

ОБРАБОТКА ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО РЕЛАКСАЦИОННОГО СИГНАЛА В СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ МЕТОДАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУР

Ермачихин А.В., к.ф.-м.н., доцент каф. МНЭЛ, ФГБОУ ВО РГРТУ, e-mail: al.erm@mail.ru

Трусов Е.П., аспирант каф. МНЭЛ, ФГБОУ ВО РГРТУ, e-mail: eptrusov@yandex.ru

Гудзев В.В., к.ф.-м.н., доцент каф. МНЭЛ, ФГБОУ ВО РГРТУ, e-mail: valerygudzev@yandex.ru

Зубков М.В., к.т.н., доцент каф. МНЭЛ, ФГБОУ ВО РГРТУ, e-mail: mihailzubkov@yandex.ru

Литвинов В.Г., д.ф.-м.н., зав. каф. МНЭЛ, ФГБОУ ВО РГРТУ, e-mail: vglit@yandex.ru

EXPONENTIAL RELAXATION SIGNAL PROCESSING IN SPECTROSCOPIC METHODS FOR STUDYING SEMICONDUCTOR BARRIER STRUCTURES

Ermachihin A.V., Trusov E.P., Gudzev V.V., Zubkov M.V., Litvinov V.G.

The paper discusses the problems of a physical experiment related to the practical implementation of the method of deep level transient spectroscopy designed to study and control physical processes associated with the electronic levels recharge in semiconductor barrier micro- and nanostructures. The problem concerns the measurement and processing of a noisy signal that depends on temperature and varies exponentially.

Key words: signal processing, deep level transient spectroscopy, exponential signal, computer processing.

Ключевые слова: обработка сигнала, релаксационная спектроскопия глубоких уровней, экспоненциальный сигнал, компьютерная обработка.

Введение

Для контроля параметров и изучения процессов, связанных с перезарядкой электронных уровней в полупроводниковых материалах, структурах и приборах применяются электрические спектроскопические методы диагностики – разновидности релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ). При перезарядке электронных уровней в активных слоях полупроводниковой структуры происходит релаксация электрической емкости, тока или заряда по экспоненциальному или близкому к нему закону [1, 2]. При реализации эксперимента с использованием РСГУ необходимо измерить температурную зависимость постоянной времени релаксации сигнала, отличительными особенностями которого является: изменение амплитуды полезного сигнала на 5-8 порядков величины за интервал времени 1 мкс – 1 с, экспоненциальная температурная зависимость времени релаксации полезного сигнала, наличие зависящей от температуры постоянной составляющей тока – тока утечки, наличие шума. Эти особенности накладывают определенные ограничения на условия реализации эксперимента и требования к измерительной аппаратуре и методике обработки получаемых данных.

Современные измерительно-аналитические комплексы включают в себя множество приборов, соединительных кабелей, коммутационных интерфейсов и, конечно, компьютер как средство управления. В хорошо настроенном комплексе все приборы корректно и быстро выполняют свои функции, освобождая время для

Обсуждаются проблемы физического эксперимента, связанного с практической реализацией метода релаксационной спектроскопии глубоких уровней, предназначенного для исследования и контроля физических процессов, связанных с перезарядкой электронных уровней в полупроводниковых барьерных микро- и наноструктурах. Проблема касается измерения и обработки зашумленного сигнала, зависящего от температуры и изменяющегося по экспоненциальному закону.

работы другим узлам и устройствам. На самом деле компьютер не сам производит управление, за правильность выполнения тех или иных команд «отвечает» программное обеспечение. Именно от алгоритмов, заложенных в программное обеспечение, зависит результат, получаемый при проведении эксперимента. Проблема заключается в том, что этим алгоритмам уделяется недостаточно внимания. Измерительная и компьютерная техника вносят сильный вклад в научный прогресс, но при сильном усложнении приборов методы проведения экспериментов часто остаются на том же уровне, когда компьютеры только начали применяться для автоматизации физического эксперимента.

Особое внимание следует уделить способам обработки полученных данных. Существует множество различных подходов к решению одних и тех же задач. Например, усреднение однотипных данных можно осуществлять по времени, по диапазону значений или по определенным заданным критериям. На каждом этапе можно находить «промахи» и убирать их, либо набирать всю статистику данных, а после осуществить поиск «промахов». Определенную сложность в обработке данных вносят экспоненциальные зависимости, так как на разных временных интервалах измеряемый параметр может отличаться по величине на несколько порядков [3].

Релаксационная спектроскопия глубоких уровней

В данной работе остановимся на рассмотрении в качестве анализируемого сигнала ток релаксации, возникающий в полупроводниковой барьерной структуре при периодическом воздействии на нее электрическим полем и(или) светом. Источником обрабатываемых данных выбран измерительно-аналитический комплекс токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней (ТРСГУ) [4]. Управление комплексом и математические операции с данными осуществляются программой, созданной в среде графического программирования LabVIEW [5, 6.]. В качестве выходных данных используются значение температуры и тока релаксации, полученной при этой заданной температуре образца. Это сделано для того, чтобы в дальнейшем иметь доступ к полным экспериментальным данным и иметь возможность обрабатывать данные различными способами. Релаксационный ток имеет вид [4, 7]

$$i(t) = \frac{qSN_tW}{2\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + I_L,$$

где q – элементарный заряд; W – ширина слоя объемного заряда, в котором происходит перезарядка глубоких центров, в котором происходит опустошение глубокого уровня со скоростью эмиссии $(\tau_{max})^{-1}$; S – площадь барьерной структуры; N_t – концентрация глубоких центров; τ – постоянная времени релаксации; I_L – ток утечки.

Обработка релаксационного тока может осуществляться различными способами [3]: умножение сигнала на весовую функцию [4], разложение на экспоненты [8, 9], преобразование Лапласа [10]. Для последних двух методов применяется стороннее программное обеспечение, так что более подробно остановимся на описании использования весовых функций, а именно «lock-in» и «GS-4».

Реализация функции «lock-in»

Помимо простоты реализации использование весовой функции lock-in обеспечивает хорошее соотношение сигнал/шум и приемлемое подавление постоянной со-

ставляющей тока релаксации [3]. Реальный релаксационный ток после I-V преобразователя показан на рис. 1.

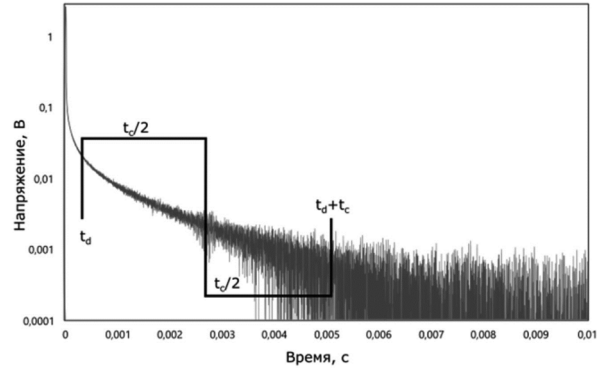


Рис. 1. Релаксационной сигнал с наложенной весовой функцией lock-in

В случае использования данной функции получают следующие выражения для пика на спектре

$$\tau_{max} = \frac{t_c}{2 \ln\left(\frac{t_c}{t_d} + 1\right)},$$

$$\Delta R(\tau_{max}) = \frac{qWSKN_t}{2} \exp\left(-\frac{t_d}{\tau_{max}}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{t_c}{2\tau_{max}}\right)\right]^2,$$

где t_d – время начала окна; t_c – длительность окна; τ_{max} – обратная величина скорости эмиссии носителей заряда с ГУ; K – коэффициент преобразования.

Для построения ТРСГУ-спектра можно применить несколько различных способов. Один из них это разбиение всего сигнала на множество трапеций, нижней границей у которых будет ось абсцисс, верхней – сам токовый сигнал, а боковыми границами будут служить отсчеты.

То есть площадь трапеции будет $S_{tr} = \frac{1}{2}(i_x + i_{x+1}) \times 0,5 \cdot 10^{-6}$, так как между соседними отсчетами 0,5 мкс. Теперь можно взять сумму всех трапеций от t_d до $t_d + t_c/2$ и вычесть из неё сумму всех трапеций от $t_d + t_c/2$ до $t_d + t_c$ (рис. 2).

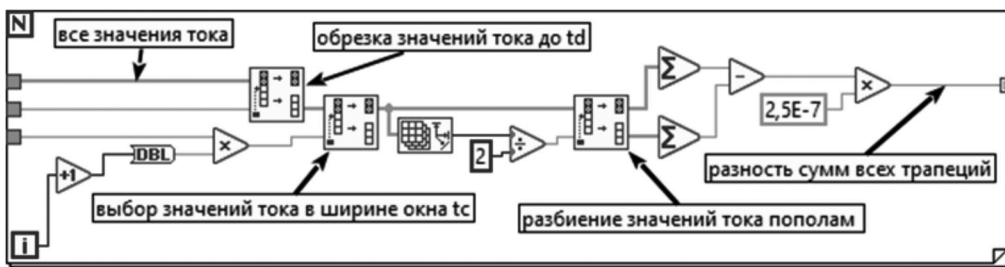


Рис. 2. Нахождение значения ΔR для ТРСГУ-спектра через площадь трапеций

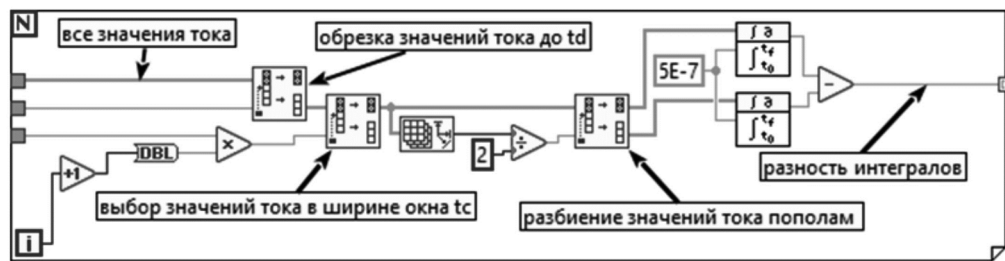


Рис. 3. Нахождение значения ΔR для ТРСГУ-спектра с помощью интегралов

Если вместо разбиения всего сигнала на трапеции использовать элементы интегралов, это позволит избежать операций суммирования и умножения (рис. 3).

Реализация функции «GS-4»

Весовая функция GS-4 [11] имеет худшее соотношение сигнал/шум по сравнению с «lock-in», однако лучшее разрешение по времени релаксации [3]. Свойства спектра, полученного с использованием окна «GS-4», параметры которого даны в [4]:

$$\Delta R(\tau_{\max}) = \frac{qWSKN_t}{2} \exp\left(-\frac{t_d}{\tau_{\max}}\right) \times \left[26 \exp\left(-\frac{t_c}{4\tau_{\max}}\right) - 73 \exp\left(-\frac{t_c}{2\tau_{\max}}\right) + 72 \exp\left(-\frac{3t_c}{4\tau_{\max}}\right) - 24 \exp\left(-\frac{t_c}{\tau_{\max}}\right) - 1 \right].$$

В выражении $\tau_{\max} = -t_c / 4 \ln x$, где x находится из решения уравнения $a_1 x^4 + a_2 x^3 + a_3 x^2 + a_4 x + a_5 = 0$, где $a_1 = 24(t_d + t_c)$; $a_2 = -72(t_d + 3t_c / 4)$; $a_3 = 73(t_d + t_c / 2)$; $a_4 = -26(t_d + t_c / 4)$; $a_5 = t_d$.

Для решения уравнения 4-го порядка в LabVIEW сперва необходимо его задать. Делается это с помощью строковой функции, как показано на рис. 4.

А после, с помощью специальных функций, найти решения уравнения и выбрать необходимые корни (рис. 5).

Алгоритм применения базиса экспоненциальных функций

Разработан алгоритм, позволяющий обрабатывать экспериментальные зависимости, обусловленные суперпозицией экспоненциальных процессов. Задача

спектрального анализа в базисе экспоненциальных функций решается в классе линейных алгоритмов. При вводе релаксационной зависимости в ОЗУ отсчеты берутся равномерно по времени с интервалом дискретизации t . Интервал дискретизации ограничивает минимальное значение измеряемой постоянной времени. Первой операцией данного алгоритма спектральной обработки является усреднение в измерительном интервале в логарифмическом масштабе по времени. Это необходимо для уменьшения погрешности измерения за счет влияния шумов. Логарифмический масштаб применяется для обеспечения необходимой разрешающей способности в широком диапазоне постоянных времен релаксации. При суммировании получаем экспоненту:

$$\sum_{i=k}^{k+n-1} \exp\left(-\frac{i\Delta t}{\tau}\right) = n \cdot \exp\left(-\frac{t_x}{\tau}\right),$$

где $t_x = k \cdot \Delta t + \frac{n-1}{2} \Delta t$, что фактически соответствует середине интервала усреднения.

Следующим производится сглаживание полученной зависимости полиномом Лагранжа второй степени. Это позволяет осуществить интерполяцию для функции с неравномерной дискретизацией.

$$\varphi_n(\tau) = L_0(\tau) \cdot f_0 + L_1(\tau) \cdot f_1 + L_2(\tau) \cdot f_2;$$

$$L_i(\tau) = \prod_{j=0, j \neq i}^2 \frac{\tau - \tau_j}{\tau_i - \tau_j};$$

По этой функции можно рассчитать значения в междоузлиях. Особенно это важно при малых значениях времени измерения, которые влияют на спектр при малых постоянных времени. Основной операцией спектральной обработки сигнала в базисе экспоненциальных функций является дифференцирование по постоянной времени. Функция в нормальном масштабе времени имеет вид:

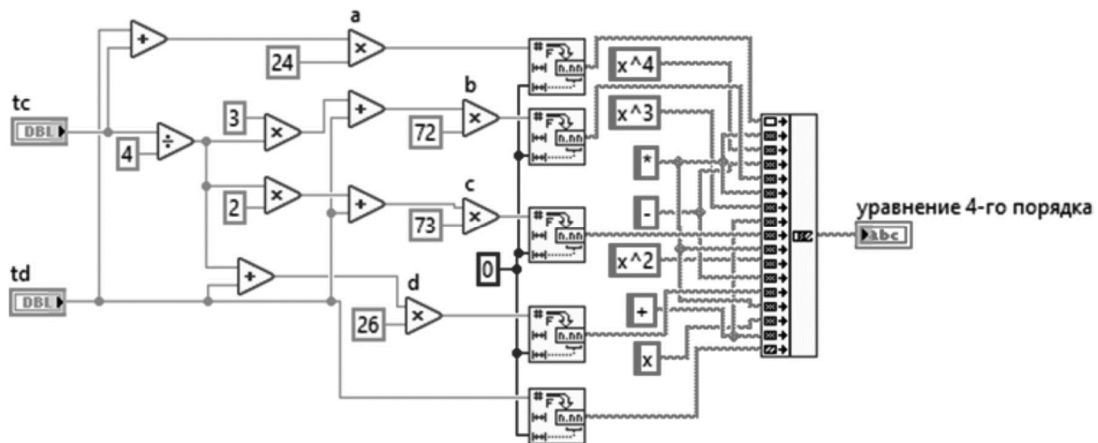


Рис. 4. Создание уравнения в LabVIEW

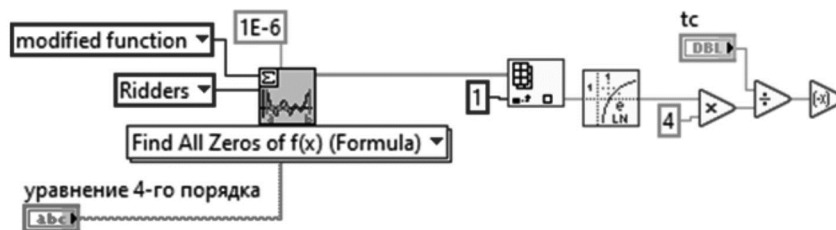
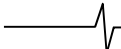


Рис. 5. Решение уравнения в LabVIEW



$$S(t) = A \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{\tau}\right).$$

Функция в логарифмическом масштабе времени

$$S(x) = A \cdot \exp\left(-\frac{e^2}{\tau}\right), \text{ где } x = \ln(t).$$

Спектр в экспоненциальном базисе: $A \frac{dS(x)}{dx} = G(x)$.

Далее находим максимум $G(x)$, проведя примитивный алгоритм численного дифференцирования: $G_1 = [S(x_{i+1}) - S(x_i)] / \Delta x$.

Временное расположение максимума соответствует истинному значению постоянной времени релаксации. Амплитуда максимума однозначно связана с амплитудой экспоненциальной функции. Таким образом, получаем характеристики экспоненциальной зависимости. Дополнительное уменьшение влияния шумов при измерении достигается путём сглаживания результатов в спектральной области.

Таким образом, алгоритм спектральной обработки цифрового сигнала в базисе экспоненциальных функций содержит следующие основные этапы:

- 1) усреднение отсчётов измеряемого сигнала;
- 2) коррекция сигнала, полученного в результате усреднения;
- 3) интерполяция отсчетов в логарифмическом масштабе времени;
- 4) численное дифференцирование;
- 5) усреднение в спектральной области.

Данный алгоритм реализован в виде программного продукта, позволяющего вычислять спектр в широком диапазоне параметров, не прибегая к температурному сканированию исследуемой барьерной структуры.

Заключение

Использование современных измерительных устройств и компьютерной техники позволяет создавать полностью автоматизированные исследовательские комплексы. Обработка полученных экспериментальных данных может осуществляться сложными алгоритмами, включающими в себя различные способы фильтрации, сглаживания, преобразований, экстраполяцию и интер-

поляцию. Создание корректного алгоритма обработки данных позволяет получать результат во время проведения эксперимента.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003) с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина.

Литература

1. Lang D.V. J. Appl. Phys. 1974, vol. 45, pp. 3023-3032. (doi: 10.1063/1.1663719).
2. Денисов А.А., Лактюшкин В.Н., Садофьев Ю.Г. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней. Обзоры по электронной технике. ЦНИИ «Электроника». М., 1985. № 15/144. 52 с.
3. Ермачихин А.В., Воробьев Ю.В., Трусов Е.П., Литвинов В.Г. Сравнение методов релаксационной спектроскопии глубоких уровней при анализе релаксационного тока. Вестник РГРТУ. 2022. № 82. С. 207-217.
4. Ермачихин А. В., Литвинов В. Г. Автоматизированный измерительный комплекс токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней. Приборы и техника эксперимента. 2018. № 2. С. 118-123.
5. Ермачихин А.В., Литвинов В.Г. LabVIEW в современной индустрии измерений (обзор). Информационные технологии. 2014. № 3. С. 25-29.
6. Essick J. Hands-On Introduction to LabVIEW for Scientists and Engineers. Oxford University Press, 2012.
7. Кузнецов Н.И. ФТП. 1993. Т. 27. Вып. 10. С. 1674.
8. Provencher S.W. An eigenfunction expansion method for the analysis of exponential decay curves. The Journal of Chemical Physics. 1976, vol. 64, issue 7, pp. 2772-2777.
9. Tittelbach-Helmrich K. An integration method for the analysis of multiexponential transient signals. Measurement Science and Technology. 1993, vol. 4, issue 12, pp. 1323-1329.
10. Dobaczewski L., Kaczor P., Hawkins I. D., Peaker A. R. Laplace transform deep-level transient spectroscopic studies of defects in semiconductors. Journal of Applied Physics. 1994, vol. 76, issue 1, pp. 194-198.
11. Istratov A.A. Rev. Scient. Instrum. 1997, vol. 68, pp. 3861. doi 10.1063/1.1148038.