

УДК 53.083.91

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ РЕЛАКСАЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ ПРИ АНАЛИЗЕ РЕЛАКСАЦИОННОГО ТОКА

А. В. Ермачихин, к.ф.-м.н., доцент кафедры МНЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-3808-9691, e-mail: al.erm@mail.ru

Ю. В. Воробьев, к.ф.-м.н., с.н.с. кафедры МНЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-5176-1166, e-mail: vorobjov.y.v@rsreu.ru

Е. П. Трусков, аспирант, инженер кафедры МНЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-1239-2702, e-mail: eptrusov@yandex.ru

В. Г. Литвинов, д.ф.-м.н., заведующий кафедрой МНЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-6122-8525, e-mail: vglit@yandex.ru

Рассматриваются три разных подхода к обработке результатов симуляции тока релаксации при прямоугольном опустошающем сигнале. Для сравнения выбраны случаи с одним, двумя и тремя глубокими уровнями с шумом и без него. Целью работы является определение применимости методов обработки результатов при различных случаях набора данных. Для метода релаксационной спектроскопии глубоких уровней с преобразованием Лапласа применялось программное обеспечение CONTIN. Для разложения релаксационного тока на экспоненты применялись программное обеспечение DISCRETE и интегральный метод анализа мультиэкспоненциальных переходных сигналов. В качестве взвешивающего окна при классическом подходе обработки тока применялись «Lock-in» и «GS-4».

Ключевые слова: РСГУ, обработка данных, математическое моделирование, Laplace-DLTS, contin, программное обеспечение.

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-82-207-217

Введение

Релаксационная спектроскопия глубоких уровней (РСГУ) не теряет своей актуальности с момента изобретения [1] и до сегодняшнего дня является одним из основных способов исследования полупроводниковых барьерных структур. Относительная простота используемых устройств и оборудования [1-3] и высокая точность результатов позволяют использовать РСГУ для определения энергии активации энергетических уровней в запрещенной зоне полупроводника, концентрации носителей заряда на данном уровне и сечения захвата. Пожалуй, единственным существенным недостатком данного метода является сложность разделения спектральных пиков, если они накладываются друг на друга. В таком случае можно получить не всю доступную информацию. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней с преобразованием Лапласа (Laplace-DLTS) имеет более высокую чувствительность по энергии, но необходим определенный порог сигнал-шум для корректной работы [4]. Разложение исходного сигнала на экспоненты позволит выявить сразу все составляющие в токе релаксации [4, 5], но уровень шума при данном подходе также очень сильно влияет на получаемые результаты. Целью работы является определение применимости методов обработки результатов при различных случаях набора данных.

Методы обработки релаксационных кривых

Процесс релаксации заполнения состояний дефектов в исследуемой полупроводниковой структуре можно представить суммой (спектром) элементарных релаксационных процессов, ассоциированных с каждым дефектом в отдельности. В случае, если каждый элементарный релаксационный процесс может быть представлен экспоненциальной функцией, суммарный сигнал релаксации находится как

$$f(t) = f(t) = \int_0^{+\infty} F(s)e^{-st} ds, \quad (1)$$

где s называют скоростью эмиссии, а $F(s)$ представляет собой спектр релаксационного процесса и является, по сути, искомой величиной при исследованиях методом РСГУ. В полупроводниковых структурах приборного качества, содержащих небольшое количество дефектных состояний, спектр релаксации $F(s)$ может быть представлен набором дискретных пиков, каждому из которых может быть поставлено в соответствие дефектное состояние в полупроводнике.

Поиск спектра релаксации является нетривиальной задачей. Существуют несколько подходов к ее решению, основные особенности которых приведены ниже.

Использование взвешивающего окна

Классический подход РСГУ заключается в применении определенного взвешивающего окна к релаксационной кривой. Обычно из одного значения, которое является единичным измерением или суммой измерений тока или емкости при фиксированном значении времени, вычитают другое значение, которое также будет либо единичным измерением, либо суммой измерений при другом фиксированном времени. Полученную разность строят в зависимости от температуры образца, получая таким образом РСГУ-спектр. Если во время температурных измерений в область пространственного заряда (ОПЗ) образца попадал глубокий уровень (ГУ), то на РСГУ-спектре нарисовется пик. Изменяя начало и/или ширину окна, пик можно сдвигать по температуре, получив таким образом зависимость температуры максимумов пиков от времени. Построив прямую Аррениуса в координатах «время-обратная температура», по углу наклона этой прямой можно определить энергию активации глубокого уровня и площадь сечения захвата. А по высоте самих пиков на спектре можно определить концентрацию носителей заряда на ГУ.

Описанную в предыдущем параграфе процедуру можно воспринимать как применение к релаксационной кривой взвешивающего окна. Используются различные взвешивающие окна: одни позволяют разделять близлежащие пики на спектре, другие менее чувствительны к шуму. В зависимости от поставленной задачи необходимо выбирать соответствующие окна. Спектр РСГУ в обобщенной форме можно представить в виде

$$R(t) = \int_0^T e(t, \tau) w(t) dt, \quad (2)$$

где $w(t)$ – весовая функция (или окно); T – время, в течение которого регистрируется сигнал релаксации емкости, тока или заряда; $e(t, \tau)$ – входной сигнал, в общем случае представляющий собой экспоненту или сумму экспонент с добавкой шумовой составляющей [6].

В работе применялись одно из самых стандартных окон «Lock-in» [7] и окно «GS-4» [8, 9]. «Lock-in» позволяет работать с зашумленным сигналом, так как берет значения интегрально по большому отрезку времени, что позволяет несколько сгладить шум. В случае использования данного окна получают следующие выражения для пика на спектре [2]:

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

$$\Delta R(\tau_{\max}) = \frac{q W S K N_t}{2} \exp \left(-\frac{t_d}{\tau_{\max}} \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{t_c}{2\tau_{\max}} \right) \right]^2, \quad (3)$$

где t_d – время начала окна; t_c – длительность окна; $\tau_{\max}$ – обратная величина скорости эмиссии носителей заряда с ГУ; q – величина элементарного заряда; W – ширина ОПЗ; S – площадь контакта; K – коэффициент преобразования; N_t – концентрация носителей заряда на ГУ.

Использование «GS-4» растягивает пик при разных временах τ по температуре, что позволяет отделить близкие на спектре пики друг от друга. Свойства спектра, полученного с использованием окна «GS-4», параметры которого даны в [9]:

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

В выражении (4) $\tau_{\max} = -t_c / 4 \ln x$, 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 $a_1 = 24(t_d + t_c)$, $a_2 = -72(t_d + 3t_c / 4)$, $a_3 = 73(t_d + t_c / 2)$, $a_4 = -26(t_d + t_c / 4)$, $a_5 = t_d$. Данные коэффициенты получены путем интегрирования выражения (2) для функции «GS-4» [2]. Данные выражения выведены для токовой РСГУ (ТРСГУ).

Метод Laplace-DLTS

В основе метода лежит решение интегрального уравнения (1) с помощью метода регуляризации Тихонова. Название данного способа связано с тем, что (1) является формулой преобразования Лапласа. Применение этого метода обеспечивает повышение энергетического разрешения по сравнению с обычной РСГУ на порядок [4]. Однако для обеспечения высокой разрешающей способности сигнал релаксации должен иметь соотношение сигнал-шум на уровне 10^3 , что не всегда осуществимо на практике [4].

Для направленного применения данного метода необходимо знать диапазон температур, в котором влияние исследуемых дефектных состояний на сигнал релаксации максимально. Поэтому обычно сперва образец исследуют классическим методом РСГУ с использованием взвешивающего окна, наблюдая пик или пики на спектре, а потом на фиксированных температурах, расположенных в пределах пиков, проводят многочисленное усреднение данных релаксации при постоянной температуре для достижения требуемого соотношения сигнал-шум. Вычислив по полученным релаксационным кривым спектры релаксации, соответствующие различным температурам, можно провести идентификацию пиков, соответствующих тем или иным дефектным состояниям, и рассчитать их энергии активации.

Для реализации данного метода обработки релаксационных кривых использовалось свободно распространяемое программное обеспечение CONTIN [10]. С его помощью можно решать уравнение (1) методом регуляризации Тихонова с автоматическим выбором параметра регуляризации. Результатом решения будет являться спектр $F(s)$. Для обеспечения работы программы требуется в явном виде указывать диапазон скоростей эмиссии s , участвующих в релаксации процессов. Применение преобразования Лапласа позволит достичь теоретического предела разрешения соседних пиков DLTS вплоть до $2kT$ [11].

Разложение на экспоненты

Как указывалось ранее, сигнал релаксации можно представить суммой элементарных релаксационных компонент, каждая из которых является простой экспоненциальной функцией. В таком случае для интерпретации экспериментальных релаксационных кривых можно использовать нелинейную регрессию, используя сумму экспонент в качестве модельной функции.

Для реализации данного способа интерпретации релаксационных кривых применялось два математических подхода. Первый – провести аппроксимацию несколькими модельными функциями, отличающимися числом экспонент, а затем выбрать из них ту функцию, которая обеспечивает наибольшую достоверность аппроксимации. Такой алгоритм реализует свободно распространяемое программное обеспечение DISCRETE [5]. Никаких исходных данных для работы программы не требуется – начальные приближения модельных параметров выбираются автоматически. Второй подход заключается в том, что нелинейную задачу аппроксимации суммой экспонент можно свести к линейной задаче, как показано в работе [12]. Это

позволяет добиться единственности решения задачи аппроксимации по методу наименьших квадратов, а также исключает необходимость в выборе начального приближения для модельных параметров. Недостатком, однако, является повышенная чувствительность к шумам в случае использования 3-х и более экспонент. Вследствие этого возможны ситуации, при которых физически значимое решение задачи не может быть найдено.

Моделирование тока релаксации

В качестве исходных данных для работы использовался ток релаксации, содержащий в себе информацию о ГУ. Для моделирования тока релаксации используются следующие формулы [7, 13]

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

где $\tau = (\sigma_n g_T N_C)^{-1} \exp(\Delta E_t / kT)$ – время релаксации; σ_n – площадь сечения захвата; $g_T = \sqrt{8kT / \pi T}$ – тепловая скорость носителей заряда; $N_C = 2(2m\pi kT)^{3/2} / h^3$ – концентрация носителей заряда; ΔE_t – энергия активации ГУ; k – постоянная Больцмана; m – эффективная масса носителей заряда; h – постоянная Планка.

Смоделировано три случая: 1 пик с энергией активации 0,2 эВ, площадь сечения 10^{-17} см^2 ; 2 пика с энергиями 0,2 и 0,23 эВ, площадь сечения 10^{-17} см^2 и 10^{-18} см^2 соответственно; 3 пика с энергиями 0,2, 0,3 и 0,23 эВ, площадь сечения 10^{-17} см^2 , 10^{-16} см^2 и 10^{-18} см^2 . Для всех ГУ задана одинаковая концентрация 10^{14} см^{-3} . Ширина ОПЗ модельного образца 1 мкм, площадь контакта 0,1 мм², коэффициент преобразования 10^8 . Данные подобраны таким образом, чтобы один пик на РСГУ-спектре был обособлен, а два других наложились друг на друга. Такие случаи часто встречаются в реальных экспериментах [14-16] и ведут к существенному усложнению интерпретации результатов. Спектры, полученные после обработки тока релаксации взвешивающим окном «Lock-in», показаны на рисунке 1, время τ для всех спектров равно 62 мкс.

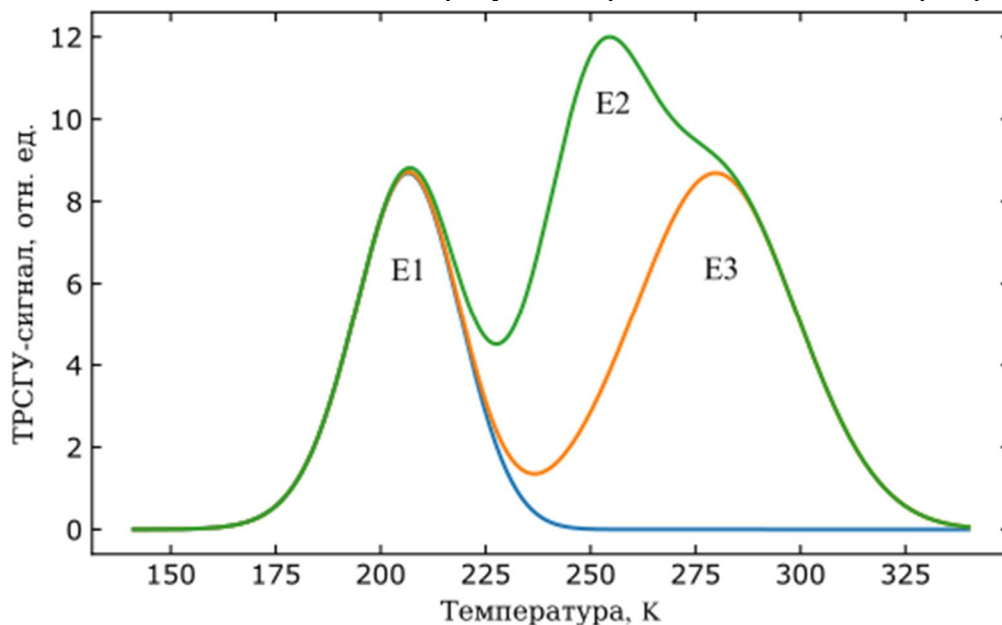


Рисунок 1 – ТРСГУ-спектры, полученные при симуляции отклика от одного, двух и трех ГУ
Figure 1 – I-DLTS spectra obtained by simulating the response from one, two, and three deep levels

Результаты и обсуждения

Использование взвешивающих окон позволило весьма точно определить характеристики одного и двух пиков, с нахождением на спектре сразу трех пиков возникли некие трудности. Данные, которые можно получить, используя окна, – это энергия активации, площадь сечения захвата и концентрация носителей заряда на ГУ. Для нахождения сечения захвата необходимо найти значение ординаты при пересечении прямой Аррениуса и оси ординат. После нахождения значения ординаты (u) её следует подставить в формулу [7]:

$$\sigma_n = \frac{h^3 \exp\left(\frac{u}{\log e}\right)}{16\pi m k^2},$$

где e – число Эйлера.

Общая формула нахождения концентрации носителей заряда на ГУ с использованием абсолютного значения максимумов пиков на ТРСГУ-спектре [13]:

$$N_t = \frac{2R_{\max}}{qWSK} \exp\left(-\frac{t_d}{\tau}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{t_c}{2\tau}\right)\right]^2, \quad (5)$$

если вторая часть выражения (5) уже применялась для построения ТРСГУ спектров, как это было показано в выражении (3), то выражение (5) превращается в следующее:

$$N_t = \frac{2R_{\max}}{qWSK}.$$

Концентрация носителей заряда на ГУ определяется с помощью высоты максимумов пиков на спектре. При использовании окна «Lock-in», высота пиков не зависела от уровня шума, поэтому концентрация получилась одинаковая (таблица 1). При использовании «GS-4» концентрация носителей немного понижается с ростом шума вследствие уменьшения высоты пиков на спектре.

Таблица 1 – Параметры глубокого уровня

Table 1 – Parameters of deep level

	1 ГУ					
	Lock-in			GS-4		
%	E , мэВ	σ_n , см ²	N_t , см ⁻³	E , мэВ	σ_n , см ²	N_t , см ⁻³
0	198	$8,5 \cdot 10^{-18}$	$1,06 \cdot 10^{14}$	190	$5,86 \cdot 10^{-18}$	$9,98 \cdot 10^{13}$
0,1	198	$8,5 \cdot 10^{-18}$	$1,06 \cdot 10^{14}$	189	$5,62 \cdot 10^{-18}$	$9,97 \cdot 10^{13}$
1	201	$1,01 \cdot 10^{-17}$	$1,06 \cdot 10^{14}$	193	$6,96 \cdot 10^{-18}$	$9,88 \cdot 10^{13}$
10	207	$1,48 \cdot 10^{-17}$	$1,06 \cdot 10^{14}$	182	$3,73 \cdot 10^{-18}$	$9,62 \cdot 10^{13}$

Площадь сечения захвата и энергия активации находятся благодаря прямой Аррениуса: изменения угла наклона линейной аппроксимации в координатах «время-обратная температура» зависят от точек, расположение которых обусловлено температурой максимумов пиков спектра. С увеличением уровня шума энергия активации отдаляется от заложенной в модельный спектр: для «Lock-in» даже был небольшой переход от 198 мэВ к 201 мэВ, то есть присутствовало «пересечение» искомой величины в 200 мэВ, хотя видно, что увеличение шума смещает энергию в сторону больших значений. Использование окна «GS-4» выдает значения энергии дальше от искомой величины, но всё ещё в пределах $2kT$.

При исследовании двух дискретных пиков с малым уровнем шума хороший результат показывают оба окна. Концентрация носителей заряда стабильна при «Lock-in» и немного изменяется при «GS-4» (таблица 2).

Таблица 2 – Параметры двух глубоких уровней

Table 2 – Parameters of two deep levels

2 ГУ						
1-й пик						
	lock-in			GS-4		
%	E , мэВ	σ_n , см ²	N_t , см ⁻³	E , мэВ	σ_n , см ²	N_t , см ⁻³
0	201	$1,03 \cdot 10^{-17}$	$1,06 \cdot 10^{14}$	191	$6,2 \cdot 10^{-18}$	$9,79 \cdot 10^{13}$
0,1	201	$1,03 \cdot 10^{-17}$	$1,06 \cdot 10^{14}$	190	$5,82 \cdot 10^{-18}$	$9,78 \cdot 10^{13}$
1	199	$9,46 \cdot 10^{-18}$	$1,06 \cdot 10^{14}$	191	$6,53 \cdot 10^{-18}$	$9,66 \cdot 10^{13}$
10	195	$7,36 \cdot 10^{-18}$	$1,07 \cdot 10^{14}$	173	$2,11 \cdot 10^{-18}$	$9,53 \cdot 10^{13}$
2-й пик						
0	223	$7,2 \cdot 10^{-19}$	$1,06 \cdot 10^{14}$	214	$5,02 \cdot 10^{-19}$	$1,01 \cdot 10^{14}$
0,1	222	$6,89 \cdot 10^{-19}$	$1,06 \cdot 10^{14}$	215	$5,21 \cdot 10^{-19}$	$1,01 \cdot 10^{14}$
1	222	$7 \cdot 10^{-19}$	$1,06 \cdot 10^{14}$	212	$4,72 \cdot 10^{-19}$	$1,01 \cdot 10^{14}$
10	229	$9,21 \cdot 10^{-19}$	$1,06 \cdot 10^{14}$	188	$1,54 \cdot 10^{-19}$	$9,02 \cdot 10^{13}$

Второй пик находится в высокотемпературной области, поэтому используемый подход с изменением только ширины окна изначально дает некое смещение [1]. Может показаться, что энергия 229 мэВ при 10 % шума более «правильная», чем 223 мэВ при 0 %, но это не так. Изначально при высоких температурах корректнее использовать метод, когда ширина окна остается постоянной, а изменяется время t_d (начало окна) [1]. Но был выбран одинаковый способ для всех случаев и всех окон, чтобы результаты не зависели от различных подходов и их можно было сравнить. Наличие второго пика начало негативно сказываться на результатах уже при 1 % шума, когда в качестве окна используется «GS-4».

Использование окна «Lock-in» не позволило разделить наложенные пики, поэтому энергия, площадь сечения и концентрация носителей заряда получились не согласованными ни с одним из заданных ГУ (2-й и 3-й ГУ). «GS-4» позволил разделить энергии всех 3-х пиков, в то время как «Lock-in» точнее определил энергию первого пика, но второй и третий пики дали суммарную информацию – получился некий усредненный пик.

Для исследования методом Laplace-DLTS из общих температурных релаксаций тока были выбраны значения, кратные 10 К. После эти данные обрабатывались с помощью программного обеспечения CONTIN, и на полученных зависимостях спектрах находились положения максимумов пиков. После построения прямой Аррениуса определены энергии активации для всех случаев моделирования (таблица 4).

Laplace-DLTS – очень чувствительный к шуму метод исследования. Уровень шума в 10 % сильно влияет на результаты: появляются сигналы от несуществующих ГУ, кроме того, правдоподобность результатов обеспечивается в относительно узком температурном интервале около 40 К.

Таблица 3 – Параметры трех глубоких уровней

Table 3 – Parameters of three deep levels

	3 ГУ					
	1-й пик					
	lock-in			GS-4		
%	E , мэВ	σ_n , см ²	N_t , см ⁻³	E , мэВ	σ_n , см ²	N_t , см ⁻³
0	203	$1,07 \cdot 10^{-17}$	$1,07 \cdot 10^{14}$	193	$6,93 \cdot 10^{-18}$	$9,32 \cdot 10^{13}$
0,1	203	$1,08 \cdot 10^{-17}$	$1,07 \cdot 10^{14}$	193	$6,93 \cdot 10^{-18}$	$9,3 \cdot 10^{13}$
1	204	$1,2 \cdot 10^{-17}$	$1,07 \cdot 10^{14}$	193	$6,77 \cdot 10^{-18}$	$9,19 \cdot 10^{13}$
10	204	$1,18 \cdot 10^{-17}$	$1,07 \cdot 10^{14}$	183	$3,81 \cdot 10^{-18}$	$9,31 \cdot 10^{13}$
	2-й пик					
0	453	$7,35 \cdot 10^{-13}$	$1,58 \cdot 10^{14}$	310	$1,37 \cdot 10^{-16}$	$1,1 \cdot 10^{14}$
0,1	453	$7,35 \cdot 10^{-13}$	$1,58 \cdot 10^{14}$	310	$1,37 \cdot 10^{-16}$	$1,1 \cdot 10^{14}$
1	453	$7,35 \cdot 10^{-13}$	$1,58 \cdot 10^{14}$	303	$1 \cdot 10^{-16}$	$1,1 \cdot 10^{14}$
10	478	$2,41 \cdot 10^{-13}$	$1,58 \cdot 10^{14}$	256	$1,16 \cdot 10^{-17}$	$1,05 \cdot 10^{14}$
	3-й пик					
0	-	-	-	229	$8,62 \cdot 10^{-19}$	$8,66 \cdot 10^{14}$
0,1	-	-	-	229	$8,62 \cdot 10^{-19}$	$8,64 \cdot 10^{14}$
1	-	-	-	228	$8,02 \cdot 10^{-19}$	$8,47 \cdot 10^{14}$
10	-	-	-	218	$5,45 \cdot 10^{-19}$	$8,9 \cdot 10^{14}$

Таблица 4 – Энергии активации, определенные с помощью Laplace-DLTS

Table 4 – Activation energies determined using Laplace-DLTS

	1 ГУ	2 ГУ		3 ГУ		
%	1-й пик	1-й пик	2-й пик	1-й пик	2-й пик	3-й пик
0	201	201	232	201	304	232
0,1	204	206	233	204	313	233
1	197	197	233	195	322	239
10	204 (98)	178	351	186	305 (199)	247

Для разложения релаксационного сигнала на экспоненты также использовались не все температурные данные, а только кратные 10 К, как и для Laplace-DLTS. Использование программного обеспечения DISCRETE выдавало одну экспоненту при 1 ГУ, две – при 2 ГУ и три

при 3 ГУ, то есть позволяет корректно идентифицировать число ГУ. При использовании значения температуры и полученных значений скорости эмиссии построены прямые Аррениуса и определены энергии активации (таблица 5).

Таблица 5 – Энергии активации, определенные с помощью программы DISCRETE

Table 5 – Activation energies determined using the DISCRETE program

	1 ГУ	2 ГУ		3 ГУ		
%	1-й пик	1-й пик	2-й пик	1-й пик	2-й пик	3-й пик
0	200	200	230	200	300	230
0,1	200	199	225	200	303	232
1	199	197	238	201	316	245
10	197	194	208	208	257	216

Разложение релаксационного сигнала на экспоненты с помощью DISCRETE показывает неплохие результаты даже при высоком уровне шума. Чем больше экспонент, тем сильнее видно влияние шума на результаты, полученные после обработки данных.

Таблица 6 – Энергии активации, определенные с помощью метода, основанного на интегральном методе анализа [12]

Table 6 – Activation energies determined using a method based on the integral analysis method [12]

	1 ГУ	2 ГУ		3 ГУ		
%	1-й пик	1-й пик	2-й пик	1-й пик	2-й пик	3-й пик
0	200	200	230	200	302	230
0,1	200	200	229	200	302	225
1	198	195	223	198	291	245
10	196	188	241	170	186	67

В таблице 6 приведены результаты использования интегрального метода, предложенного в работе [12]. В отличие от программы DISCRETE в данном методе количество экспонент необходимо задавать наперед. При уровне шума более 1 % результаты сильно отличаются от модельных (при 0 %), причем, чем больше количество ГУ, тем сильнее проявляются отличия.

Заключение

Для разделения вкладов ГУ подходит любой из рассмотренных методов при условии хорошего отношения сигнал-шум. При увеличении шума более 10 % только «Lock-in» показывает адекватные значения энергии ГУ. При этом только использование данного окна не позволило разделить два близких пика. Использование окна «GS-4» позволило разделить близкие пики и определить характеристики всех 3 ГУ, хотя значения и получились менее точные по сравнению с использованием окна «Lock-in».

Laplace-DLTS и разложение релаксационного сигнала на экспоненты дает весьма точные значения энергий ГУ при уровне шума менее 1 %. При высокой зашумленности сигнала перечисленные способы неприменимы, так как появляются артефактные данные, которые дают несопоставимые с модельными значения энергии.

Поэтому следует применять данные подходы вместе при исследовании релаксационного отклика от образцов. При визуальном подтверждении двух и более наложенных друг на друга

пиков на РСГУ-спектре необходимо получить значения тока релаксации при фиксированных температурах с большим усреднением по времени. Это необходимо для корректной работы Laplace-DLTS и метода разложения релаксационного сигнала на экспоненты, что позволит получить энергии отдельных ГУ.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № 075-15-2021-460 с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования (РЦЗМкп) в научно-образовательном центре неупорядоченных и наноструктурированных материалов и устройств на их основе (НОЦ «ННМУ») при Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. **Lang D. V.** Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors // Journal of Applied Physics. 1974. Vol. 45. Issue 7. pp. 3023-3032.
2. **Ермачихин А. В., Литвинов В. Г.** Автоматизированный измерительный комплекс токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 2. С. 118-123.
3. **Kumar Sanddep, Kumar Sugam, Katharria Y. S., Safvan C. P., Kanjilal D.** Setup for in situ deep level transient spectroscopy of semiconductors during swift heavy ion irradiation // Review of Scientific Instruments. 2008. Vol. 79. Issue 5. 056103.
4. **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.
5. **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.
6. **Вывенко О. Ф., Истратов А. А.** Оптимизация корреляционной процедуры в методах термостимулированной релаксационной спектроскопии полупроводников // ФТП. 1992. Т. 26. Вып. 10. С. 1693-1700.
7. **Денисов А. А., Лактюшкин В. Н., Садофьев Ю. Г.** Релаксационная спектроскопия глубоких уровней // Обзоры по электронной технике. 1985. Сер. 7. Вып. 15 (1141). 52 с.
8. **Istratov A. A.** The resolution limit of traditional correlation functions for deep level transient spectroscopy // Review of Scientific Instruments. 1997. Vol. 68. Issue 10. pp. 3861-3865.
9. **Istratov A. A.** New correlation procedure for the improvement of resolution of deep level transient spectroscopy of semiconductors // Journal of Applied Physics. 1997. Vol. 82. Issue 6. pp. 2965-2968.
10. **Provencher S. W.** CONTIN: A general purpose constrained regularization program for inverting noisy linear algebraic and integral equations // Computer Physics Communications. 1982. Vol. 27. Issue 3. pp. 229-242.
11. **Dobaczewski L., Peaker A.R., Bonde Nielsen K.** Laplace-transform deep-level spectroscopy: The technique and its applications to the study of point defects in semiconductors // Applied Physics Letters. 2004. V.96. P. 4689-4728.
12. **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.
13. **Берман Л. С., Лебедев А. А.** Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л.: Наука, 1981. 176 с.
14. **Трегулов В. В., Литвинов В. Г., Ермачихин А. В.** Дефекты с глубокими уровнями в полупроводниковой структуре фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии с антиотражающей пленкой пористого кремния // Письма в журнал технической физики. 2017. Т. 43. Вып. 21. С. 3-9.
15. **Вихров С. П., Вишняков Н. В., Гудзев В. В., Ермачихин А. В., Жилина Д. В., Литвинов В. Г., Маслов А. Д., Мишустин В. Г., Теруков Е. И., Титов А. С.** Исследование глубоких энергетических уровней в солнечном элементе типа НИТ // Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52. Вып. 7. С. 787-791.
16. **Трегулов В. В., Литвинов В. Г., Ермачихин А. В.** Дефекты с глубокими уровнями в фотоэлектрическом преобразователе с антиотражающей пленкой пористого кремния, сформированной окрашивающим химическим травлением // Письма в журнал технической физики. 2019. Т. 45. Вып. 4. С. 24-27.

COMPARISON OF DEEP LEVEL TRANSIENT SPECTROSCOPY METHODS OF RELAXATION CURRENT ANALYSIS

A. V. Ermachikhin, Ph.D. (Phys. and Math.), associate professor, department of Micro- and Nanoelectronics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-3808-9691, e-mail: al.erm@mail.ru

Yu. V. Vorobyov, Ph.D. (Phys. and Math.), senior researcher, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-5176-1166, e-mail: vorobjov.y.v@rsreu.ru

E. P. Trusov, postgraduate student, engineer, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-1239-2702, e-mail: eptrusov@yandex.ru

V. G. Litvinov, Dr. Sc. (Phys. and Math.), associate professor, head of department of Micro- and Nanoelectronics, leading researcher, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-6122-8525, e-mail: vglit@yandex.ru

*Three different approaches to processing of current relaxation under square-wave depletion signal are considered on the simulated data. Three different cases are considered: including 1, 2 or 3 deep levels varying signal-to-noise ratio. **The present work aims** at establishing applicability of those methods to particular experimental conditions. The Laplace-DLTS method was implemented via CONTIN software. The DISCRETE program was used to approximate the relaxation curves by the sum of exponentials. The integration method was used for this purpose as well. Classical DLTS analysis was implemented using the "Lock-in" and «GS-4» weighting methods.*

Key words: DLTS, data processing, mathematical modeling, Laplace-DLTS, CONTIN, software

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-82-207-217

References

1. **Lang D. V.** Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors. *Journal of Applied Physics*. 1974, vol. 45, issue 7, pp. 3023-3032.
2. **Ermachikhin A. V., Litvinov V. G.** An Automated Measuring System for Current Deep-Level Transient Spectroscopy. *Instruments and Experimental Techniques*. 2018, vol. 61, issue 2, pp. 277-282.
3. **Kumar Sanddep, Kumar Sugam, Katharria Y. S., Safvan C. P., Kanjilal D.** Setup for in situ deep level transient spectroscopy of semiconductors during swift heavy ion irradiation. *Review of Scientific Instruments*. 2008, vol. 79, issue 5, 056103.
4. **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.
5. **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.
6. **Vyvenko O. F., Istratov A. A.** Optimizatsiya korrelyatsionnoy protsedury v metodakh termostimulirovannoy relaksatsionnoy spektroskopii poluprovodnikov. *FTP*. 1992, vol. 26, issue. 10, pp. 1693-1700. (in Russian).
7. **Denisov A. A., Laktyushkin V. N., Sadof'ev Yu. G.** Relaksatsionnaya spektroskopiya glubokikh urovney. *Obzory po elektronnoy tekhnike*. 1985, vol. 7, issue 15 (1141). 52 p. (in Russian).
8. **Istratov A. A.** The resolution limit of traditional correlation functions for deep level transient spectroscopy. *Review of Scientific Instruments*. 1997, vol. 68, issue 10, pp. 3861-3865.
9. **Istratov A. A.** New correlation procedure for the improvement of resolution of deep level transient spectroscopy of semiconductors. *Journal of Applied Physics*. 1997, vol. 82, issue 6, pp. 2965-2968.
10. **Provencher S.W.** CONTIN: A general purpose constrained regularization program for inverting noisy linear algebraic and integral equations. *Computer Physics Communications*. 1982, vol. 27, issue 3, pp. 229-242.
11. **Dobaczewski L., Peaker A.R., Bonde Nielsen K.** Laplace-transform deep-level spectroscopy: The technique and its applications to the study of point defects in semiconductors. *Applied Physics Letters*. 2004, vol. 96, pp. 4689-4728.

12. **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.
13. **Berman L. S., Lebedev A. A.** *Yemkostnaya spektroskopiya glubokikh tsentrov v poluprovodnikakh*. Leningrad: Nauka. 1981, 176 p. (in Russian).
14. **Tregulov V. V., Litvinov V. G., Ermachikhin A. V.** Defects with deep levels in a semiconductor structure of a photoelectric converter of solar energy with an antireflection film of porous silicon. *Technical Physics Letters*. 2017, vol. 43, issue 11, pp. 955-957.
15. **Vikhrov S. P., Vishnyakov N. V., Gudzev V. V., Ermachikhin A. V., Shilina D. V., Litvinov V. G., Maslov A. D., Mishustin V. G., Terukov E. I., Titov A. S.** Study of Deep Levels in a HIT Solar Cell. *Semiconductors*. 2018, vol. 52, issue 7, pp. 926-930.
16. **Tregulov V. V., Litvinov V. G., Ermachikhin A. V.** Deep-Level Defects in a Photovoltaic Converter with an Antireflection Porous Silicon Film Formed by Chemical Stain Etching. *Technical Physics Letters*. 2019, vol. 45, issue 2, pp. 145-148.