих случаях контроль температуры осуществлялся с помощью термопары типа К, расположенной вблизи исследуемого образца и помещенной в металлический короб с исследуемым резистором. Перед измерением температуры с помощью термопары осуществлялась проверка ее работы с помощью климатической камеры. Погрешность используемой термопары составила не более 1,3 %, что для данного исследования являлось допустимым.

В ходе подготовки эксперимента было принято решение обеспечить максимально возможный температурный диапазон, чтобы получить наиболее полную картину изменения электрофизических параметров исследуемого резистора. Предпринятые меры позволили охватить практически предельный диапазон от  $-150$  °С до  $+110$  °С. Диапазон температур от  $-150$  °С до  $+110$  °С определялся техническими возможностями экспериментальной установки. Верхняя граница была обусловлена ограничениями климатической камеры при нагреве, а нижняя — испарением жидкого азота и невозможностью поддерживать более низкие температуры в используемой конфигурации. Тем не менее, предпринятые меры позволили охватить максимально возможный температурный диапазон.

### Результаты и обсуждения

На рисунке 2 представлена ВАХ в координатах Мотта [13] при температуре от  $-50$  °С до  $+110$  °С, при фиксированном напряжении 3 В. Представленная зависимость имеет максимальное спрямление при  $n = 7$ . На рисунках 3-5 представлена АШХ в координатах Мотта в полосе частот  $\Delta f = 0,5$  Гц – 10 кГц при температуре от  $-150$  °С до  $+110$  °С и фиксированном напряжении 3 В.

Анализируя данные рисунков 3-5, можно отметить, что увеличение частотного диапазона приводит к смещению максимального спрямления с  $n = 1$  при  $\Delta f = 0,5$  Гц – 10 Гц к  $n = 3$  и  $n = 4$  при  $\Delta f = 0,5$  Гц-1 кГц и  $\Delta f = 0,5$  Гц – 10 кГц соответственно. При  $n = 3$  и  $n = 4$  реализуется классический прыжковый механизм для двухмерной и трёхмерной системы, в то время как  $n = 1$  соответствует прыжку к ближайшему соседнему локализованному состоянию с фиксированной энергией активации [9, 11, 12].

При  $n = 1$  электропроводность реализуется с участием фононов (термически облегченное туннелирование) на минимальные расстояния [14, 15]. Следовательно, измеренный низкочастотный шум в полосе до 10 Гц отражает спектр максимальной энергии носителей заряда. Стоит отметить, что данный вид переноса носителей в аморфных структурах при сильной локализации и температурах выше  $\sim 200$  К происходит именно по механизму ближайших прыжков, которые можно описать по закону Аррениуса [19].

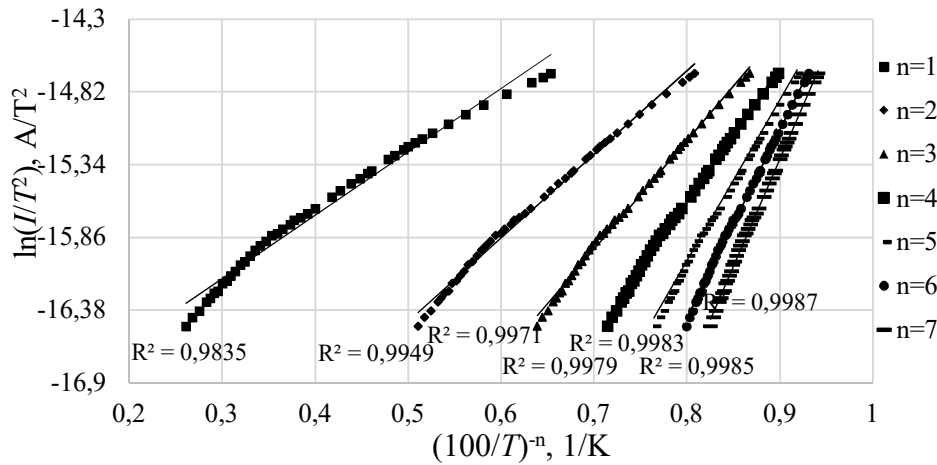


Рисунок 2 – ВАХ в координатах Мотта  
 Figure 2 – Current-voltage characteristics in Mott coordinates

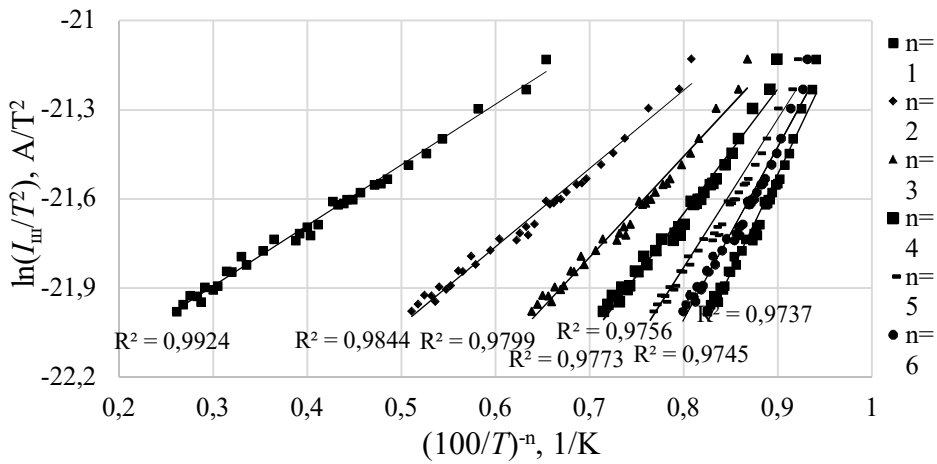


Рисунок 3 – АШХ низкочастотного шума в координатах Мотта  
 в полосе частот  $\Delta f = 0,5 \text{ Гц} - 10 \text{ Гц}$   
 Figure 3 – Ampere-noise characteristics of low-frequency noise in Mott coordinates  
 in frequency bands  $\Delta f = 0,5 \text{ Hz} - 10 \text{ Hz}$

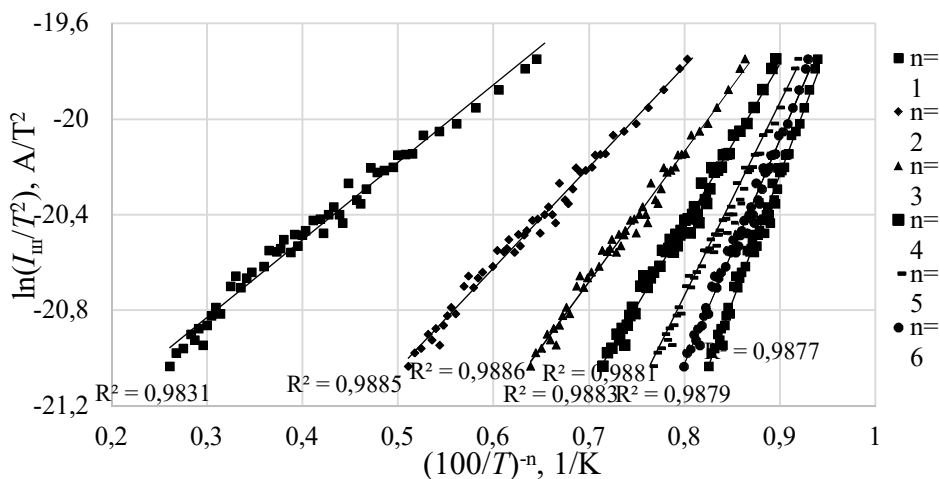
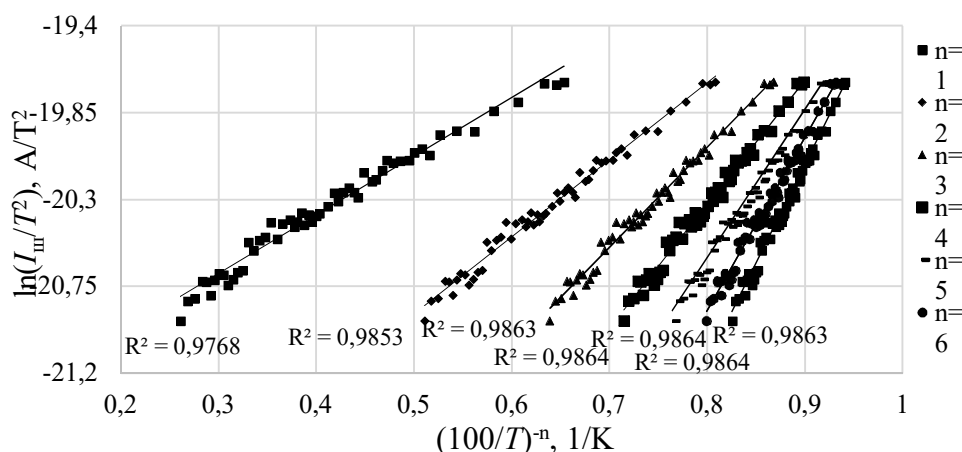


Рисунок 4 – АШХ низкочастотного шума в координатах Мотта в полосе частот  
 $\Delta f = 0,5 \text{ Гц} - 1 \text{ кГц}$   
 Figure 4 – Ampere-noise characteristics of low-frequency noise in Mott coordinates  
 in frequency bands  $\Delta f = 0,5 \text{ Hz} - 1 \text{ kHz}$



**Рисунок 5 – АШХ низкочастотного шума в координатах Мотта в полосе частот  $\Delta f = 0,5$  Гц – 10 кГц**

**Figure 5 – Ampere-noise characteristics of low-frequency noise in Mott coordinates in frequency bands  $\Delta f = 0,5$  Hz – 10 kHz**

С другой стороны, АШХ в частотном диапазоне  $\Delta f = 0,5$  Гц – 10 кГц приобретает наибольшую линейность при  $n \geq 3$ , что соответствует переходам, когда электрон переходит в новое локализованное состояние через путь с фиксированным расстоянием или минимальной энергией активации среди множества локализованных состояний [16]. Такой режим реализует совокупный ток в системе, формируемый множественными переходами с различными длинами прыжков и энергетическими барьерами. При этом наблюдается особенность: с увеличением показателя степени  $n$  происходит снижение средней энергии носителей, что объясняется увеличением расстояния между центрами локализации [17, 18].

Энергетические соотношения при различных  $n$  экспериментально подтверждены в работах [14, 18], где максимальная энергия носителей наблюдается при  $n = 1$ , а при увеличении степени – фиксируется уменьшение энергии заряда. Эти данные согласуются с теоретическими моделями термоактивированного туннелирования в неупорядоченных структурах [9, 12].

### Заключение

Исследование показало, что ВАХ и АШХ низкочастотного шума отражают взаимосвязанные, но различающиеся по физической природе процессы. ВАХ фиксирует усреднённый отклик системы, интегрирующий вклад всех возможных каналов переноса, включая дальнедействующие прыжки с большим пространственным масштабом  $n = 7$ . При этом шумовые характеристики более избирательно реагируют на локальные и энергетически выгодные переходы, чувствительно отображая изменения в спектре локализованных состояний и механизмах проводимости. Установлено, что при низких частотах до 10 Гц реализуется механизм ближайших прыжков с  $n = 1$ , отражающий перенос с максимальной энергией носителей, тогда как при расширении диапазона до 1 кГц и 10 кГц наблюдается переход к классическим двумерным и трёхмерным режимам прыжковой проводимости  $n = 3 - 4$  с уменьшением средней энергии заряда и увеличением длины прыжка носителей заряда.

Как известно, максимальные энергии активации соответствуют глубоким ловушкам, и, опираясь на результаты проведённых исследований [21-23], можно утверждать, что именно изменение или образование таких глубоких локализованных состояний приводит к необратимым сдвигам параметров и деградации устройства. Поэтому наблюдаемый максимум энергии активации в низкочастотном диапазоне при анализе шума в координатах Мотта при  $n=1$  имеет ключевое значение. В этом режиме перенос носителей описывается термоактивированным механизмом ближайших прыжков, что делает применимым уравнение Аррениуса для оценки соответствующей энергии. Таким образом, измерения низкочастотного шума именно в диапазоне 0,5 – 10 Гц позволяют выделить энергетически наиболее значимые ло-

вухи и через активационную энергию, определять параметры деградации. Применение уравнения Аррениуса к полученным данным даёт возможность количественно прогнозировать изменение характеристик и остаточный ресурс резистивных устройств на основе измерения низкочастотного шума.

Полученные результаты подтверждают высокую чувствительность шумовых характеристик к микроскопическим особенностям структуры и позволяют уточнить механизм и особенности электропроводности исследуемого материала. Такой подход может быть использован для ранней диагностики деградации и оценки остаточного ресурса резистивных элементов, и в будущих работах будет рассмотрена такая реализация.

*Данная работа выполнялась в рамках Программы развития ТУСУР на 2025-2036 годы Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030».*

#### Библиографический список

1. Орёшкин А.И., Манцевич В.Н., Маслова Н.С. Влияние различных примесных атомов на характеристики шумов туннельного тока  $1/f^n$  на поверхности InAs (110) // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 85, № 1. С. 40-45.
2. Манцевич В.Н., Маслова Н.С. Влияние зарядки локализованных состояний на спектр шумов туннельного тока  $1/f^n$  // Физика твёрдого тела. 2008. Т. 147. № 7-8. С. 278-283.
3. Rocak D., Belavic D., Hrovat M., Sikula J., Koktavy P., Pavelka J., Sedlakova V. Low-frequency noise of thick-film resistors as quality and reliability indicator // Microelectron. Reliab. 2001. Vol. 41. No. 4. P. 531-542.
4. Сокуренок В.А., Сахаров Ю.В., Троян П.Е. Исследование применимости моделей электропроводности к анализу низкочастотного шума // Журнал радиоэлектроники. 2025. № 10. С. 1-10.
5. Коган Ш.М. Низкочастотный токовый шум со спектром типа  $1/f$  в твердых телах // Успехи физических наук. 1985. Т. 145. № 2. С. 285-328.
6. Dutta P., Horn P.M. Low-frequency fluctuations in solids:  $1/f$  noise // Reviews of Modern physics. 1981. Т. 53. № 3. С. 497.
7. Gherghetta T., Paul A., Shkerin A. Holographic phase transitions via thermally-assisted tunneling // arXiv preprint arXiv:2504.12437. 2025.
8. Koswatta S.O., Lundstrom M.S., Nikonov D.E. Band-to-band tunneling in a carbon nanotube MOSFET is dominated by phonon-assisted tunneling // Nano Lett. 2007. Vol. 7. No. 5. P. 1160-1164.
9. Мотт Н.Ф., Дэвис Э.А. Электронные процессы в некристаллических материалах. – Оксфорд: Clarendon Press, 1979. 590 с.
10. Ihnatsenka S. Activated hopping transport in anisotropic systems at low temperatures // Phys. Rev. B. 2016. Vol. 94, No. 19. P. 195202.
11. Brenig W., Döhler G. H., Wölfle P. Thermally assisted hopping transport in disordered systems // Z. Phys. A. 1973. Vol. 258, No. 5. P. 381-400.
12. Park J., Lee S., Lee H. Abnormal hopping conduction in semiconducting polycrystalline graphene // Phys. Rev. B. 2013. Vol. 88, No. 3. P. 035419.
13. Сандомирский В.Б. Физика тонких плёнок. Современное состояние исследований и технические применения. М.: Москва, 1978. 360 с.
14. Rudra M., Chatterjee S., Mondal A. Existence of nearest-neighbor and variable range hopping in  $\text{Pr}_2\text{ZnMnO}_6$  oxygen-intercalated pseudocapacitor electrode // Mater. Chem. Phys. 2021. Vol. 258. P. 123907.
15. Yu D., Wang C., Wehrenberg B. L., Guyot-Sionnest P. Variable range hopping conduction in semiconductor nanocrystal solids // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 92, No. 21. P. 216802.
16. Giraud R., Pradel A., Ribes M. Hopping conduction mechanisms in disordered thin films // Eur. Phys. J. B. 2005. Vol. 45. P. 63-70.
17. Grimaldi C., Cappelluti E. Variable-range hopping and Coulomb gap in quasi-one-dimensional conductors // Phys. Rev. B. 2002. Vol. 65. P. 134508.
18. Pollak M., Geballe T.H. Low-frequency conductivity due to hopping processes // Phys. Rev. 1961. Vol. 122, No. 6. P. 1742-1753.
19. Yildiz A., Serin N., Serin T., Kasap M. Crossover from nearest-neighbor hopping conduction to Efros-Shklovskii variable-range hopping conduction in hydrogenated amorphous silicon films // Jpn. J. Appl. Phys. 2009. Vol. 48. P. 111203.

20. **Apetrei C.** Carbon paste electrodes made from different carbonaceous materials: application in the study of antioxidants // *Sensors*. 2011. Vol. 11. No 2. Pp. 1328-1344.

21. **Lee J. K., Pyo J., Kim S.** Low-Frequency Noise-Based Mechanism Analysis of Endurance Degradation in Al/ $\alpha$ TiOx/Al Resistive Random Access Memory Devices // *Materials*. 2023. Vol. 16. No. 6. Pp. 2317.

22. **Yu T.** Deep-trap dominated degradation of the endurance characteristics in OFET memory with polymer charge-trapping layer // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. No 1. P. 5865.

23. **Amir W.** Impact of Charge-Trapping Effects on Reliability Instability in AlxGa1-xN/GaN High-Electron-Mobility Transistors with Various Al Compositions // *Materials*. 2023. Vol. 16. No. 12. Pp. 4469.

UDC 53.097

## STUDY OF CHARGE TRANSFER WITH MOTT MODEL USING LOW-FREQUENCY NOISE DATA

**V. A. Sokurenko**, post-graduate student, J.R., TUSUR, Tomsk, Russia;  
orcid.org/0009-0007-3378-0380, e-mail: sokurenko.sl.08@mail.ru

**Yu. V. Sakharov**, Dr. in technical sciences, Professor, head of the Department of FE, TUSUR, Tomsk, Russia;  
orcid.org/0000-0002-7044-6900, e-mail: iurii.v.sakharov@tusur.ru

**P. E. Troyan**, Dr. in technical sciences, Professor, the Department of FE, TUSUR, Tomsk, Russia;  
orcid.org/0000-0002-7349-0536, e-mail: tpe@tusur.ru

*In this work, the electrical conductivity of a carbon resistive film was investigated by means of a combined analysis of current-voltage characteristics and low-frequency 1/f noise characteristics in Mott coordinates within temperature range from  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $+110\text{ }^{\circ}\text{C}$ , at fixed voltage of 3 V, and in frequency bands  $\Delta f$ : 0.5 Hz – 10 Hz; 0.5 Hz – 1 kHz; 0.5 Hz – 10 kHz. **The aim of the study is to refine a conductivity model and to assess the potential of noise analysis as a tool for diagnostics and reliability prediction of resistive elements. The author have shown that noise measurement frequency range significantly affects the identified charge transport mechanism: from nearest neighbor hopping at low frequencies ( $n = 1$ ) to classical two-dimensional and three-dimensional variable-range hopping regimes at higher frequencies ( $n = 3 - 4$ ). The obtained results make it possible to refine the electrical conductivity model of the material studied and confirm high informativeness of noise analysis for the diagnostics of structural features. The analysis results can be applied to the prediction of resistive elements reliability.***

**Key words:** low-frequency noise, current-voltage characteristics, Mott transitions, activation energy, electrical conductivity, diagnostics.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2026-95-270-278

### References

1. **Orjoshkin A.I., Mantsevich V.N., Maslova N.S.** Vliyanie razlichnyh primesnyh atomov na harakteristiki shumov tunnel'nogo toka  $1/f_a$  na poverhnosti InAs (110). *Pis'ma v ZhETF*. 2007, vol. 85, no. 1, pp. 40-45 (in Russian).

2. **Mantsevich V.N., Maslova N.S.** Vliyanie zarjadki lokalizovannyh sostojanij na spektr shumov tunnel'nogo toka  $1/f_a$ . *Fizika tverdogo tela*. 2008, vol. 147, no. 7-8, pp. 278-283 (in Russian).

3. **Rocak D., Belavic D., Hrovat M., Sikula J., Koktavy P., Pavelka J., Sedlakova V.** Low-frequency noise of thick-film resistors as quality and reliability indicator. *Microelectron. Reliab.* 2001, vol. 41, no. 4, pp. 531-542.

4. **Sokurenko V.A., Sakharov Yu.V., Troyan P.E.** Investigation of the applicability of conductivity models to low-frequency noise analysis. *Journal of Radio Electronics*. 2025, no. 10, pp. 1-10.

5. **Kogan Sh. M.** Low-frequency current noise with a  $1/f$  spectrum in solids. *Soviet Physics Uspekhi*. 1985. Vol. 145, no. 2, pp. 285-328.

6. **Dutta P., Horn P. M.** Low-frequency fluctuations in solids:  $1/f$  noise. *Reviews of Modern Physics*. 1981, vol. 53, no. 3, p. 497.

7. **Gherghetta T., Paul A., Shkerin A.** Holographic phase transitions via thermally-assisted tunneling. *arXiv preprint arXiv:2504.12437*, 2025.

8. **Koswatta S.O., Lundstrom M.S., Nikonov D.E.** Band-to-band tunneling in a carbon nanotube MOSFET is dominated by phonon-assisted tunneling. *Nano Lett.* 2007, vol. 7, no. 5, pp. 1160-1164.
9. **Mott N.F., Davis E.A.** *Jelektronnyye processy v nekrystallicheskih materialah*. Oxford, Clarendon Press. 1979, 590 p. (in Russian).
10. **Ihnatsenka S.** Activated hopping transport in anisotropic systems at low temperatures. *Phys. Rev. B.* 2016, vol. 94, no. 19, p. 195202.
11. **Brenig W., Döhler G. H., Wölfle P.** Thermally assisted hopping transport in disordered systems. *Z. Phys. A.* 1973, vol. 258, no. 5, pp. 381-400.
12. **Park J., Lee S., Lee H.** Abnormal hopping conduction in semiconducting polycrystalline graphene. *Phys. Rev. B.* 2013, vol. 88, no. 3, p. 035419.
13. **Sandomirskij V.B.** *Fizika tonkih pljonok. Sovremennoe sostojanie issledovanij i tehnicheckie primenenija*. Moscow, 1978, 360 p. (in Russian).
14. **Rudra M., Chatterjee S., Mondal A.** Existence of nearest-neighbor and variable range hopping in Pr<sub>2</sub>ZnMnO<sub>6</sub> oxygen-intercalated pseudocapacitor electrode. *Mater. Chem. Phys.* 2021, vol. 258, p. 123907.
15. **Yu D., Wang C., Wehrenberg B. L., Guyot-Sionnest P.** Variable range hopping conduction in semiconductor nanocrystal solids. *Phys. Rev. Lett.* 2004, vol. 92, no. 21, p. 216802.
16. **Giraud R., Pradel A., Ribes M.** Hopping conduction mechanisms in disordered thin films. *Eur. Phys. J. B.* 2005, vol. 45, pp. 63-70.
17. **Grimaldi C., Cappelluti E.** Variable-range hopping and Coulomb gap in quasi-one-dimensional conductors. *Phys. Rev. B.* 2002, vol. 65, p. 134508.
18. **Pollak M., Geballe T. H.** Low-frequency conductivity due to hopping processes. *Phys. Rev.* 1961, vol. 122, no. 6, pp. 1742-1753.
19. **Yildiz A., Serin N., Serin T., Kasap M.** Crossover from nearest-neighbor hopping conduction to Efros – Shklovskii variable-range hopping conduction in hydrogenated amorphous silicon films. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2009, vol. 48, p. 111203.
20. **Apetrei C.** Carbon paste electrodes made from different carbonaceous materials: application in the study of antioxidants. *Sensors.* 2011, vol. 11, no. 2, pp. 1328-1344.
21. **Lee J. K., Pyo J., Kim S.** Low-Frequency Noise-Based Mechanism Analysis of Endurance Degradation in Al/αTiOx/Al Resistive Random Access Memory Devices. *Materials.* 2023, vol. 16, no. 6, pp. 2317.
22. **Yu T.** Deep-trap dominated degradation of the endurance characteristics in OFET memory with polymer charge-trapping layer. *Scientific Reports.* 2023, vol. 13, no. 1, pp. 5865.
23. **Amir W.** Impact of Charge-Trapping Effects on Reliability Instability in Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN High-Electron-Mobility Transistors with Various Al Compositions. *Materials.* 2023, vol. 16, no. 12, pp. 4469.