

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.10.2>

УДК: 53.097

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ К АНАЛИЗУ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА

В.А. Сокурено, Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, Россия, г. Томск, просп. Ленина, д. 40

Статья поступила в редакцию 1 сентября 2025 г.

Аннотация. Низкочастотный шум является фундаментальным явлением для электронных компонентов и может использоваться как высокочувствительный диагностический параметр при прогнозировании деградации устройств. Толсто пленочные резисторы на основе углерода обладают выраженными шумовыми характеристиками, что делает их перспективными объектами для изучения механизмов электропроводности. Целью работы является сопоставление вольт-амперных характеристик (ВАХ) и ВАХ низкочастотного шума для идентификации механизмов переноса заряда. Исследованы углеродсодержащие толсто пленочные резисторы с полимерным наполнителем. Проведено сопоставление ВАХ и ВАХ низкочастотного тока шума в диапазоне частот 0,5-10 Гц при температурах 25, 45 и 65 °С. Экспериментальные данные анализировались в координатах, соответствующих механизмам Шоттки, Пула-Френкеля и туннельным моделям (прямое и термически облегченное туннелирование, эмиссия с ловушек, Фаулер-Нордгейма). Для механизмов Шоттки и Пула-Френкеля зафиксирована высокая корреляция между ВАХ и ВАХ шума с достоверностью аппроксимации $R^2 > 0,98$. В случае туннельных

моделей наблюдались отклонения от линейности в низковольтной области, при напряжениях выше 2 В, зависимости выпрямлялись, что подтверждает доминирование процессов туннелирования. Показано, что анализ шумовых характеристик может служить надежным инструментом верификации механизмов электропроводности и применяться для диагностики структурных и энергетических параметров композитных резистивных материалов.

Ключевые слова: низкочастотный шум, ВАХ, механизм Шоттки, механизм Пула-Френкеля, туннелирование, барьер, верификация.

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

Автор для переписки: Сокуренок Вячеслав Артурович, sokurenko.sl.08@mail.ru

Введение

Явление низкочастотного шума (фликкер-шума) свойственно всем электронным компонентам и может быть использовано для прогнозирования необратимых изменений в электронных компонентах. Низкочастотный шум и связанные с ним флуктуации напряжения (тока) связаны с взаимодействием носителей заряда с внутренней структурой электронного компонента. Данный метод диагностики обладает высокой чувствительностью и может быть использован для предиктивной оценки состояния электронных устройств, превосходя традиционные методы испытаний [1]. Наибольшими шумами обладают керметные пленки, являющиеся составной частью толсто пленочного резистора, которые и могут быть использованы в качестве чувствительного элемента, системы предиктивного контроля состояния электронных компонент.

Генерация фликкер-шума напрямую связана с флуктуациями носителей заряда при их взаимодействии с микроструктурой пленки [2]. Учитывая, что флуктуации являются микрофизическим параметром, то комплексное изучение шумовых характеристик наряду с ВАХ должно детализировать механизм электропроводности и разработать комплексную модель, описывающую

поведение системы в различных температурно-полевых режимах. Это особенно важно при исследовании сложных структур, где конкуренция механизмов может приводить к переходным режимам и нелинейным эффектам в проводимости [3-5].

Целью исследования является комплексное определение механизма электропроводности в керметной пленке и его сопоставление с шумовыми характеристиками. Для достижения поставленной цели проведен комплексный анализ, включающий исследование ВАХ и ВАХ низкочастотного тока шума в полосе частот 0,5-10 Гц и их сопоставления с теоретическими моделями полевой эмиссии по механизму Шоттки, Пула-Френкеля и моделями на основе эффекта туннелирования при различных температурах окружающей среды 25 °С, 45 °С и 65 °С. Исследование направлено на проверку применимости существующих теоретических моделей механизмов электропроводности, используемых для интерпретации ВАХ, к описанию характеристик низкочастотного шумового тока с помощью ВАХ шума.

1. Материалы и методы

Для исследования были изготовлены толсто пленочные 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 устройство, представленное на рис. 1. В качестве источника внешнего питания использовались Мh-Ni батареи. Измерение низкочастотных шумов резистивных компонентов осуществлялось с помощью трехкаскадного блока малошумящего усилителя. Выход последнего каскада соединен с блоком фильтров ФНЧ для измерения шума в полосе частот возможностью измерения шума в полосе частот 0,5-10 Гц. Выход блока фильтров соединен с осциллографом. Экранированные блоки

источника питания, исследуемого образца, усилителя и осциллографа соединены с помощью экранированного высокочастотного кабеля.

Анализ шумовых характеристик в диапазоне частот 0,5-10 Гц необходим для достоверного выявления механизмов переноса заряда в толсто пленочных керметных резистора. В данной области преобладает 1/f-шум, связанный с максимальными флуктуациями носителей заряда со структурой пленки.

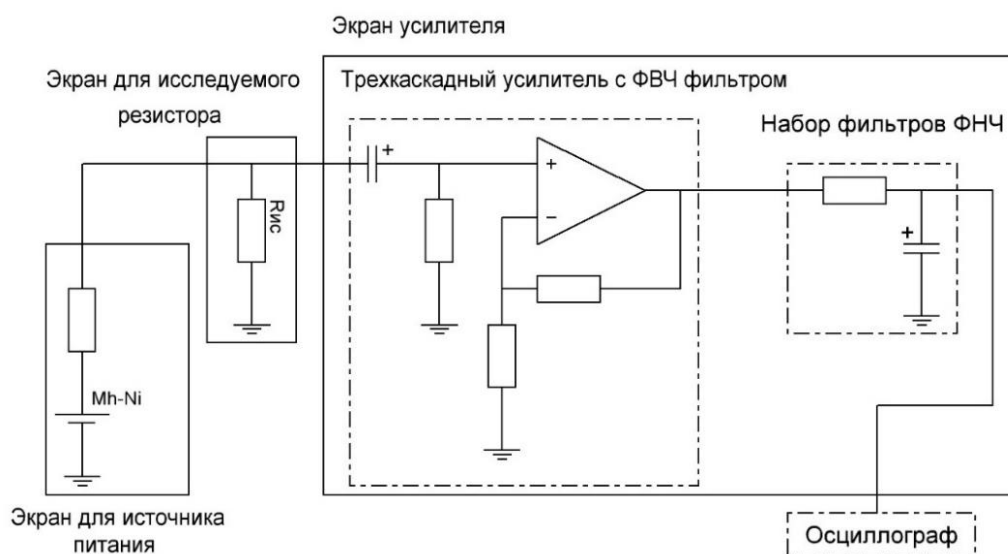


Рис. 1. Блок схема для измерения низкочастотного шума.

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 0,5-10 кГц и падении напряжения на образце в диапазоне от 0,41 до 4,87 В; R – сопротивление исследуемого образца при падении напряжения на образце в диапазоне от 0,41 до 4,87 В.

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, что позволило устранить термическое воздействие на батареи, резистор для ограничения тока. Контроль температуры осуществлялся с помощью термопары типа К, расположенной вблизи исследуемого образца и помещенной в металлический короб с исследуемым резистором. Погрешность используемой термопары составила не более 1,3 %, что для данного исследования являлось допустимым.

2. Результаты

На рис. 2 и рис. 3 представлены ВАХ в координатах, соответствующие термоэлектронным механизмам Шоттки [6] и Пула-Френкеля [6,7].

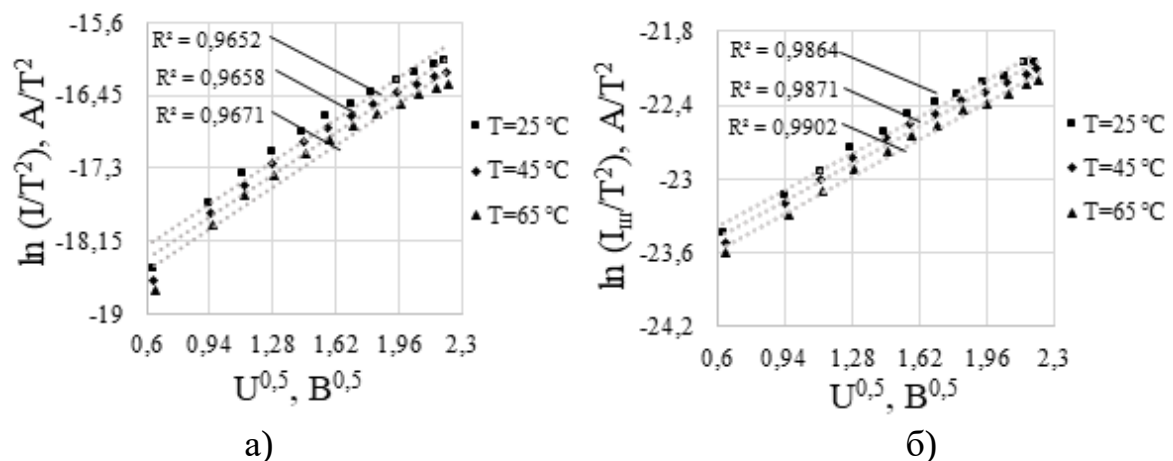


Рис. 2. ВАХ (а) и ВАХ шума (б) в координатах Шоттки.

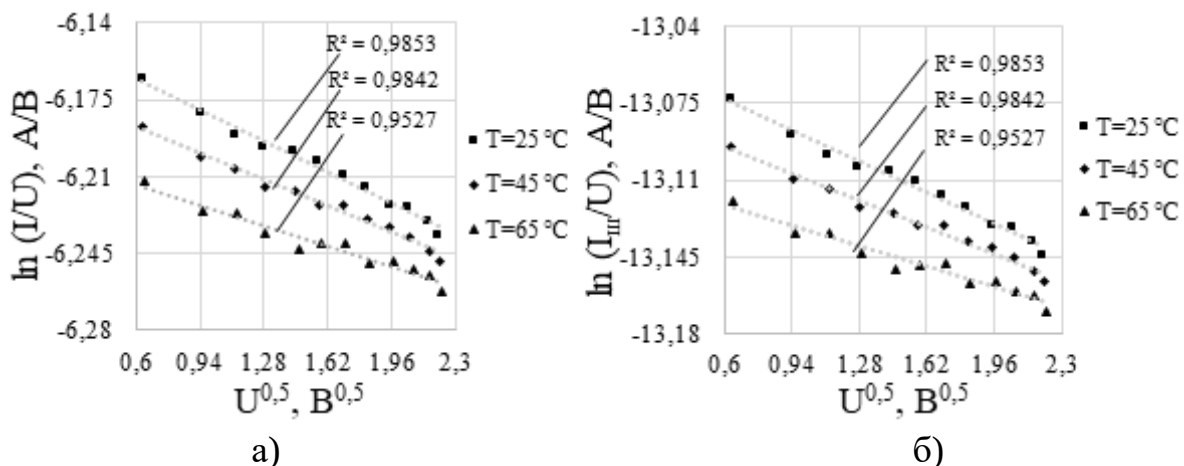


Рис. 3. ВАХ (а) и ВАХ шума (б) в координатах Пула-Френкеля.

Анализируя представленные зависимости, можно отметить высокую корреляцию между ВАХ и ВАХ шума, построенными в координатах Шоттки и Пула-Френкеля, что указывает на идентичность процессов токопереноса и возникающего при этом шума. Также стоит отметить увеличение достоверности линейной аппроксимации при увеличении температуры с 25 до 65 °С на зависимостях, изображенных на рис. 2, чего не наблюдается на аналогичных зависимостях, изображенных на рис. 3.

Были исследованы туннельные механизмы полевой эмиссии с ловушек, прямого туннелирования и механизма Фаулера-Нордгейма [8-10]. Данные механизмы в случае их наличия аппроксимируются одинаковой зависимостью $\ln(I / U^2)$ от $1 / U$, поэтому представляется общая зависимость для рассматриваемых механизмов на рис. 4.

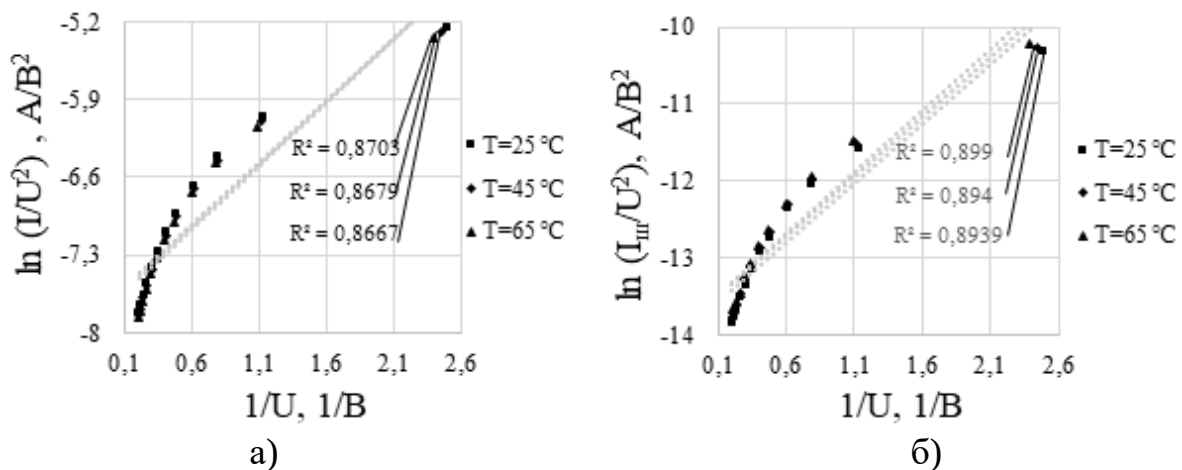


Рис. 4. ВАХ (а) и ВАХ шума (б) для полевой эмиссии с ловушек, прямого туннелирования и механизма Фаулера-Нордгейма.

Анализируя полученные зависимости, можно отметить отсутствие линейной зависимости, что указывает на невозможность протекания данных механизмов. Однако следует отметить корреляцию между ВАХ и ВАХ шума для представленных механизмов. Схожий результат, отсутствия линейной аппроксимации, был получен и при анализе другого предполагаемого механизма электропроводности в координатах $\ln(I / U)$ от U^2 , соответствующего модели термически облегченного туннелирования [11] (рис. 5). Отсутствие линейности свидетельствует о несоответствии данного механизма реальному процессу

переноса заряда. При этом для данного случая характерной особенностью является больший уход от линейной зависимости для ВАХ шума в отличие от ВАХ.

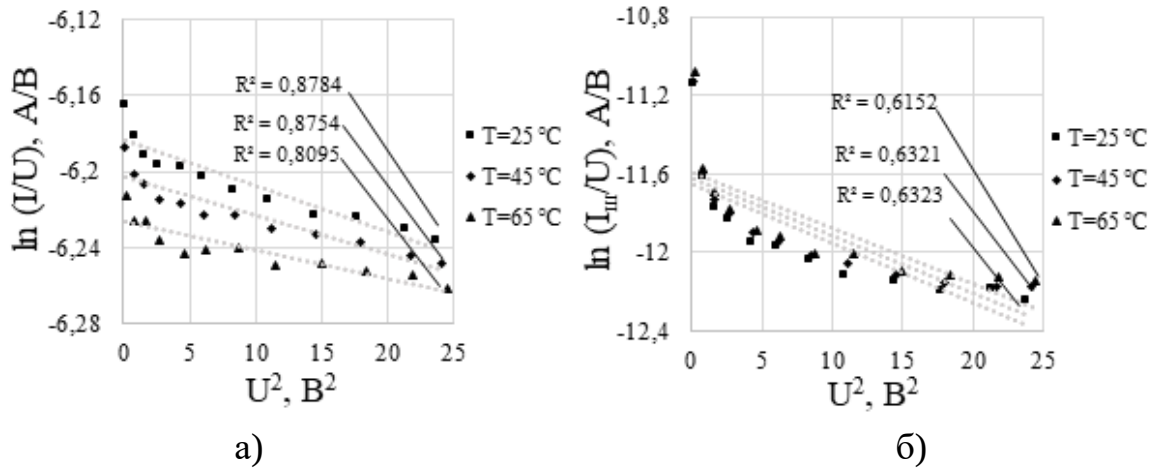


Рис. 5. ВАХ (а) и ВАХ шума (б) в координатах термически облегченного туннелирования.

Для туннельных механизмов отсутствие линейной зависимости может объясняться конкуренцией между температурными коэффициентами туннельного барьера (полимерного наполнителя) и углеродных зерен в резистивной пленке [12]. В области низких напряжений электрический ток через барьерную структуру определяется его высотой и вклад в изменение тока минимален. При увеличении напряжения электрическое поле начинает заметно изменять параметры барьера, увеличивая вероятность прохождения носителей и усиливая вклад туннельного механизма в общий ток. Это приводит к выпрямлению зависимости в соответствующих координатах. Представленные зависимости на рис. 4 и рис. 5 спрямляются при напряжении от 2 В и достоверность линейной аппроксимации $R^2 > 0,90$.

Заключение

Проведенное исследование показало, что сопоставление ВАХ и ВАХ низкочастотного шума является не только эффективным физическим инструментом для верификации механизмов электропроводности в толсто пленочных керметных резисторах, но и представляет практическую ценность с точки зрения

оценки их надежности. Высокая степень совпадения зависимостей для механизмов Шоттки и Пула-Френкеля подтверждает, что шумовые измерения могут служить альтернативой или дополнением к традиционному анализу ВАХ, позволяя выявлять рабочий механизм без проведения полного цикла температурно-зависимых измерений.

Для туннельных механизмов, включая термически облегченное туннелирование, обнаруженное отклонение от линейности в низковольтной области указывает на наличие структурных и барьерных неоднородностей, которые способны локально изменять условия переноса. Эти же участки являются источниками флуктуаций тока, что делает шумовые характеристики особенно чувствительными к ранним проявлениям деградации. Таким образом, метод сопоставления ВАХ и ВАХ шума может быть использован для прогнозирования ресурса и диагностики скрытых дефектов на стадии, когда средний ток еще не демонстрирует признаков нестабильности.

Полученные результаты подтверждают, что интеграция анализа шумовых характеристик в стандартные процедуры контроля качества резистивных элементов позволит повысить точность прогнозирования отказов, оптимизировать режимы работы и повысить долговечность изделий.

В дальнейшем предполагается провести расширенный анализ в координатах Мотта для исследования возможного вклада переменного-диапазонного прыжкового механизма в формирование проводимости и шумовых характеристик в широком температурном диапазоне от $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это позволит установить взаимосвязь между спектром локализованных состояний, механизмами переноса заряда и генерацией $1/f$ -шума, а также уточнить модель электропроводности в керметных пленках при различных температурно-полевых режимах.

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

Литература

1. Vandamme L. K. J. Noise as a diagnostic tool for quality and reliability of electronic devices //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2002. – Т. 41. – №. 11. – С. 2176-2187.
2. Букингем М. Шумы в электронных приборах и системах. – 1986.
3. Snow E. S. et al. $1/f$ noise in single-walled carbon nanotube devices //Applied Physics Letters. – 2004. – Т. 85. – №. 18. – С. 4172-4174.
4. Gupta A. K., Sen A. K. Nonlinear dc response in composites: A percolative study //Physical Review B. – 1998. – Т. 57. – №. 6. – С. 3375.
5. Toker D. et al. Tunneling and percolation in metal-insulator composite materials //Physical review B. – 2003. – Т. 68. – №. 4. – С. 041403.
6. Ситников А. В., Калинин Ю. Е., Жилова О. В. Новые направления физики конденсированного состояния: учебное пособие [Электронный ресурс]. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2021. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45763264> (дата обращения: 28.08.2025).
7. Furlan J. et al. Thermally assisted tunneling and the Poole–Frenkel effect in homogenous a-Si //Journal of applied physics. – 2003. – Т. 94. – №. 12. – С. 7604-7610.
8. Котова М. С. Резистивные переключения в органических структурах на основе модифицированной полимерной матрицы: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Специальность 01.04.10 – физика полупроводников. Томск, 2019.
9. Плотников В. В. Исследование механизмов проводимости в тонких пленках твердых растворов титаната бария-стронция: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния. СПб., 2016.
10. Nasyrov K. A., Gritsenko V. A. Transport mechanisms of electrons and holes in dielectric films //Physics-USpekhi. – 2013. – Т. 56. – №. 10. – С. 999.
11. Mulder B. J. Recombination diffusion length of minority charge carriers in cuprous sulphide (chalcosite and djurleite) //physica status solidi (a). – 1972. – Т. 13. – №. 2. – С. 569-575.

12. Prudenziati M. et al. Tunnelling in thick-film (cermet) resistors and the minimum of resistance //Il Nuovo Cimento D. – 1983. – Т. 2. – №. 3. – С. 697-710.

Для цитирования:

Сокуренок В.А., Сахаров Ю.В., Троян П.Е. Исследование применимости моделей электропроводности к анализу низкочастотного шума. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.10.2>