

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС РЕЛАКСАЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ *

Рассмотрены физические основы релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) и представлено описание разработанного автоматизированного измерительно-аналитического комплекса РСГУ для экспресс-контроля параметров глубоких центров в полупроводниковых барьерных структурах.

глубокие уровни, глубокие центры, релаксация емкости, релаксация тока.

Электрически активные примеси и дефекты структуры по Шоттки, Френкелю, дислокации и т.д., как правило, образуют в запрещенной зоне полупроводника глубокие уровни и поэтому называются глубокими центрами. Причины возникновения последних в процессе производства полупроводниковых приборов и интегральных схем могут быть связаны как с используемой технологической оснасткой, материалами, так и с такими операциями, как плазмохимическое травление, ионное легирование, металлизация, диффузия и т.д. Хотя глубокие центры могут быть использованы для увеличения быстродействия интегральных схем (например, рекомбинационный центр золота в кремнии), в большинстве случаев они оказывают отрицательное влияние на стабильность электрических характеристик этих схем и прямо или косвенно связаны с отказами приборов в процессе их эксплуатации. К сожалению, до сих пор не установлена корреляция между параметрами глубоких центров и режимами технологического процесса. Более того, систематические исследования такого рода практически не ведутся, а имеющиеся в литературе отрывочные сведения об энергетическом спектре дефектов с глубокими уровнями в кремнии не позволяют однозначно судить об их природе.

Эффективным инструментом экспериментального определения параметров электрически активных глубоких уровней является подход на основе методов их релаксационной спектроскопии (РСГУ, DLTS – *Deep Level Transient Spectroscopy*) [2]. В основе РСГУ лежит измерение величины релаксации емкости перехода (емкостная РСГУ) или величины релаксации тока через переход (токовая РСГУ) с рядом заранее задаваемых постоянных времени релаксации τ_i при опустошении глубоких уровней в области пространственного заряда перехода. Причем с помощью импульсного внешнего воздействия на исследуемую структуру процесс заполнения и опустошения ловушек в данной области периодически повторяется, а совпадение времени релаксации опустошения глубоких уровней

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы»; Государственный контракт №16.552.11.7033 от 29 апреля 2011 г.

с заданными значениями τ_i достигается монотонным изменением температуры исследуемого образца. Соотношение периодичности повторения циклов заполнения – опустошения глубоких уровней и скорости изменения температуры – должно быть таким, чтобы каждый цикл проходил в условиях, близких к изотермическим.

Суть метода РСГУ иллюстрируется на рисунке 1 для случая опустошения двух ловушек основных носителей тока в области пространственного заряда перехода. На основании принципа детального равновесия скорость эмиссии электронов α_{ni} с глубокого уровня E_{ii} определяется соотношением

$$\alpha_{ni} = 1 / \tau_i = \frac{\sigma_i \langle V_n \rangle N_c}{g_i} \exp \left(- \frac{\Delta E_{ii}}{kT} \right), \quad (1)$$

где σ_i – сечение захвата носителей, $\langle V_n \rangle$ – средняя тепловая скорость электронов, N_c – эффективная плотность состояний в зоне проводимости полупроводника, ΔE_{ii} – энергия ионизации глубоких центров, g_i – коэффициент вырождения глубоких центров.

По отношению к экспоненциальному множителю предэкспоненциальный член можно считать слабо зависящим от температуры, и в координатах Аррениуса зависимость $\tau_{im}(T)$ линейна с наклоном, характеризующим величину E_{ii} . При изменении температуры образца и периодическом заполнении и опустошении глубоких центров регистрирующее устройство, настроенное на постоянную времени τ_i , фиксирует пики сигнала двух ловушек (рис. 1) соответственно при температурах T_{m1} и T_{m2} .

При настройке на постоянную времени τ_2 те же ловушки или глубокие центры проявятся при температурах T'_{m1} и T'_{m2} . Различие температур пиков для каждой ловушки при известных значениях τ_1 и τ_2 позволяет определить энергии термической активации рассматриваемых глубоких уровней.

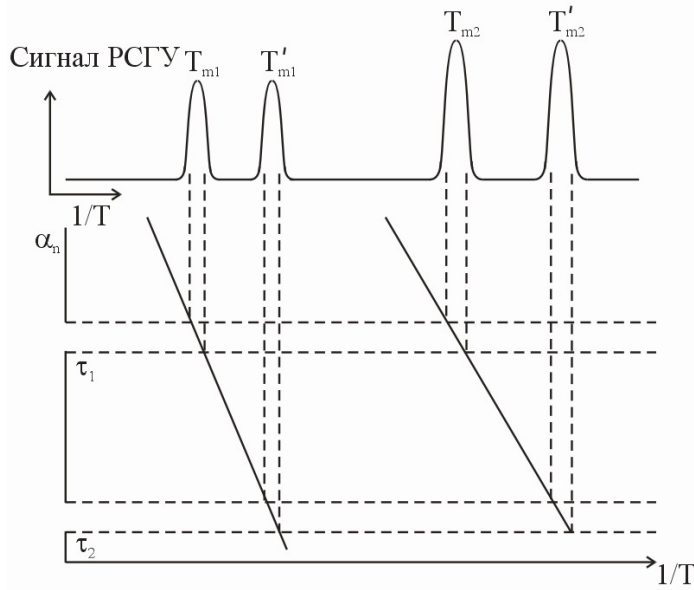


Рис. 1. Схематическая иллюстрация сущности метода РСГУ [2]

Сечения захвата носителей тока ловушками σ_i могут быть вычислены по известным величинам N_c , ΔE_{ii} и $\langle V_n \rangle$ для диапазона температур, в котором фиксируются пики глубоких уровней. Эти величины подставляются в формулу (1). Амплитуда регистрируемого сигнала связана с концентрацией глубоких уровней. Однако на величину сигнала влияет, кроме того, пространственное расположение перезаряжающихся ловушек между границами области пространственного заряда, тип ловушки, способ регистрации РСГУ, величина выбираемой постоянной времени релаксации.

Рассмотрим относительное изменение емкости перехода $[\Delta C/C]_x$, обусловленное захватом $n(x)$ электронов в интервале Δx , удаленном на расстояние x от границы раздела $p^+ - n$ -перехода (диода Шоттки, МДП-структуры): $0 < x < W$. Из уравнения Пуассона следует, что изменение напряжения, индуцированное захватом $n(x)$ электронов в окрестности точки x , равно

$$\Delta V = \frac{e}{\varepsilon} [N_{DM} \cdot W \cdot \Delta W - n(x) \cdot x \cdot \Delta x], \quad (2)$$

где N_{DM} – концентрация мелких доноров [2].

Для режима регистрации изменения емкости структуры при постоянном напряжении смещения ($\Delta V = 0$) получим

$$\left[\frac{\Delta C}{C} \right]_x = - \frac{n(x)}{N_{DM} \cdot W^2} x \Delta x. \quad (3)$$

На нижней части рисунка показаны зависимости $\alpha_n(1/T)$ для двух глубоких уровней, на верхней части – отклик РСГУ-спектрометра в двух окнах скорости эмиссии носителей из ловушек.

Отметим, что чувствительность емкости перехода к перезарядке ловушек линейно изменяется от нуля (перезарядка ловушек вблизи границы раздела переходов) до максимального значения (перезарядка ловушек на внешней границе области пространственного заряда). При емкостной РСГУ это справедливо для ловушек как основных, так и неосновных носителей тока.

При исследовании глубоких уровней по релаксации емкости перехода имеется возможность разделения сигналов ловушек основных и неосновных носителей тока, если условия заполнения этих уровней выбраны такими, что заполняются оба типа ловушек. Опустошение ловушек основных носителей тока после выключения заполняющего импульса приводит к увеличению плотности заряда в области пространственного заряда и, следовательно, к увеличению емкости перехода в процессе релаксации до равновесного состояния, определяемого величиной амплитуды опустошающего импульса (рис. 2).

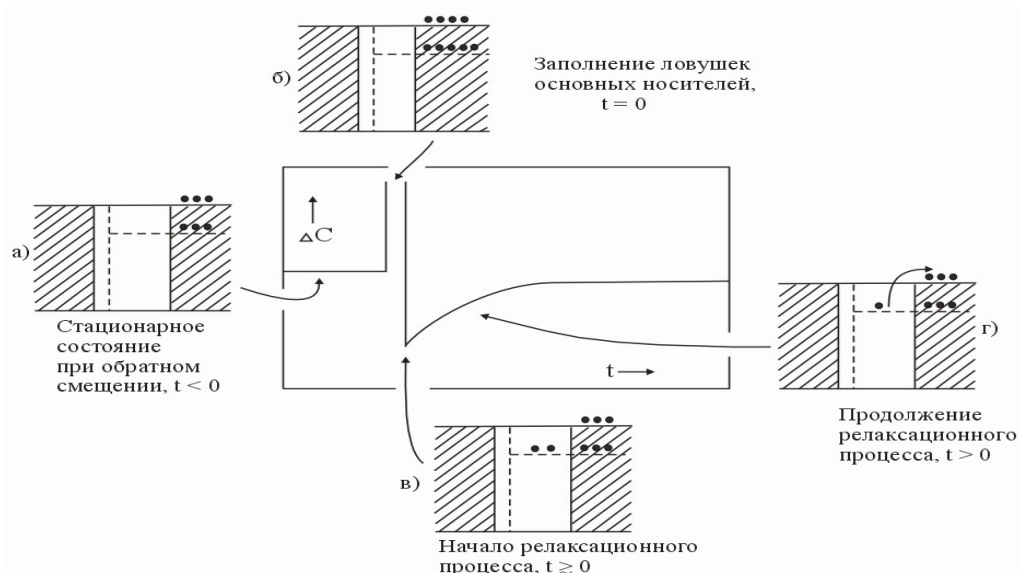


Рис. 2. Изотермическая релаксация емкости области пространственного заряда при тепловой эмиссии электронов, захваченных ловушками для основных носителей [2]

В случае опустошения ловушек неосновных носителей – ситуация обратная (рис. 3). Следовательно, сигналы емкостной РСГУ от ловушек для основных и неосновных носителей тока будут при регистрации давать пики различного знака.

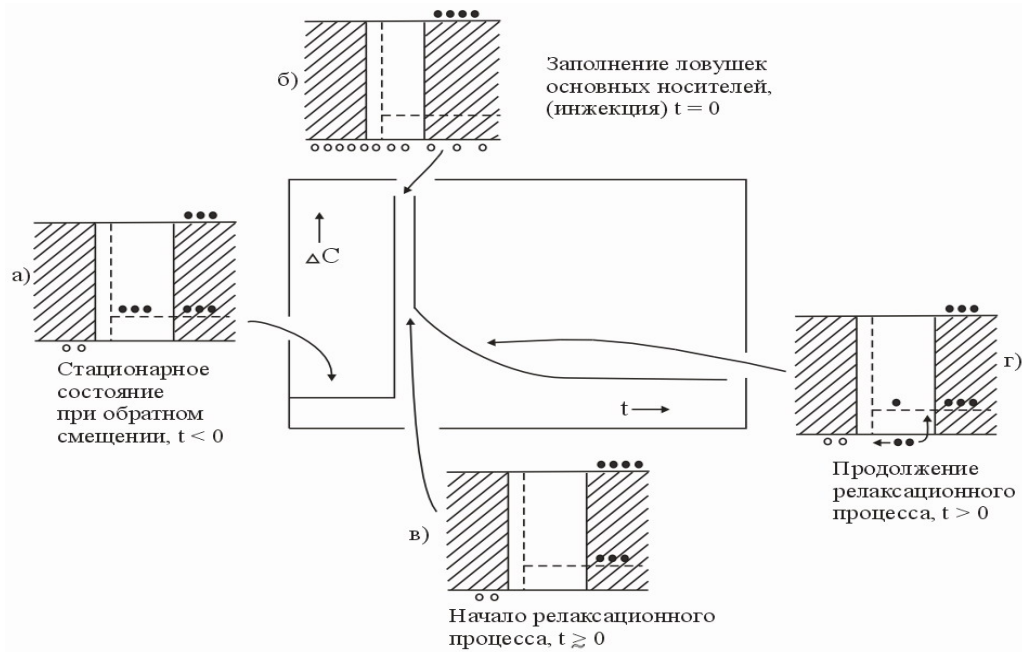


Рис. 3. Изотермическая релаксация емкости области пространственного заряда при тепловой эмиссии неосновных носителей тока из ловушек [2]

Релаксация тока через структуру вызвана выносом освободившихся носителей тока из глубоких уровней в области пространственного заряда в электронейтральные области перехода. Обозначим символом ΔQ величину заряда, обусловленного эмиссией $\Delta n(x)$ электронов из ловушек, расположенных в интервале Δx на расстоянии x от границы раздела перехода, тогда

$$\Delta Q = e \cdot A \cdot \Delta n(x) \cdot \Delta x, \quad (4)$$

где A – площадь перехода.

В случае эмиссии электронов из материала n -типа проводимости некоторая часть заряда ΔQ_+ вызывает изменение емкости перехода за счет изменения толщины области пространственного заряда:

$$\Delta Q_+ = e \cdot A \cdot N_{DM} \cdot \Delta W. \quad (5)$$

Протекающий по внешней цепи заряд ΔQ_{ext} определяется как разность ΔQ и ΔQ_+ :

$$\Delta Q_{ext} = e \cdot A \cdot \Delta n(x) \Delta x \left(1 - \frac{x}{W} \right). \quad (6)$$

При эмиссии дырок из полупроводника n -типа проводимости ситуация обратная: во внешней цепи регистрируется заряд величиной ΔQ_+ .

Таким образом, перезарядка ловушек, расположенных в интервале Δx на расстоянии x от границы раздела перехода, приведет к возникновению во внешней цепи электрического тока плотностью

$$J(x) = e \cdot \Delta x \cdot \left[\alpha_n \cdot n(x) \cdot \left(1 - \frac{x}{W} \right) + \alpha_p [N_t - n(x)] \cdot \frac{x}{W} \right], \quad (7)$$

где α_n и α_p – скорости тепловой эмиссии для электронов и дырок соответственно. Отметим, что в равновесных условиях $\alpha_n n = \alpha_p (1 - n)$ и $J(x) = 0$ [2].

Из уравнения (7) видно, что влияние пространственного расположения ловушек на величину регистрируемого сигнала для токовой и емкостной РСГУ совпадает в случае эмиссии неосновных носителей и противоположно для эмиссии основных носителей тока. С ловушек в области пространственного заряда происходит эмиссия электронов и дырок, которые движутся в противоположных направлениях, пики глубоких уровней для этих ловушек совпадают по полярности при токовой РСГУ.

Как в емкостной, так и в токовой РСГУ величина сигнала пропорциональна концентрации захваченных ловушкой электронов $n(t)$ или концентрации захваченных ловушками дырок $[N_t - n(t)]$ [2]. Временную зависимость $n(t)$ можно описать следующими соотношениями:

$$\frac{n(t)}{N_t} = \left\{ \frac{\alpha_p}{\alpha_n + \alpha_p} \left\{ 1 + \frac{\alpha_n}{\alpha_p} \exp[-(\alpha_n + \alpha_p)t] \right\} \right\} \quad (8)$$

(если до момента времени $t = 0$ ловушки для электронов (в материале n -типа) полностью заполнены),

$$\frac{n(t)}{N_t} = \left\{ \frac{\alpha_p}{\alpha_n + \alpha_p} \left\{ 1 - \frac{\alpha_n}{\alpha_p} \exp[-(\alpha_n + \alpha_p)t] \right\} \right\}, \quad (9)$$

(когда инжектирующий импульс напряжения при $t = 0$ заполняет дырочные ловушки).

Ловушки, для которых $\alpha_n \gg \alpha_p$, называют ловушками для основных носителей тока в полупроводнике n -типа проводимости и ловушками для неосновных носителей в полупроводнике p -типа. Противоположная ситуация обозначается как $\alpha_n \ll \alpha_p$.

Согласно (3) сигнал емкостной РСГУ определяется величиной $n(t)$ и, таким образом, описывается уравнениями (8), (9). Сигнал токовой РСГУ пропорционален $\alpha_n n(t)$ (для случая эмиссии электронов в материале, n -типа) (7).

Таким образом, чувствительность емкостной РСГУ не зависит от величины выбираемой постоянной времени. Чувствительность же токовой РСГУ обратно пропорциональна величине, выбранной постоянной времени. Чувствительность этих методов совпадает при величине τ на уровне 1 мс [2].

Метод РСГУ позволяет определять все основные параметры глубоких центров, расположенных в области пространственного заряда полупроводниковых структур. В отличие от других термостимулированных методов контроля параметров глубоких уровней (термостимулированные деполяризация, ток, емкость и т.д.) при РСГУ отпадает необходимость использования специальных законов повышения температуры образца, что исключает ошибку в определении параметров этих уровней, связанную с отклонениями от заданного закона нагрева.

Резкое сужение спектра регистрируемых постоянных времени за счет селекции релаксационного процесса по τ повышает разрешение и позволяет получать более достоверную информацию в случае наличия в области пространственного заряда нескольких типов глубоких центров.

Чувствительность РСГУ очень высока. При емкостной РСГУ чувствительность определяется произведением $N_{DM}\Delta C/C$. Современные высокочастотные емкостные мосты позволяют регистрировать величину $\Delta C/C$ на уровне 10^{-5} . При типичных значениях N_{DM} в полупроводниковых структурах $10^{14} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$ емкостная РСГУ обнаруживает ловушки с минимальной их концентрацией $10^9 - 10^{12} \text{ см}^{-3}$. При использовании токовой РСГУ с малыми постоянными времени ($\sim 10 \text{ мкс}$) чувствительность достигает 10^8 см^{-3} . Основным источником погрешности в оценке параметров ловушек при РСГУ является ошибка в измерении температуры образца.

Отметим еще одно достоинство РСГУ. Выше описывалась процедура определения сечения захвата ловушек по известным величинам E_{ii}, τ, T_m при опустошении ловушки. Однако процесс опустошения идет при наложении внешнего напряжения, усиливавшего собственное электрическое поле перехода, которое может привести к погрешностям в оценке величины сечения захвата. РСГУ позволяет производить независимое измерение скорости захвата носителей в ловушки при заполнении. Так как процесс заполнения ловушек проводится при небольшом внешнем напряжении смещения, можно оценить степень влияния электрического поля на величину сечения захвата, сопоставив величины, полученные в экспериментах по заполнению и по опустошению ловушек.

До недавнего времени процесс идентификации глубоких уровней при РСГУ сводился к анализу спектров и получению параметров глубоких уровней. Информация о физической природе центров, образующих эти уровни, в большинстве случаев не приводилась. Однако накопленная за годы существования метода информация о параметрах глубоких уровней и соответствующих им физических центрах, позволяет производить достаточно точную идентификацию примесей и(или) структурных несовершенств материала по данным релаксационной спектроскопии.

Разработанный автоматизированный измерительно-аналитический комплекс представляет собой устройство для реализации метода релаксационной спектроскопии глубоких уровней.

Устройство состоит из персонального компьютера, в который встроена плата сбора данных, представляющая собой многоканальный 12-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), преобразователя ток-напряжение, криостата с помещенной в него измерительной ячейкой, генератора прямоугольных

импульсов Г5-56 и устройства питания нагревательного элемента в измерительной ячейке.

С генератора прямоугольных импульсов напряжение поступает в измерительную ячейку на исследуемый образец. При этом через образец протекает ток релаксации, который попадает в преобразователь ток-напряжение и далее в персональный компьютер на вход АЦП. В криостате находится датчик температуры, сигнал с которого также поступает на вход АЦП.

Устройство питания нагревательного элемента в измерительной ячейке представляет собой управляемый источник тока.

В АЦП происходит оцифровка экспериментальных данных. Программно задается сразу несколько (более 6) моментов отсчета релаксационного тока в течение одного переходного процесса и формируется не менее 5 окон скорости эмиссии носителей заряда. Это позволяет получить информацию о величине энергии активации, концентрации и сечении захвата глубоких уровней в течение одного температурного сканирования.

Поступившие с АЦП экспериментальные данные обрабатываются с помощью специальной программы. Результатом такой обработки является информация о параметрах глубоких уровней.

Таким образом, компьютер дополнен технологией виртуальных инструментов, превративших его в универсальный прибор, с помощью которого осуществляется сбор экспериментальных данных, их анализ и обработка.

Программа позволяет вручную устанавливать количество отсчетов тока в течение одного переходного процесса, формировать вид взвешивающей функции.

Отличительной особенностью разработанной нами программы обработки сигнала РСГУ является связь программного дискриминатора и системы анализа спектров с базой данных по центрам, образующим глубокие уровни. Все это позволяет в реальном времени получать параметры глубоких уровней и одновременно идентифицировать эти уровни с физически существующими центрами.

Структура разработанной базы данных (рис. 4) позволяет производить гибкий мультипараметрический поиск как по параметрам глубоких уровней, так и по названию глубокого центра. Причем поиск в первую очередь ведется либо по названию центра, образующего глубокие уровни, либо по энергии активации с ними. Уже далее в зависимости от выполняемых задач производится выборка данных нижнего уровня (сечение захвата на глубоких уровнях, их концентрация и т.д., например, постоянные времени дискриминатора) как параметров, не отвечающих критериям однозначности. В то же время данные нижнего уровня могут активно использоваться при РСГУ, связанной не с задачей измерения параметров глубоких уровней, а с задачей контроля полупроводникового материала по заранее заданным центрам. В этом случае в алгоритм обработки релаксационного сигнала РСГУ закладывается наиболее оптимальная постоянная времени дискриминатора для заранее выбранного контроля глубоких уровней.



Рис. 4. Иерархическая структура базы данных по глубоким уровням

База данных спектрометра содержит описание около 120 видов глубоких уровней для монокристаллического кремния и имеет возможность расширения при необходимости работы с другими материалами.

Таким образом, разработанный нами спектрометр РСГУ и программное обеспечение к нему позволяют проводить как измерение параметров глубоких уровней, одновременно идентифицируя их, так и экспресс-контроль полупроводникового материала на наличие интересующих нас уровней. Кроме того, разработанное устройство постоянно совершенствуется, поскольку технология виртуальных инструментов позволяет относительно просто и быстро реализовать дополнительные инструменты, такие как емкостная спектроскопия и снятие вольт-амперных характеристик.

Техническая характеристика автоматизированного измерительно-аналитического комплекса РСГУ

Длительность исследуемых переходных процессов для токовой спектроскопии, с – $1 \cdot 10^{-5} - 1$.

Минимальная регистрируемая концентрация примеси $N_t \sim 10^{-5} \cdot (N_D - N_A)$.

Диапазон амплитуд импульсов напряжения заполнения и опустошения, В – (-10...+10).

Диапазон температур в измерительной ячейке, К – (77 – 450).

Скорость изменения температуры образца в измерительной ячейке, К/с – (0,01–0,5).

Вид взвешивающей функции – «lock-in», «double boxcar», «Hires-3», «Hires-4», «Hires-5» [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вывенко, О.Ф. Оптимизация корреляционной процедуры в методах термостимулированной релаксационной спектроскопии полупроводников [Текст] / О.Ф. Вывенко, А.А. Истратов // Физика и техника полупроводников. – 1992. – Т. 26, № 10. – С. 1693.

2. Денисов, А.А. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней. Обзоры по электронной технике [Текст] / А.А. Денисов, В.Н. Лактюшкин, Ю.Г. Садофьев // ЦНИИ «Электроника». – М., 1985. – № 15/144. – 52 с. – (Серия «Технология, организация производства и оборудование»).

3. Лабутин, А.В. Автоматизированный измерительно-аналитический комплекс токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней [Текст] / А.В. Лабутин, В.Г. Литвинов, В.И. Козловский, В.В. Гудзев, М.В. Зубков // Информационный листок о НТР / Рязанский ЦНТИ. – Рязань, 2002. – № 61-081-02. – 4 с.

V.V. Gudzev, V.G. Litvinov, M.V. Zubkov

AUTOMATIC MEASURING AND COMPUTING COMPLEX FOR DEEP-LEVEL RELAXATION SPECTROSCOPY

The article focuses on the physical laws of deep-level relaxation spectroscopy. It provides a description of an automatic measuring and computing complex for relaxation spectroscopy of deep levels in semiconductor barrier structures.

deep layers, deep centers, capacity relaxation, current relaxation.