

Измерительный комплекс спектроскопии низкочастотных шумов полупроводниковых диодных структур

С. А. КОСТРЮКОВ, А. В. ЕРМАЧИХИН, В. Г. ЛИТВИНОВ, Т. А. ХОЛОМИНА,
Н. Б. РЫБИН

Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, Россия,
e-mail: al.erm@mail.ru

Рассмотрен измерительный комплекс спектроскопии низкочастотных шумов полупроводниковых диодных структур для изучения механизмов генерации шума. Приведены конструктивно-методологические особенности автоматизированной установки для измерения и исследования шумов в полупроводниковых структурах.

Ключевые слова: низкочастотные шумы, спектроскопия, полупроводниковая диодная структура, спектральная плотность мощности.

The measuring complex of spectroscopy of low-frequency noises of semiconductor diode structures for study of the mechanisms of noise generation is considered. The methodological and design features of automated installation for measurement and study of noises in semiconductor structures are presented.

Key words: low-frequency noises, spectroscopy, semiconductor diode structure, power spectral density.

В последние десятилетия активно развиваются методы контроля и анализа полупроводниковых приборов и структур, основанные на измерении параметров шумового сигнала. Немалую роль в развитии «шумовых» измерений играет внедрение компьютерной техники и нового математического аппарата. В этой связи актуально создание установки для исследования низкочастотных (НЧ) шумов с возможностью гибкой ее модернизации для конкретного эксперимента и проведения необходимой математической обработки результатов измерения. Особое внимание уделяется скорости получения информации, поскольку желательно проводить все вычисления в режиме реального времени. Это связано с общим положением дел в области исследований НЧ-шумов в материалах и структурах электронной техники. Обычно удается построить адекватную физическую модель, описывающую генерацию НЧ-шума в полупроводниковом приборе конкретного типа. Общей модели, объясняющей генерацию НЧ-шума в таких приборах, не существует. Указанное обстоятельство, возможно, связано с огромным количеством факторов, влияющих на формирование шумовой составляющей электрического сигнала. В случае получения информации в режиме реального времени имеется большая

вероятность, что будут выявлены новые закономерности в поведении НЧ шумового сигнала в зависимости от внешних воздействий на изучаемый образец.

Измерительный комплекс спектроскопии НЧ-шума. Функциональная схема экспериментальной установки для исследования шумовых параметров полупроводниковых микро- и наноструктур [1] приведена на рис. 1. Основу установки составляют три одинаковых канала усиления напряжения. Для

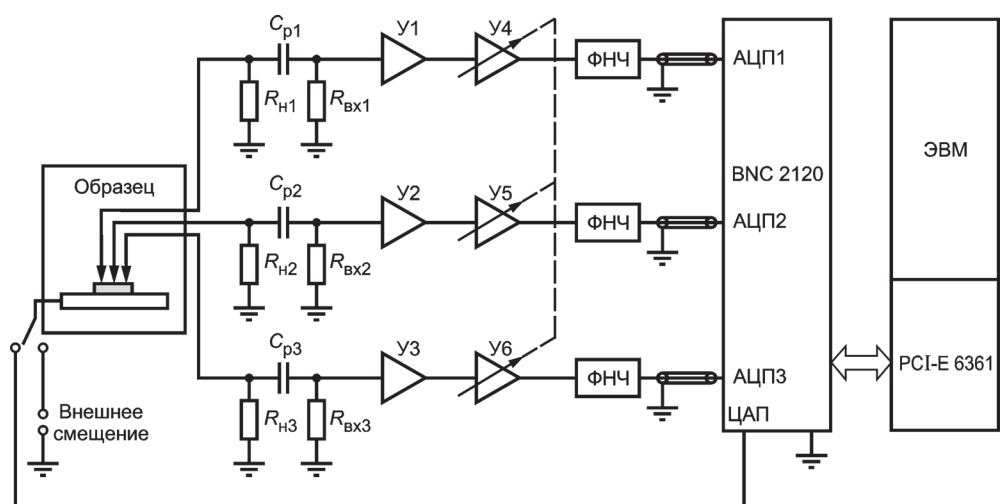


Рис. 1. Функциональная схема установки спектроскопии НЧ-шумов:

У1—У3 — малошумящие усилители; У4—У6 — предварительные усилители; ФНЧ — фильтр низких частот; BNC-2120 — блок коннекторов фирмы «National Instruments»; PCI-E 6361 — плата АЦП/ЦАП той же фирмы; ЭВМ — персональный компьютер с установленным программным обеспечением LabVIEW

снижения шума контактов зондов, подводимых к исследуемому образцу, несколько зондов размещают на одной контактной площадке. Анализ сигналов с них позволяет локализовать область генерации шума. Если заметной корреляции между сигналами не наблюдается, то контакт зондов с исследуемым образцом неудовлетворительный и необходимо принимать меры по его улучшению. Один из каналов служит для контроля уровня шума источника напряжения смещения. Для большей универсальности этот канал выполнен по схеме, аналогичной двум другим, что позволяет при случае использовать его как третий измерительный канал.

Каждый канал содержит два усилителя — малошумящий и предварительный. Последний увеличивает сигнал до уровня, требуемого для работы подсоединенной к ЭВМ платы сбора данных PCI-E 6361 фирмы «National Instruments», содержащей аналого-цифровой (АЦП) и цифроаналоговый (ЦАП) преобразователи. Он построен на прецизионном усилителе AD620, усиление которого изменяется ступенчато переключателем. В ЭВМ происходит обработка оцифрованных аналоговых сигналов и управление режимами измерения, например, напряжением смещения на образце или температурой.

В качестве малошумящего операционного усилителя (ОУ) применен AD795, сочетающий в себе низкий коэффициент шума при входном токе около 1 пА. Таким образом, этот усилитель является идеальным для измерения шума высокочастотных структур. Неинвертирующий вход ОУ подключен к нулевому потенциалу через резистор R_H , который образует входное сопротивление установки на низких частотах. Сопротивление резистора выбирается в зависимости от сопротивления исследуемого образца, и его можно задать 100 кОм, 1 и 10 МОм по соответствующей команде с ЭВМ. Столь высокие сопротивления связаны с результатами ис-

следования шумов в обратно смещенных полупроводниковых барьерных структурах (диодах). Чем выше сопротивление образца, тем больше должно быть R_H .

Максимальный коэффициент усиления каждого канала составляет 12000, что позволяет измерять напряжения амплитудой от 100 нВ. Спектральная плотность мощности каждого усилительного канала при закороченном входе составляет 90 нВ/Гц^{1/2} на частоте 1 Гц и 20 нВ/Гц^{1/2} на частоте 100 Гц.

На входе каждого канала установлен фильтр высоких частот (на входе первого канала $C_{p1}R_{вх1}$). Параллельное сопротивление резисторов R_H и $R_{вх}$ на рабочих частотах определяет общее входное сопротивление канала. Фильтр предотвращает перегрузку усилителя сигналами сверхнизких частот и задает нижнюю граничную частоту усилителя 0,1 Гц. Работа с более низкими частотами требует весьма длительного времени для получения результата, а значимость получаемой информации невелика, поскольку в настоящее время нет адекватных физических моделей, описывающих процессы генерации шума на частотах менее 0,1 Гц [2].

Собственный уровень шума установки необходимо контролировать постоянно, поэтому все эксперименты сопровождаются записью собственного шума установки и шума, генерируемого в образце без напряжения смещения. В роли калибратора по уровню шума выступает входное сопротивление канала усиления. Источником калиброванного сигнала служит тепловой белый шум, генерируемый известным входным сопротивлением. Изменяя его, можно менять уровень подаваемого на вход установки шумового сигнала. Входное сопротивление изменяется переключением набора резисторов при помощи реле (на рис. 1 не показаны). Цифровые сигналы для управления реле формируются на плате сбора данных PCI-E 6361. Такая калибровка позволяет оценить состояние усилительных каналов (например, отсутствие возбуждения) непосредственно во время эксперимента.

Благодаря использованию трех каналов усиления можно уменьшить «паразитные» источники шума (например, обусловленные неидеальностью контакта образца) и применить корреляционные методы обработки сигнала. Интеграция установки исследования НЧ-шума с ЭВМ обеспечивает необходимую статистическую обработку результатов измерений для повышения их достоверности и представления в наглядном виде для выявления природы шума.

Программное обеспечение установки реализовано в среде инженерно-графического программирования LabVIEW 10 [3, 4], что снижает временные затраты на разработку управляющей программы для измерительного комплекса. Кроме того, имеются широкие возможности для представления результатов эксперимента в той или иной форме и их математической обработки.

Как правило, шумовые параметры структур измеряют в стационарных условиях, т. е. при установившейся силе тока через структуру и при постоянной температуре. Поэтому алгоритмы управления установкой должны содержать временные паузы, необходимые для полной релаксации переходных процессов, вызванных, например, изменением напряжения постоянного смещения на структуре. Длительность таких пауз требуется увеличивать для приближения к усло-

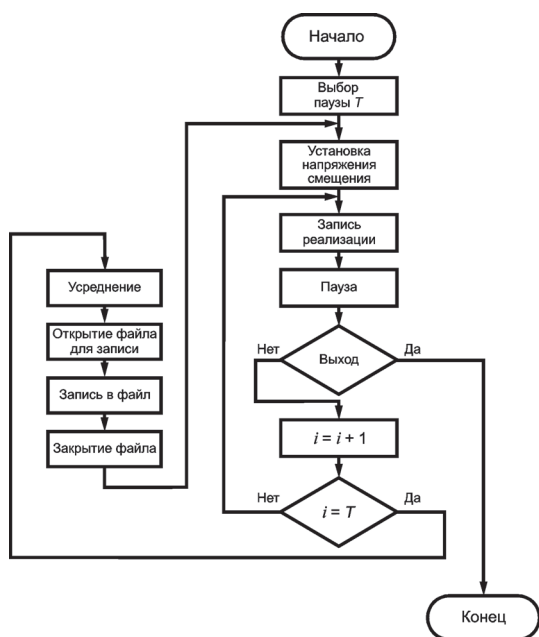


Рис. 2. Алгоритм виртуального прибора, управляющего работой установки

виям стационарности, однако при этом возрастает время эксперимента. Продолжительность паузы подбирается экспериментально для конкретного образца и связана с его сопротивлением: чем оно больше, тем длиннее должны быть паузы.

Алгоритм исследования вольт-шумовой зависимости состоит из нескольких этапов. На исследуемый образец подается напряжение смещения, например, с цифроаналогового преобразователя. После этого выдерживается пауза, необходимая для выхода усилителей установки на линейный режим работы. Затем проводится запись нескольких реализаций сигнала и их анализ. Длительность реализации определяется минимальной частотой измеряемого шумового сигнала и частотой дискретизации АЦП. Особенность алгоритма виртуального прибора (рис. 2) состоит в том, что он позволяет наблюдать изменение спектральной плотности мощности (СПМ) шума непрерывно в режиме реального времени, благодаря чему оператор может прервать эксперимент, ввести в него коррективы и в результате сократить общее время измерений.

Верхняя граничная частота исследуемых шумовых сигналов составляет 2 кГц. На более высоких частотах НЧ составляющая шума маскируется тепловым шумом, генерируемым входным сопротивлением установки и образцом. Кроме того, измерения при большом входном сопротивлении (например, 10 МОм) и емкости образца, начиная с 20 пФ, ослабляет шумовой сигнал на частотах более 1 кГц. Расчеты по теореме Котельникова показали, что частоту дискретизации для оцифровывания аналогового шумового сигнала можно выбрать равной 4 кГц. Однако при этом сильно возрастают требования к ФНЧ (см. рис. 1), установленному перед АЦП и необходимому для подавления комбинационных составляющих частот входного сигнала и дискретизации. Был применен двухзвенный RC-фильтр низких частот с частотой среза 2 кГц, а частота дискретизации сигнала увеличена до 10 кГц. Это уменьшило влияние комбинационных частот в преобразованном сигнале до пренебрежимо малой величины и снизило требования к ФНЧ при незначительных аппаратных затратах.

Анализ реализаций сигнала заключается в вычислении зависимости СПМ от частоты. Реализация сигнала подвергается умножению на весовую функцию «окна», в качестве которой используется окно Блекмана—Харрисона [5]. Далее вычисляются автокорреляционная функция и СПМ с использованием фурье-преобразования.

Вычисление частотной зависимости СПМ с наложением весовой функции «окна» в среде LabVIEW представлено единым функциональным блоком, настройка которого заключается в выборе параметров «окна». После получения нескольких значений СПМ рассчитывается среднее арифметическое по каждой частотной составляющей, результаты сохраняются в файле на жестком диске ЭВМ. При отключении питающего напряжения уже записанные данные не теряются, что достигается открытием файла непосредственно перед записью с последующим его закрытием после записи (см. рис. 2). Таким образом, снижается вероятность потери данных измерений при некорректном завершении эксперимента.

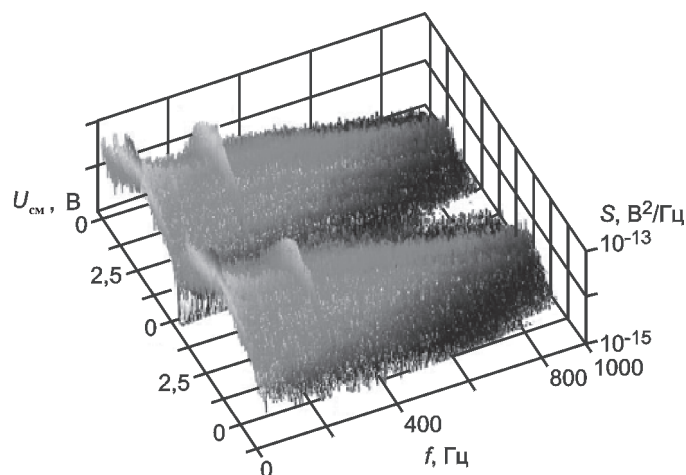


Рис. 3. Графическое представление данных, получаемых в результате работы установки спектроскопии НЧ-шумов

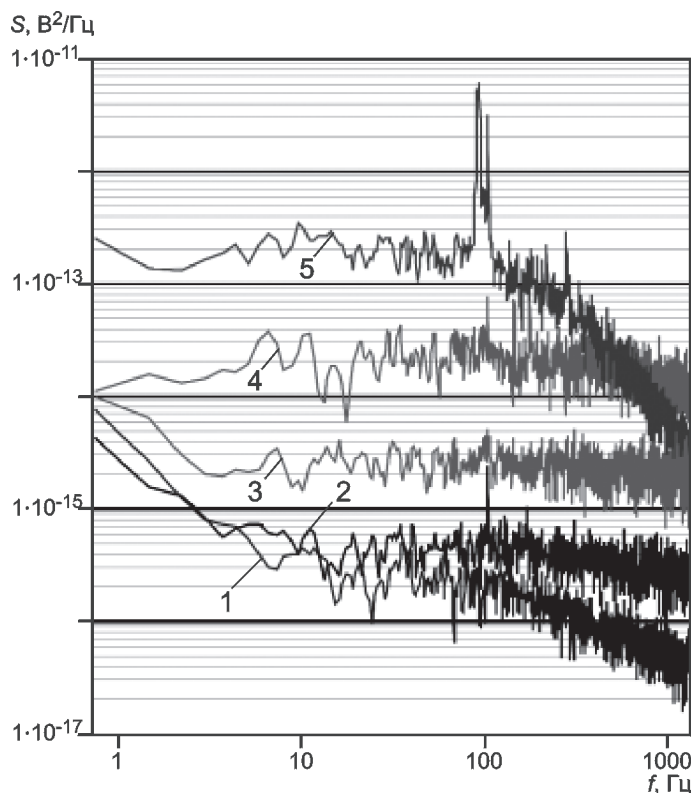


Рис. 4. Зависимости СПМ НЧ-шума от частоты для различных сопротивлений источника сигнала:

1 — режим короткого замыкания; 2 — 100 кОм; 3 — 1 Мом; 4 — 10 Мом; 5 — 100 МОм

В процессе работы программы на монитор выводится графическая зависимость СПМ на выбранной частоте от напряжения электрического смещения на исследуемой структуре. Как показали исследования, эта зависимость позволяет качественно контролировать источник шумового сигнала (образец или установку) в течение всего экспери-

мента. После записи результатов в файл устанавливается новое значение напряжения смещения на образце и процесс измерений повторяется до момента, пока не будет остановлен оператором.

Измерения шумовых параметров приборов требуют накопления большого статистического материала (многократного повторения измерений), поэтому был выбран такой алгоритм изменения напряжения смещения, при котором оно варьируется от минимального до максимального и обратно. Предложенный алгоритм позволяет избежать появления на исследуемой структуре больших перепадов напряжения, а значит, устранить длительные по времени переходные процессы и кроме того выявить гистерезис в исследуемых закономерностях НЧ-шума.

В конце работы комплекса формируется файл данных. Они отображаются на мониторе в виде поверхности в трехмерной системе координат СПМ S — частота f — напряжение смещения $U_{см}$. Как показано в [6], это позволяет обнаружить особенности спектра НЧ-шума в изучаемом образце. Пример выходных данных установки представлен на рис. 3.

Изображения поверхности, полученные на диодной структуре, отображают два цикла изменения напряжения смещения — при его увеличении и уменьшении. Из рис. 3 следует, что наблюдается чистый шум вида $1/f$, уровень которого монотонно изменяется в зависимости от напряжения смещения. Получаемые таким образом данные повторяемы, поскольку эксперимент выполняется автоматически несколько раз. В ходе данного исследования записывалось до восьми циклов изменения напряжения.

На рис. 4 показаны результаты калибровки установки по уровню шума сопротивлений известного номинального значения. В области частот менее 10 Гц наблюдается некоторое увеличение СПМ, вызванное $1/f$ -составляющей шумового напряжения примененного ОУ. Уровень теплового шума, генерируемый резистором сопротивлением 10 МОм, перекрывает собственные шумы входного ОУ во всем исследуемом диапазоне частот 1 Гц — 1 кГц. Чтобы определить возможности изучения высокоомных структур на данной установке, общее входное сопротивление одного из каналов увеличили до 100 МОм. Генерируемый таким сопротивлением СПМ уровня шума демонстрирует кривая 5. При работе с относительно высокоомными структурами необходимо помнить об уменьшении СПМ в области высоких частот, вызванном входной емкостью установки.

Выводы. Рассмотрен измерительный комплекс спектроскопии НЧ-шумов полупроводниковых диодных структур, а также конструктивно-методологические особенности уста-

новки для исследования полупроводниковых диодных структур. Разработана автоматизированная установка, предложены новые конструктивные решения и алгоритм обработки данных в среде инженерно-графического программирования LabVIEW.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ с использованием оборудования регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования при Рязанском государственном радиотехническом университете.

Л и т е р а т у р а

1. **Кострюков С. А.** Автоматизированная установка для измерения СПМ низкочастотных шумов // Шумовые и деграционные процессы в полупроводниковых приборах: Материалы междунар. науч.-метод. семинара. М.: МНТРОЭС им. А. С. Попова, 2003. С. 23—25.
2. **Кострюков С. А., Холомина Т. А.** Особенности анализа сигналов низкочастотного шума методом дискретного преобразования Фурье // Измерительная техника. 2005. № 12. С. 47—50; **Kostryukov S. A., Kholomina T. A.** Features of the analysis of low-frequency noise by the discrete fourier transformation method // Measurement Techniques. 2005. V. 48. N 12. P. 1217—1221.
3. **Ермачихин А. В., Литвинов В. Г., Мальченко С. И.** Программное обеспечение измерительной установки для низкочастотной спектроскопии // Инженерные и научные приложения на базе National Instruments-2012: Труды XI междунар. науч.-практ. конф. М., 2012. С. 387—389.
4. **Свид-во** об офиц. регистрации программы для ЭВМ № 2012617503. Программа для автоматизированного измерения НЧ-шумов и спектральной плотности мощности шума в элементах электронной техники / А. В. Ермачихин и др. (RU) // Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем. 2012. № 4 (81). Ч. 2. С. 361—362.
5. **Букингом М.** Шумы в электронных приборах и системах / Пер. с англ. М.: Мир, 1986.
6. **Ермачихин А. В. и др.** Исследование шумовых свойств и электронных состояний диода Шоттки на основе гетероструктуры InGaAs/GaAs с квантовой ямой // Вестник Рязанского гос. радиотехнического ун-та. 2012. № 3. (Вып. 41). С. 98—103.

Дата принятия 19.06.2013 г.