ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, № 3, с. 127–129

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 621.317.72+621.317.321

МОБИЛЬНЫЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

© 2024 г. А. В. Клюев[a], А. В. Якимов[a], А. В. Беляков[b]

Поступила в редакцию 08.11.2024 г.
После доработки 22.12.2024 г.
Принята к публикации 13.02.2025 г.

DOI: 10.31857/S0032816225030178

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы активно развивается низкочастотный (НЧ) шумовой анализ для неразрушающей диагностики качества структуры полупроводниковых приборов. Однако зачастую на процесс измерений влияют внешние электромагнитные помехи [1]. Разработанный мобильный многофункциональный комплекс предназначен для проведения измерений в экранированных помещениях, а также в полевых условиях.

Мобильный комплекс состоит из экранированного от внешних электромагнитных помех блока (в который помещается исследуемый образец), предварительного усилителя напряжения, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и персонального компьютера (ноутбука). Принципиальная схема комплекса представлена на рис. 1.

Исследуется шумовое напряжение U_d на диоде D при протекании тока I_d. Вариация тока I_d осуществляется с помощью блока добавочных сопротивлений R_b. Для эффективного использования АЦП шумовое напряжение U_d усиливается предварительным малошумящим усилителем напряжения Low Noise Preamplifier 5113 (и в случае необходимости Ultra Low Noise Preamplifier 5184), питающимся от собственных аккумуляторных батарей, интегрированных в его корпус.

Усиленное шумовое напряжение оцифровывается с помощью двух модулей: NI-9239 и NI cDAQ-9172. Непосредственно АЦП располагается в плате аналогового ввода данных NI-9239, которая, в свою очередь, размещается в многофункциональном шасси NI cDAQ-9172, обеспечивающем передачу данных на вход ноутбука. Плата NI cDAQ-9172 обладает интерфейсом USB 2.0. Плата NI-9239 имеет 4 канала, максимальная частота дискретизации составляет

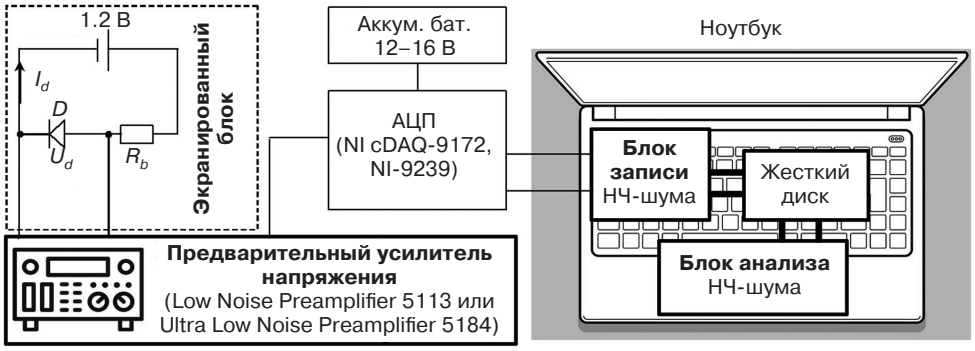

Рис. 1. Принципиальная схема мобильного комплекса.

[a] Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия, Нижний Новгород.
[b] ООО “Гарда Технологии”, Россия, Нижний Новгород.

50 кГц, разрядность АЦП составляет 24 бита, частотный диапазон 0.2 Гц – 50 кГц, диапазон измеряемых напряжений ±10 В.

Вместо указанных модулей производства National Instruments источником оцифрованного шума может являться модуль аналогового ввода-вывода отечественного производителя ADS224 × 48 (“Инструментальные системы”, Москва). Плата аналогового ввода-вывода ADS224 × 48 имеет следующие характеристики: входное сопротивление 600/150 Ом, емкость 40 ± 8 пФ; два дифференциальных канала ввода/вывода; 24битный АЦП, программируемый коэффициент передачи (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64); переключаемая частота взятия отсчетов 6–48 кГц.

Для записи и последующей обработки оцифрованных данных применяется разработанный на языке программирования LabVIEW 8.5 программный комплекс, состоящий из блока записи и блока анализа.

2. БЛОК ЗАПИСИ

Блок записи обеспечивает взаимодействие используемых модулей NI-9239 и NI cDAQ-9172 с жестким диском компьютера и управляет процессом записи шумового сигнала. С помощью данного блока осуществляются выбор тактовой частоты АЦП платы NI-9239 и длительности записываемого шумового сигнала, контроль за первичными статистическими характеристиками сигнала, такими как среднее, дисперсия, мгновенный спектр, и присвоение текстовой легенды анализируемому сигналу. С помощью блока записи также задаются количество используемых каналов платы NI-9239 и их конфигурации (дифференциальный, с общим заземленным проводом, с общим незаземленным проводом); осуществляются выбор способа считывания данных платой (непрерывно, “пачками”) и выбор формата данных для сохранения оцифрованного сигнала.

3. БЛОК АНАЛИЗА

Блок анализа представляет собой программный комплекс ADSViewer, разработанный ранее [2] для обработки данных, записанных с помощью платы ADS224 × 48. Этот блок позволяет анализировать следующие статистические характеристики шума: осциллограмму, гистограмму, спектральную плотность мощности, биспектр, функцию бикогерентности и параметры их формы.

На рис. 2 показаны гистограмма исследуемого шума и эта же гистограмма в гауссовых координатах. Если исследуемый шум $x(t)$ имеет одномерную функцию распределения гауссова

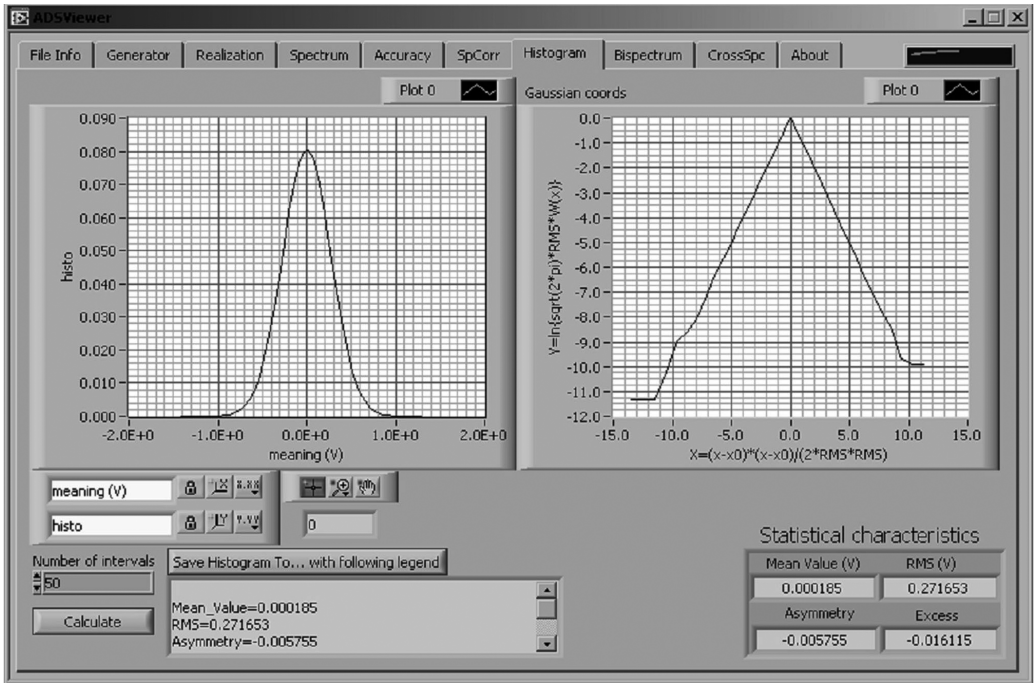

Рис. 2. Панель анализатора ADSViewer, предназначенная для изучения гистограммы и первых четырех кумулянтов шума.

вида W (со средним значением $\langle x \rangle$ и дисперсией σ_x^2), то в так называемых гауссовых координатах

$$X_g = \left(x - \langle x \rangle\right) \cdot \left|x - \langle x \rangle\right| / \left(2\sigma_x^2\right),\ Y_g = \ln\left(W\sqrt{2\pi\sigma_x^2}\right)$$

эта функция имеет вид двух биссектрис в третьем и четвертом квадрантах. Одновременно с построением гистограммы рассчитываются такие статистические характеристики, как среднее, стандартное отклонение от среднего, коэффициенты асимметрии и эксцесса.

4. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Масса мобильного комплекса с учетом ноутбука и аккумуляторных батарей не превышает 20 кг. Конструктивно мобильный комплекс без ноутбука размещается в кейсе с размерами $400 \times 300 \times 150$ мм^3. Питание элементов мобильного комплекса осуществляется от аккумуляторных батарей напряжением 12 В. Период автономной работы мобильного комплекса ограничивается временем функционирования ноутбука в режиме питания от батареи. Частотный диапазон работы от 1 Гц до 25 кГц. Собственный шум мобильного комплекса на частоте 1 кГц не превышает 850 пВ/Гц$^{1/2}$ [3].

Работа мобильного комплекса апробирована для измерений статистических характеристик НЧ-шумов полупроводниковых диодов с *p-n*-переходом [4], диодов с барьером Шоттки [5], диодов Шоттки с δ-легированием [6], используемых для детектирования сигналов [7–10].

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Е.И. Шмелёву за участие в разработке мобильного многофункционального комплекса и участие в проведении экспериментов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы “Приоритет 2030”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Клюев А.В., Якимов А.В.* // Вестник Нижегородского университета. 2007. № 6. С. 5. http://www.vestnik.unn.ru/ru/nomera?anum=1811
2. *Шмелев Е.И., Клюев А.В., Якимов А.В.* // Вестник Нижегородского университета. 2009. № 5. С. 81. http://www.vestnik.unn.ru/ru/nomera?anum=2719
3. *Клюев А.В., Якимов А.В.* // Труды XXVIII научной конференции по радиофизике. НН: ННГУ, 2024. С. 251. https://rf.unn.ru/wp-content/uploads/sites/21/2024/10/rf-conf-2024-radiophysical-measurements.pdf
4. *Клюев А.В., Шмелев Е.И., Якимов А.В.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57. № 12. С. 995. https://radiophysics.unn.ru/sites/default/files/papers/2014_12_995.pdf
5. *Klyuev A.V., Yakimov A.V., Zhukova I.S.* // Fluct. Noise Lett. 2015. V. 14. № 3. P. 1550029. https://doi.org/10.1142/S0219477515500297 .
6. *Klyuev A.V., Shmelev E.I., Yakimov A.V.* // Fluct. Noise Lett. 2014. V. 13. № 1. P. 1450003. https://doi.org/10.1142/S0219477514500035
7. *Клюев А.В.* // Вестник МГУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 2011. № 3. С. 20. http: // vmu.phys.msu.ru/abstract/2011/3/11-3-020/
8. *Клюев А.В.* // Вестник МГУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 2012. №. 3. С. 13. http: // vmu.phys.msu.ru/abstract/2012/3/12-3-13/
9. *Клюев А.В.* // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58. № 2. С. 199. https://doi.org/10.7868/s0033849413010063
10. *Klyuev A.V.* // Int. J. Mod. Phys. B. 2013. V. 27. № 13. P. 1350049. https://doi.org/10.1142/S0217979213500495

Адрес для справок: Россия, 603022, Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. E-mail: klyuev@rf.unn.ru