

УДК 53.097
EDN: HDTVZH

PACS: 07.50.Hp



Исследование низкочастотного шума углеродных резисторов после электроимпульсной обработки

В. А. Сокурено, Ю. В. Сахаров, С. А. Артищев

Приводятся результаты исследования дрейфа низкочастотного шума углеродных резисторов в диапазоне частот 5×10^4 –1 кГц после 108 часов электроимпульсной обработки при напряжении 35 В и длительности импульса 10 мкс. На основе анализа полученных спектров зафиксирован рост низкочастотного шума на 5 и 12 % при полосе пропускания 500 и 5 Гц, при этом дрейф сопротивления образцов составил менее 1 %. С технологической и научной точки зрения получен важный результат, который в будущем может использоваться для оценки надежности при исследовании структур твердотельных электронных приборов.

Ключевые слова: низкочастотный шум, дрейф сопротивления, углеродный резистор, надежность.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-3-20-25

Введение

Явление шума известно с 1925 года по работе Шоттки [1] и на сегодняшний день активно исследуется. Известны три основных механизма шума. Это тепловой шум, дробовой шум и низкочастотный шум (известный также как мерцающий шум или $1/f$ шум). Исследование шумов можно найти в работах по метрологии [2], медицине [3], радиолокации [4] и в целом в электронике, работающей на разных физических принципах. Особый интерес вызывает низкочастотный шум.

Согласно обзорным работам в области физической электроники, наибольшую исследовательскую ценность и инженерную значимость имеет низкочастотный шум. В единичных и обзорных работах отмечается, что основным фактором возникновения шума вида $1/f$ являются дефекты структуры [5–7]. В работах [8, 9] отмечается, что данное явление можно применить в качестве низкочастотной шумовой спектроскопии для быстрого и неразрушающего метода контроля, который имеет большую чувствительность по сравнению с современными электрическими и оптическими методами.

Однако, есть ряд проблем, препятствующих широкому применению данного метода, учитывая его универсальность и экономическую выгоду. Несмотря на большое количество работ в области теоретической и экспериментальной физики, явление низкочастотного шума остается не решенной проблемой. Теории и некоторые исследования по своему содержанию являются неполными и ограничены технологией или процессом изготовления электронного компонента. При этом оценка надежности электронного компонента по анализу низкочастотного шума проводится

Сокурено Вячеслав Артурович, аспирант.

E-mail: sokurenko.sl.08@mail.ru

Сахаров Юрий Владимирович, в.н.с., д.т.н., профессор, доцент.

Артищев Сергей Александрович, с.н.с., к.т.н., доцент, зав. лаб.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 40.

Статья поступила в редакцию 20.01.2024

После доработки 26.03.2024

Принята к публикации 28.03.2024

Шифр научной специальности: 1.3.5

© Сокурено В. А., Сахаров Ю. В., Артищев С. А., 2024

на основе статистики, где компонент с завышенным уровнем шума выходит из строя при электротермоиспытаниях [10].

Нет работ, посвященных всестороннему исследованию и практическому внедрению результатов разработки на основе электрофизических или технологических процессов, так как отсутствует универсальная теория и модель, применимая ко всем системам или отдельной группе материалов, учитывая фундаментальность данного явления. Процессы проявления низкочастотного шума в простых и сложных, упорядоченных и аморфных системах различны и имеют различные механизмы проявления. Это приводит к трудности идентификации низкочастотного шума в исследуемых объектах [11].

Поэтому необходимо проведение комплексных научно-исследовательских работ по получению новых знаний в области низкочастотной шумовой спектроскопии. И уже на основе данных работ получить систему для прогнозирования ресурса работы компонента. Для достижения поставленной задачи необходимо исследовать влияние электрофизических и технологических параметров резистивных компонентов на величину шума. Целью данной работы является проведение предварительного исследования явления низкочастотного шума в углеродных резистивных компонентах после электротермического воздействия.

Материалы и методы

Для исследования низкочастотных флуктуации шума и дрейфа сопротивления приме-

нялись углеродные резисторы CF-25 (аналог С1-4) R_{1-5} с сопротивлением 10 кОм. Для упрощения монтажа компонентов на плате и проведения измерения в данной работе использовались коммерческие выводные резисторы.

Чтобы оценить влияние электрофизического воздействия на величину шума, был разработан модуль для обработки резисторов импульсами напряжения прямоугольной формы. Устройство спроектировано на микросхеме формирователя импульсов NE555, драйвера напряжения MC3454 и n -канального MOSFET IRF1464. Принципиальным преимуществом этого устройства является возможность обработки резисторов с частотой до 100 кГц и напряжением 40 В.

Исследуемые в работе образцы R_{1-5} подвергались циклической импульсной обработке. Длительность одного цикла составляла 6 часов при напряжении 35 В и длительности импульса 10 мкс. Для фиксации изменения сопротивления ΔR (дрейф сопротивления) проводилось измерение сопротивления после каждого цикла обработки.

После каждой серии электроимпульсной обработки для образцов измерялся низкочастотный шум в заданной полосе частот. Для этого был разработан модуль измерения шума для резистивных пленок на основе малошумящего операционного усилителя [12]. Схема данного модуля представлена на рисунке 1. Использовалась классическая схема с параллельным включением исследуемого резистора и операционного усилителя через изолирующий резистор.

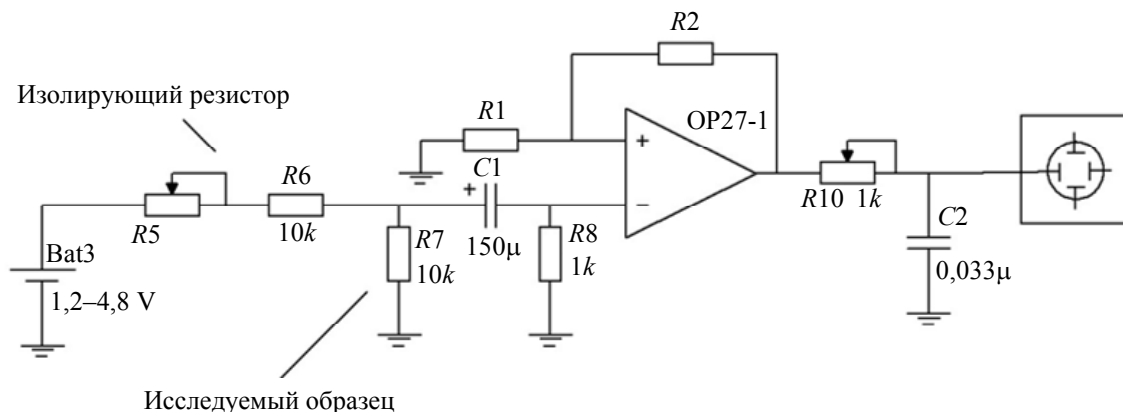


Рис. 1. Модуль измерения шума

Изолирующий резистор предотвращает ослабление шума на клеммах исследуемого компонента и выполнен в виде магазина сопротивлении. Подстройка сопротивления к сопротивлению исследуемого резистора применялась для равномерного распределения входного напряжения с малозумящего источника питания резистивного делителя. Для предотвращения влияния низкочастотного шума на исследуемый компонент магазин сопротивлении был выполнен на основе металлических и металлодиэлектрических резисторов с рассеиваемой мощностью более 0,5 Вт.

В качестве питания использовались батареи Ni-Cd с напряжением 1,3 В. При измерении $1/f$ шума к резистору подключался батарейный блок. Напряжение батарейного блока последовательно увеличивалось добавлением новых источников в схему. Начальное и конечное напряжение блока U составляет 1,3 В и 5,2 В. Вклад шума от батареи минимален, так как сопротивление батарей много меньше сопротивления резистивного делителя.

Флуктуации напряжения с исследуемого резистора поступали на ФВЧ-фильтр для блокировки постоянной составляющей. Фильтр пропускал переменную составляющие флуктуации напряжения выше 0,5 Гц. Фильтр был спроектирован в такой конфигурации, что шум, генерируемый фильтром, не доминирует над шумом исследуемого резистора и шумом операционного усилителя. Для фильтра применялся танталовый конденсатор большой емкости с малым током утечки и металлопленочный резистор, обладающий меньшей величиной напряженности шума по сравнению с углеродным резистором [13].

Переменная составляющая флуктуации с ФВЧ-фильтра усиливалась операционным усилителем с коэффициентом усиления 511. Устройство измерения шума было спроектировано на основе малозумящего прецизионного операционного усилителя OP27, с уровнем собственных шумов $3 \text{ нВ/Гц}^{0,5}$ в полосе рабочих частот. Данный усилитель обладает коэффициентом подавления синфазного сигнала более 120 дБ. Двухполярное питание усилителя осуществлялось от литиевых аккумуляторов $\pm 9 \text{ В}$ через стабилизаторы напряжения. Напряжение с выхода усилителя по-

ступало на ФНЧ-фильтр с частотой среза 1 кГц. Таким образом ФВЧ- и ФНЧ-фильтры образуют полосовой фильтр в диапазоне частот 0,005–1 кГц.

Перед измерением низкочастотных шумов проводилась проверка работоспособности устройства по уровню тепловых шумов перед каждым измерением. В представленной конфигурации исследуемый резистор и изолирующий резистор 10 кОм генерирует тепловой шум на выходе $12,86 \text{ нВ/Гц}^{0,5}$ в заданной полосе частот по результатам моделирования шумов в программе LTSpice без учета коэффициента усиления. Расчет среднеквадратичного напряжения шума проводился по формуле:

$$U_{\text{ш}} = (\sqrt{f})^{-1} (K_V)^{-1} \times \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (U_{\text{ш.экс}})_i^2}$$

где f – полоса частот; K_V – коэффициент усиления; N – число измерений; $U_{\text{ш.экс}}$ – экспериментальное напряжение шума.

Таким образом, предлагаемый метод исследования позволил фиксировать корреляцию дрейфа сопротивления с низкочастотными флуктуациями напряжения резистивных компонентов. В работе это позволило определить эффективность применимых схемотехнических и методологических решения для проведения исследования. Дополнительным преимуществом системы является отсутствие дорогостоящего оборудования для анализа шумовых характеристик.

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 представлен спектр теплового и низкочастотного шума для углеродных резисторов до электроимпульсной обработки с сопротивлением 10 кОм, рассчитанный по формуле (2). Измеренные значения шума показали, идентичность с результатами измерения других авторов [14].

Обработка резисторов R_{1-5} сопротивлением 10 кОм импульсами прямоугольной формы была проведена в соответствии с методикой, описанной выше. За 108 часов обработки сопротивление углеродных резисторов уменьшилось в среднем на 0,5 % в сравнении

с начальным значением. При этом был зафиксирован рост уровня низкочастотного шума после импульсной обработки. При дальнейших наблюдениях уровень низкочастотного шума достиг максимума и стал постоянной величиной до конца электроимпульсной обработки.

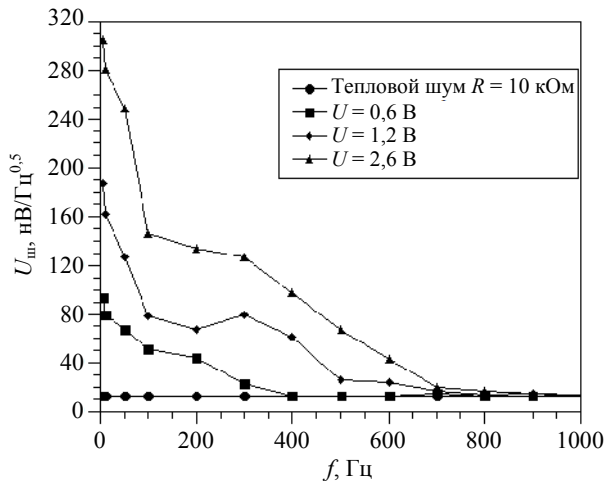


Рис. 2. Спектральная плотность шума углеродного резистора $R = 10 \text{ кОм}$

При исследовании особый интерес вызвало увеличение дрейфа низкочастотного шума при уменьшении полосы пропускания. В инфранизкочастотной области изменение величины шума наблюдалось в первые 24 часа и при увлечении полосы пропускания начало роста шума сдвигалось в область больших временных интервалов. Для удобства анализа полученных данных по дрейфу низкочастотного шума и сопротивления на рисунке 3 представлены усредненные значения шума в полосе частот 5, 500 и 1000 Гц при питающем напряжении 0,65–2,6 В и усредненное значение дрейфа сопротивления.

Согласно рисунку 2 в области полосы пропускания 1 кГц величина низкочастотного шума изменяется менее чем на 1 %. Данный результат носит классический характер, когда внешнее воздействие на материал пленки является слабым и не оказывает влияние на выходные характеристики. Подобный результат мы встречали в следующих источниках [15], когда величина дрейфа шума не превышала порогового значения вплоть до состояния отказа.

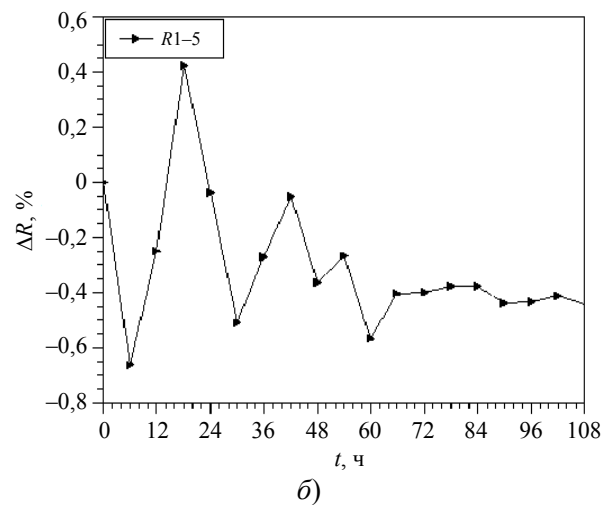
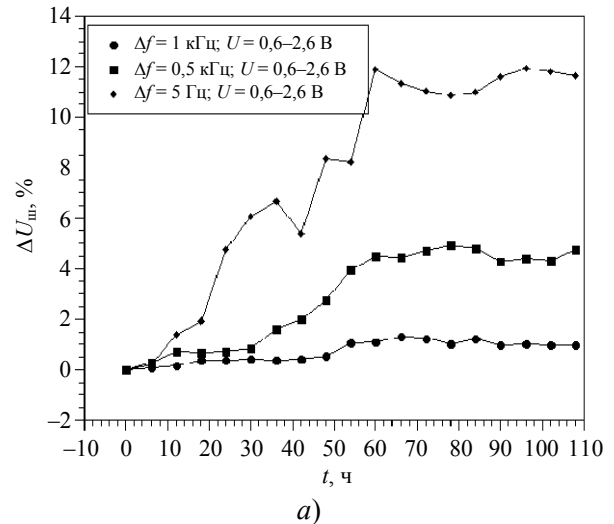


Рис. 3. Дрейф электрофизических параметров углеродных резисторов: а) – дрейф низкочастотного шума; б) – дрейф сопротивления

В данной работе новым результатом является увеличение дрейфа низкочастотного шума в сравнении с первоначальным значением при уменьшении полосы пропускания до 5 Гц. Рост шума составил 12 % в конце электроимпульсной обработки. Рост дрейфа шума в инфранизкочастотной области наблюдается быстрее, чем при других частотах. Данный результат не коррелирует с уменьшением сопротивления резистивного компонента, поэтому влияние теплового шума мы не рассматриваем. Мы предполагаем, что причина роста дрейфа шума связана с флуктуацией носителей заряда на структурных дефектах, которая проявляется в изменении или деградации механизмов электропроводности в полосе частот 5 Гц.

Заклучение

Данная работа обеспечивает основу для проведения исследования по прогнозированию надежности резистивных компонентов. В будущих работах мы планируем подробное изучение механизмов электропроводности на основе низкочастотной шумовой спектроскопии. Это должно позволить быстро и эффективно оценивать надежность работы резистивных пленок определённого состава и номинала. Объектом исследования будут резистивные компоненты на основе углерода, полученные методом аддитивной принтерной печати.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации № FEWM-2022-0005.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ван Дер Зил А. Шум (источники описание, измерение). – М.: Советское радио, 1973.
2. Arpaia P., Vaccigalupi C., Martino M. / IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. – Piza, 2015. P. 1532–1536.

3. Тимаев С. Ф. / Ученые записки Казанского университета. 2012. № 154. С. 161–177.
4. Nieminen T., Lahteenmaki P., Tan Z., Cox D. / Rev. Sci. Instrum. 2016. Vol. 87. № 11. P. 114706.
5. Waltl M. / IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. 2020. Vol. 20. № 2. P. 242–250.
6. Якубович Б. И. / Надежность. 2017. № 17. С. 31–35.
7. Dziedzic A., Klossowicz A., Winiarski P., Stadler A. W., Steplewski W. / Proceedings of the 5th Electronics System-integration Technology Conference (ESTC). – Helsinki, 2014. P. 1–8.
8. Landi G., Pagano S., Neitzert H. C., Mauro C., Barone C. / Energies. 2023. Vol. 16. № 3. P. 1296.
9. Разуменко Д. / Компоненты и Технологии. 2008. № 86. С. 168–174.
10. Горлов М. И. Современные диагностические методы контроля качества и надежности полупроводниковых изделий. – Ульяновск: УлГТУ, 2015.
11. Маковийчук М. И. / ANNALI D'ITALIA. 2020. Vol. 10. № 1. С. 26–39.
12. Walter D., Bulau A., Zimmermann A. / Sensors. 2023. Vol. 23. № 3. P. 1107.
13. Мерки П. / Электроника: наука, технология, бизнес. 2018. № 9. С. 100–106.
14. Miyaoka Y., Kuribayashi M. / Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics. – Aachen, 2019. P. 3120–3125.
15. Koch R. H. / Physical Review. 1993. Vol. 48. № 16. P. 12217–12222.

PACS: 07.50.Hp

The research low-frequency noise after electric pulse machining

V. A. Sokurenko, Y. V. Sakharov and S. A. Artishchev

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40 Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: sokurenko.sl.08@mail.ru

Received 20.01.2024; revised 26.03.2024; accepted 28.03.2024

The results of investigation of low-frequency noise drift of carbon resistors in the frequency range 5×10^{-4} –1 kHz after 108 hours of electrical pulse treatment at voltage 35 V and pulse duration 10 μ s are presented. On the basis of the analysis of the obtained spectra the growth of low-frequency noise by 5 and 12 % at the bandwidth of 500 and 5 Hz was recorded, while the drift of resistance of the samples was less than 1 %. From the technological and scientific point of view, an important result was obtained, which in the future can be used to assess reliability in the study of solid-state electronic device structures.

Keywords: low frequency noise, resistance drift, carbon resistor, reliability.

REFERENCES

1. Van Der Zyl A., Noise (sources description, measurement), Moscow, Soviet radio, 1973.
2. Arpaia P., Baccigalupi C. and Martino M. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. Piza, 2015. pp. 1532–1536.
3. Timashev S. F., Scientific notes of Kazan University, № 154, 167–177 (2012) [in Russian].
4. Nieminen T., Lahtenmaki P., Tan Z. and Cox D., Rev. Sci. Instrum. **87** (11), 114706 (2016).
5. Walzl M., IEEE Transactions on Device and Materials Reliability **20** (2), 242–250 (2020).
6. Yakubovich B. I., Dependability **17** (2), 31–35 (2017) [in Russian].
7. Dziedzic A., Klossowicz A., Winiarski P., Stadler A. W. and Steplewski W. Proceedings of the 5th Electronics System-integration Technology Conference (ESTC). Helsinki, 2014. pp. 1–8.
8. Landi G., Pagano S., Neitzert H. C., Mauro C. and Barone C., Energies **16** (3), 1296 (2023).
9. Razumenko D., Components and Technologies, № 86, 168–174 (2008) [in Russian].
10. Gorlov M. I., Modern diagnostic methods for monitoring the quality and reliability of semiconductor products; Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University, 2015.
11. Makovychuk M. I., ANNALI D'ITALIA **10** (1), 26–39 (2020).
12. Walter D., Bulau A. and Zimmermann A. Sensors **23** (3), 1107 (2023).
13. Merki P., Electronics: science, technology, business, № 9, 100–106 (2018) [in Russian].
14. Miyaoka Y. and Kuribayashi M. Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics. Aachen, 2019. pp. 3120–3125.
15. Koch R. H., Physical Review **48** (16), 12217–12222 (1993).