

Аймағанбетов К.П.,  
Жолдыбаев К.С.,  
Жантуаров С.Р.,  
Рахимбаев Б.С.,  
Токмолдин Н.С.

**Реализация метода  
нестационарной  
спектроскопии глубоких  
уровней в условиях  
лабораторного эксперимента  
для студентов вузов**

В статье описывается метод нестационарной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) применительно к лабораторному эксперименту студентов, проходящих обучение по специализации в области полупроводниковых материалов и приборов в высших учебных заведениях. Данная методика применяется для исследования глубоких примесных уровней в барьерных структурах или p-n переходах. Основное преимущество данного метода заключается в его высокой чувствительности. Другими преимуществами метода являются возможность изучения процессов захвата и эмиссии носителей заряда на глубоких уровнях, исследование поведения дефектов и их природы, возможность определения параметров глубоких уровней, таких как энергия активации, сечение захвата и их концентрация, возможность определения типа ловушек. В качестве демонстрации данной методики представлены результаты измерений стандартным методом DLTS на кремниевых и германиевых диодах, полученные при помощи спектрометра DLS. На основании приведенного в статье материала возможна разработка методического пособия для лабораторных работ. Применение данной методики в обучающих условиях лабораторного эксперимента в вузах позволит студентам развить широкий спектр теоретических знаний и экспериментальных навыков в области полупроводниковой физики.

**Ключевые слова:** нестационарная спектроскопия глубоких уровней, примесь, релаксация, захват, эмиссия.

Aimaganbetov K.P.,  
Zholdybayev K.S.,  
Zhantuarov S.R.,  
Rakhimbayev B.S.,  
Tokmoldin N.S.

**Implementation of the method of  
deep level transient spectroscopy  
as a laboratory experiment for  
higher education students**

The manuscript describes the method of deep level transient spectroscopy (DLTS) as applied to the laboratory experiment for students specializing in the fields of semiconductor materials and devices at higher education institutions. The technique is employed to study deep impurity levels in barrier structures or p-n junctions. The main advantage of this method is its high sensitivity. Other advantages include the abilities to study the processes of capture and emission of charge carriers from deep level traps, to investigate the behavior of defects and their nature, to determine the parameters of deep levels such as activation energy, capture cross section and concentration, as well as to determine the type of charge carrier traps. As part of the demonstration of this technique results of the standard DLTS measurements using silicon and germanium diodes obtained using a DLS spectrometer are presented. Based on the material presented in the manuscript development of laboratory teaching aids is possible. The use of this technique as part of the laboratory experiment at higher education institutions will enable the students to develop a wide range of theoretical and experimental skills in the field of semiconductor physics.

**Key words:** deep level transient spectroscopy, impurity, relaxation, capture, emission.

Аймағанбетов К.П.,  
Жолдыбаев Қ.С.,  
Жантуаров С.Р.,  
Рахимбаев Б.С.,  
Токмолдин Н.С.

**ЖОО-ғы студенттер үшін  
зертханалық тәжірибелер  
жасау шарты ретінде терең  
деңгейлі стационарлы емес  
спектроскопия әдісін жүргізу**

Мақалада ЖОО-дағы жартылай өткізгішті материалдар мен құрылғылар саласы бойынша мамандандырылған студенттер үшін, терең деңгейлі стационарлы емес спектроскопия (DLTS) әдісін зертханалық тәжірибе ретінде қолданылуы жайлы жазылады. Осы әдістеме тосқауылды құрылымды немесе p-n өткелдегі қоспалы және терең деңгейлерді зерттеу үшін қолданылады. Бұл әдістеменің артықшылығы, оның жоғары сезімталдығы болып табылады. Сонымен қатар басқа да артықшылықтарының бірі, терең деңгейлердегі заряд тасымалдаушыларды ұстап қалу және эмиссиялау процесстерін оқып үйренуге және дефекттердің сипаттамаларымен оның табиғатын зерттеуге, терең деңгейдің параметрлерін (терең деңгейлі энергия, ұстап қалу қимасы және концентрациясы) анықтауға мүмкіндік береді. Әдістемені жүргізу кезінде кремнилі және германилі диодтарға DLS спектрометр көмегімен алынған стандартты DLTS әдісінің зерттеу нәтижелері көрсетілген. Мақалада көрсетілген негізгі ақпараттармен және зерттеу нәтижелері, зертханалық жұмыстар үшін кешенді әдістемелер жасауға мүмкіндік береді. Бұл әдістемені ЖОО-да тәжірибелік жұмыстар жүргізу ретінде қолдану, студенттердің жартылай өткізгішті физика саласы бойынша теориялық және тәжірибелік дағдыларының артуына зор үлесін қосады.

**Түйін сөздер:** терең деңгейлі стационарлы емес спектроскопия, қоспа, релаксация, ұстап қалу, эмиссия.

**РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА  
НЕСТАЦИОНАРНОЙ  
СПЕКТРОСКОПИИ  
ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ  
В УСЛОВИЯХ  
ЛАБОРАТОРНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА  
ДЛЯ СТУДЕНТОВ  
ВУЗОВ**

**Введение**

Наличие локализованных состояний в полупроводниковых материалах оказывает значительное воздействие на их электрические характеристики, такие как время жизни носителей, проводимость и т.д. Такие состояния, находящиеся в запрещенной зоне, называются «глубокими уровнями». Соответствующие этим состояниям дефекты могут быть как собственными, так и возникать под влиянием различных технологических факторов в процессе получения материала. В настоящее время для определения таких параметров глубоких уровней, как энергия активации и концентрация, широко используется метод нестационарной спектроскопии глубоких уровней НСГУ (в переводе с англ. «deep level transient spectroscopy (DLTS)»). Основное преимущество данного метода заключается в его высокой чувствительности. Кроме того, он позволяет полностью исследовать структуру запрещенной зоны полупроводника за один цикл температурного сканирования. Как правило, эта методика применяется для исследования глубоких примесных уровней в барьерных структурах или р-п переходах. В последние годы метод получил свое развитие в применении к исследованию полупроводниковых наноструктур.

Метод НСГУ впервые был предложен Д.В. Лэнгом в 1974 году. Он основан на измерении релаксации емкости полупроводниковой барьерной структуры вследствие изменения ширины области пространственного заряда, под действием импульсного изменения напряжения смещения [1].

Преимуществами данного метода являются:

- возможность изучения процессов захвата и эмиссии носителей заряда на глубоких уровнях, исследование поведения дефектов и их природы;
- возможность определения параметров глубоких уровней, таких как энергия активации, сечение захвата и их концентрация;
- возможность определения типа ловушек.

Целью данной работы является разработка подхода к внедрению данной методики в учебный курс студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям, свя-

занным с изучением полупроводниковых материалов и структур. Изучение данной методики позволит обучающимся получить более полное представление о структуре энергетических зон в полупроводниковых материалах, а также о процессах захвата и эмиссии носителей заряда в запрещенной зоне полупроводников. Внедрение данной методики в курс лабораторных занятий может основываться на первоначальном изучении обучающимися теоретического материала, связанного с природой глубоких уровней в полупроводниковых барьерных структурах, и дальнейшем проведении лабораторного эксперимента.

### Экспериментальная часть

#### Предварительные измерения

В качестве лабораторных образцов предлагаемого лабораторного эксперимента для студентов могут использоваться промышленные диоды. В данном случае, в качестве тестовых образцов выбраны выпрямительные диоды Д223А (кремниевый диод) и Д18 (германиевый диод). В таблице 1 приведены основные характеристики исследуемых диодов.

**Таблица 1** – Основные характеристики исследуемых диодов

Наименование диода	$U_{обр(max)}$ , В	$I_{max}$ , А	$C_{общая}$ , пФ
Д223А	200/230	2/50	0,75
Д18	20	1,6	0,5

#### Проведение измерений методом НСГУ

Измерения методом НСГУ проводят на DLS-спектрометре. Принципиальная блок-схема установки для проведения эксперимента приведена на Рисунке 1. Установка состоит из следующих компонентов:

##### 1. Емкостный DLS-спектрометр:

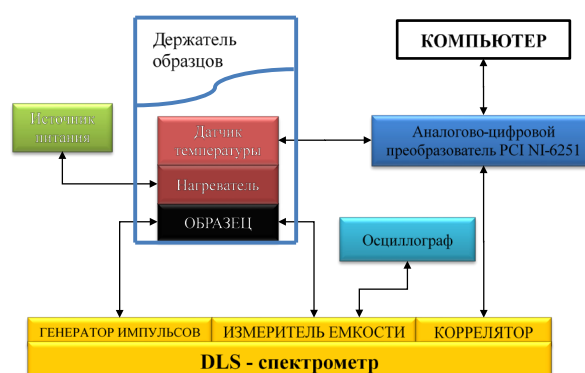
- диапазон измеряемых емкостей (1 ÷ 1000) пФ;
- временное окно измерения – 0,02 ÷ 100 мс при рабочей частоте 1 МГц;
- относительная погрешность измерения ёмкости – не более 2%;
- диапазон напряжений смещения (–10 ÷ 10) В.

##### 2. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) PCI NI-6251 (National Instruments) для

измерения релаксации емкости  $C(t)$ , подключенные к соединительному блоку SCB-68 (National Instruments) с датчиком температуры. При помощи платы PCI NI-6251 сигнал НСГУ записывается в память компьютера.

3. Держатель образцов, обеспечивающий проведение эксперимента при температурах от 77 до 350 К.

4. Осциллограф DS-1150 для наблюдения временных параметров электрических сигналов.



**Рисунок 1** – Принципиальная блок-схема измерительной установки

### Получение, обработка и анализ данных

Детальное описание метода представлено в работе [2]. Как правило, методика применяется для исследования глубоких (примесных) уровней в барьерных структурах или  $p-n$  переходах. Ширина области пространственного заряда, образующегося в  $p-n$  переходах между  $p$ - и  $n$ -областями определяется соотношением [2, 3]:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(V_k + V)}{e} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}, \quad (1)$$

где  $V_k$  – встроенный потенциал на переходе,  $V$  – приложенное извне напряжение смещения,  $N_D$  и  $N_A$  – концентрации ионизированных доноров и акцепторов в области пространственного заряда,  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $e$  – элементарный заряд.

Благодаря выравниванию уровней Ферми  $p$ - и  $n$ -областях и перетеканию свободных носителей из одной области в другую, в  $n$ -части области пространственного заряда образуется положительный заряд ионизированных доноров, а в  $p$ -части отрицательный заряд ионизированных акцепторов. При этом свободные носители (элек-

троны и дырки) в области пространственного заряда отсутствуют. При приложении к р-п переходу обратного напряжения, внешнее поле складывается с внутренним электрическим полем и приводит к расширению области пространственного заряда. При этом происходит изменение емкости р-п перехода. Емкость области пространственного заряда можно оценить, рассматривая р-п переход как плоский конденсатор, расстояние между пластинами в котором равно ширине области пространственного заряда [2, 3].

$$C = (\epsilon \epsilon_0 S) / W, \quad (2)$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $S$  – площадь перехода.

Измерения методом НСГУ проводят следующим образом: исследуемый образец укрепляется на держателе, внешний корпус держателя помещается в сосуд Дьюара с жидким азотом, и таким образом исследуемый образец охлаждается до температуры 77 К.

В держатель образцов вмонтирован резистивный нагреватель. По мере выкипания жидкого

азота при включённом нагревателе температура образца плавно меняется с течением времени от 77 до 300-350 К. Согласно ранним экспериментальным наблюдениям, желаемая скорость изменения температуры образца должна находиться в диапазоне 0,01÷0,5 К/сек [4, 5]. Температура образца контролируется при помощи термодпары, встроенной в держатель образцов.

Генератор импульсов позволяет управлять приложенным к образцу напряжением. При его включении выставляется стационарное состояние обратного напряжения ( $V = -1$  В). В ходе измерения на исследуемый образец подаются кратковременные импульсы напряжения, которые приводят к изменению ширины области пространственного заряда на р-п переходе. При этом температура образца медленно изменяется от 77 К до 350 К. В рекомендуемом варианте проведения измерений при приложении кратковременных импульсов напряжение на обкладках образца изменяется в диапазоне от 1 В до 0,1 В, как это показано на рисунке 2. Ранние работы показали, что ширина (длительность) импульса, равная 1 мс, достаточна для полного заполнения исследуемых глубоких уровней [5].

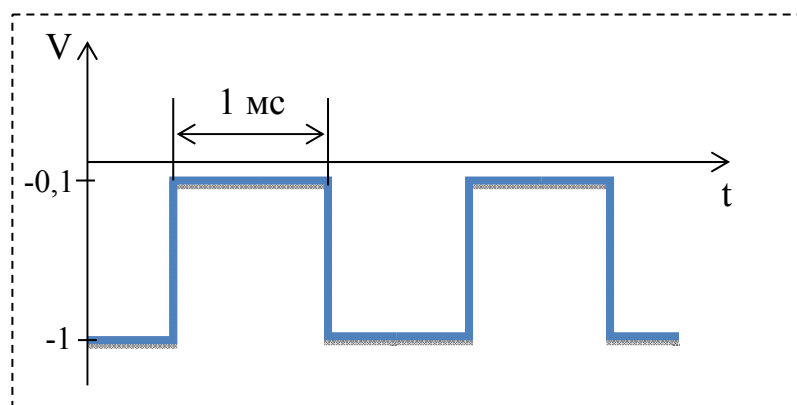


Рисунок 2 – Переключение напряжение смещения

Когда устанавливается первоначальное обратное напряжение смещения «-1В», после чего ширина области пространственного заряда начинает восстанавливается до ее первоначального значения. Свободные носители (электроны или дырки) беспрепятственно выносятся электрическим полем из области пространственного заряда. Захваченные же глубокими уровнями носители покидают область пространственного

заряда более медленно. Этот процесс называется «эмиссией» захваченных носителей в зону проводимости. Скорость эмиссии носителей заряда из глубокого уровня в зону проводимости экспоненциально зависит от температуры образца и энергии ионизации ЕГУ. Восстановление барьерной ёмкости при эмиссии захваченных глубокими уровнями носителей называют «релаксацией» ёмкости.

В случае электронной ловушки при концентрации глубоких уровней не превышающей концентрацию свободных носителей ( $N_{GU} < n$ ) наблюдается экспоненциальная релаксация емкости:

$$C(t) = \Delta C \exp(-t/\tau), \quad (3)$$

где  $N_{GU}$  – концентрация глубоких уровней;  $n$  – концентрация свободных носителей заряда;  $\Delta C$  – изменение емкости при импульсе,  $\tau$  – постоянная времени релаксации.

При подключении к измерителю DLS-спектрометра осциллографа на нем можно наблюдать вид релаксаций емкости в ходе эксперимента (см. рисунок 3).

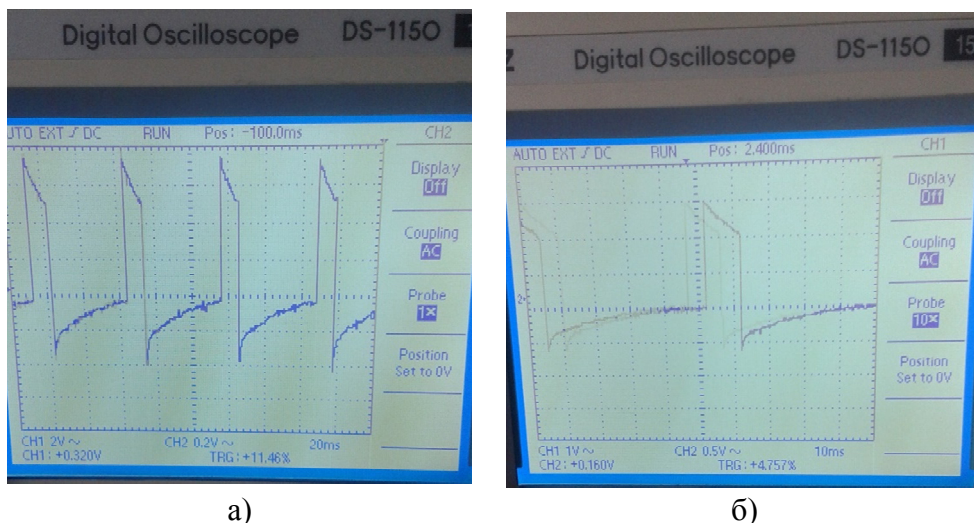


Рисунок 3 – Изображения релаксации емкости диодов, наблюдаемые на осциллографе: а) для кремниевого КД223А диода, б) для германиевого Д18 диода

Важнейшим шагом при определении параметров глубоких уровней является построение спектра НСГУ. Спектр НСГУ строится на основе кривых релаксации ёмкости и представляет собой зависи-

мость изменения емкости в определенном временном интервале  $[t_1, t_2]$  от температуры образца. На рисунке 4 показан вид спектра НСГУ применительно к захвату глубокими уровнями носителей.

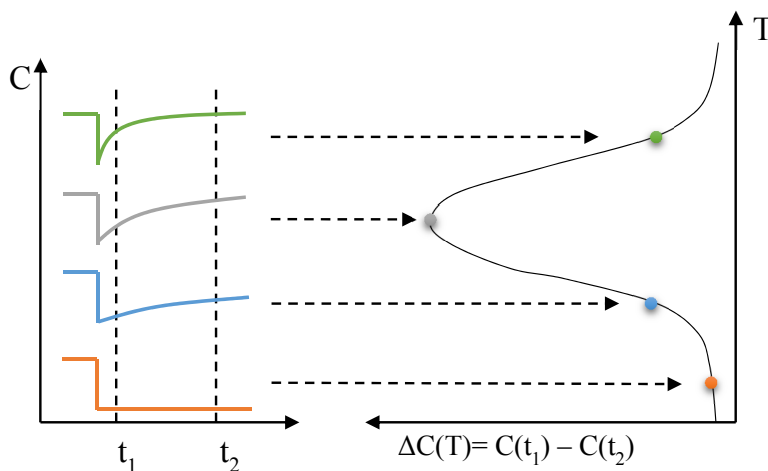


Рисунок 4 – Получение спектра НСГУ во временном интервале  $(t_2 - t_1)$  из кривых релаксации емкости для различных температур

Диапазон измерения релаксации емкости (временное окно измерения) задается и изменяется вручную. Каждая отдельная процедура измерения при изменении температуры в заданном диапазоне (температурное сканирование) проводится при определенном временном окне. В рамках работы рекомендуется проведение нескольких (5-6) температурных сканирований при разных временных окнах. Как указывалось, это позволяет получить информацию о величине энергии активации, концентрации и сечении захвата глубоких уровней.

Релаксация емкости образца регистрируется в измерителе DLS-спектрометра и далее обрабатывается в корреляторе, функционирующем как двух-

стробный интегратор сигналов (двойной Voxcar). Это позволяет усреднить сигнал для улучшения соотношения сигнал-шум и обнаружить глубокие уровни с низкой концентрацией [6]. С выхода коррелятора сигнал НСГУ поступает через соединительный блок SCB-68 на вход преобразователя PCI-NI-6251 и далее в персональный компьютер. Полученные экспериментальные данные обрабатываются при помощи интерфейса LabVIEW с получением спектров НСГУ. Сигнал датчика температуры также поступает на вход преобразователя и регистрируется в программном интерфейсе.

На рисунках 5 и 6 приведены спектры НСГУ для исследуемых кремниевого и германиевого диодов при различных временных окнах.

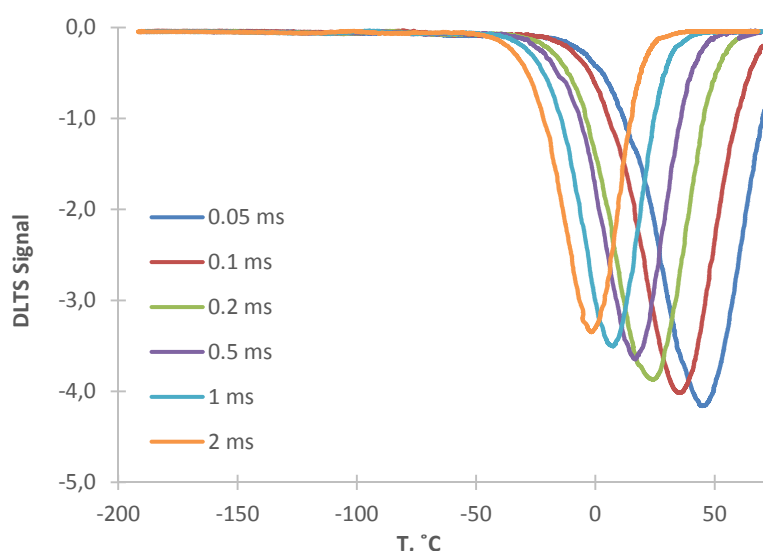


Рисунок 5 – Спектры НСГУ для кремниевого диода D223A при различных временных окнах

Каждый из наблюдаемых на спектрах пиков соответствует отдельному глубокому уровню. Далее, для каждого отдельного спектра на основании значения температуры в точке экстремума и значения временного окна, определяется точка на графике Аррениуса (см. рисунки 7 и 8).

Для определения энергии активации глубокого уровня  $\Delta E_{ГУ}$  и сечения захвата глубокого уровня  $\sigma$  используется зависимость, именуемая формулой Ричардсона для термионной эмиссии [5]:

$$e_{n,p}(T) = \frac{1}{\tau} = AT^2 \exp\left[-\frac{\Delta E_{ГУ}}{kT}\right] \quad (4)$$

при

$$A = \frac{4\sqrt{6}\sigma k^2 \pi^{3/2} m^*}{h^3} \quad (5)$$

где  $e_{n,p}$  – скорость эмиссии рассматриваемых носителей,  $\Delta E_{ГУ}$  – энергия активация глубокого уровня,  $k$  – постоянная Больцмана,  $\sigma$  – сечение захвата носителей,  $m^*$  – средняя тепловая скорость носителей.

Преобразовав вид выражения (5) получим [1, 2, 8]:

$$\ln\left(\frac{1}{\tau T^2}\right) = \ln(K\sigma) - \frac{\Delta E_{ГУ}}{kT}, \quad (6)$$

где

$$K = \frac{4\sqrt{6}k^2 \pi^{3/2} m^*}{h^3} \quad (7)$$

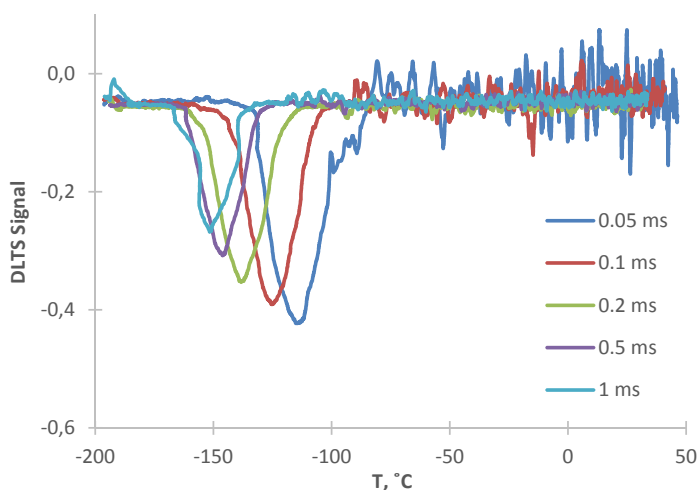


Рисунок 6 – Спектры НСГУ для германиевого диода Д18 при различных временных окнах

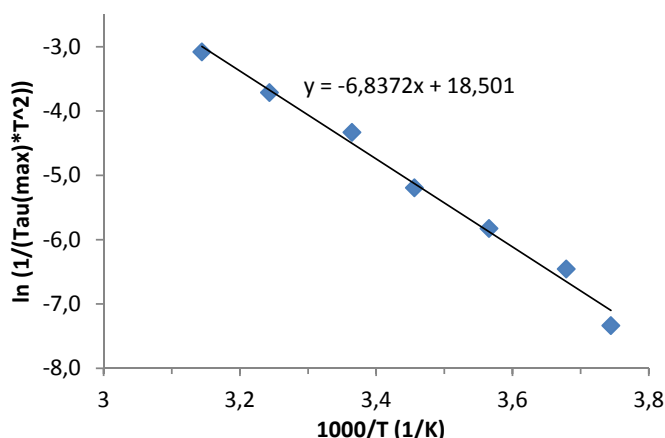


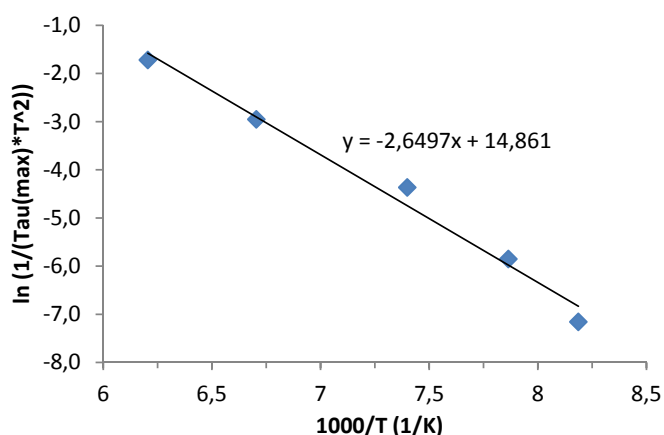
Рисунок 7 – График Аррениуса для определения основных характеристик глубоких уровней в кремниевом диоде КД223А

Выражение (6) позволяет определить энергию активации  $\Delta E_{ГУ}$  и сечение захвата носителей посредством построения графика Аррениуса в виде зависимости  $\ln(1/(\tau T^2))$  от  $1000/T$ . В этом случае тангенс угла наклона полученной прямой прямо пропорционален  $\Delta E_{ГУ}$ , а отрезок, отсекаемый полученной прямой на оси ординат, обратно пропорционален.

Из полученных графиков Аррениуса (см. рисунки 7 и 8) на основании выражения (6) можно определить энергию активации и сечение захвата наблюдаемых на спектрах НСГУ глубоких уровней. В таблице 2 представлены полученные результаты для кремниевых диода Д223А и германиевого диода Д18.

В соответствии с литературными источниками, глубокие уровни у диода Д223А могут быть образованы попавшими в Si при изготовлении полупроводникового устройства атомами Zn или их комплексами с кислородом, а у диода Д18 – атомами Cu попавшими в Ge в процессе формирования барьерного контакта [7].

Таким образом, условия проведения эксперимента и полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод, что дефекты, создающие наблюдаемые в рассматриваемых диодах глубокие уровни, локализованы. Данные дефекты работают как рекомбинационные центры, уменьшая время жизни носителей заряда и проводимость.



**Рисунок 8** – График Аррениуса для определения основных характеристик глубоких уровней в германиевом диоде Д18

**Таблица 2** – Основные параметры глубоких уровней для Д223А и Д18 диода

Параметры	Единица измерения	Диод Д223А	Диод Д18
Энергия активация	Е (eV)	0,59	0,23
Сечение захвата	$\sigma$ (см <sup>2</sup> )	$4,98 \times 10^{-13}$	$1,31 \times 10^{-14}$
Ёмкость диода (при температуре измерение от 80К до 300К)	$\Delta C$ (пФ)	0,713-0,769	0,437-0,690

В результате проведенных экспериментов, можно сделать вывод о пригодности DLS-спектрометра для исследования глубоких уровней в полупроводниковых структурах.

### Заключение

В настоящей статье приведен подход к реализации лабораторного эксперимента для студентов высших учебных заведений по применению методики нестационарной спектро-

скопии глубоких уровней к изучению полупроводниковых переходов в промышленных диодах. На основании приведенного в статье материала возможна разработка методического пособия для лабораторных работ. Мы надеемся, что применение данной методики в обучающих условиях лабораторного эксперимента в вузах позволит студентам развить широкий спектр теоретических знаний и экспериментальных навыков в области полупроводниковой физики.

### Литература

- 1 Берман Л.С., Лебедев А.А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. – Л.: Наука, 1981. – 176 с.
- 2 Lang D.V. Deep level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors // J. Appl. Phys. – 1974. – Vol. 45.
- 3 Булярский С.В., Грушко Н.В. Генерационно-рекомбинационные процессы в активных элементах. – М.: МГУ, 1995. – 391 с.
- 4 Boddaert X., Letartle X., Stevenard D., Bourgouin J. Thermal stability of EL2 in GaAs. // Add. Mater., Process and Devices III-V Compound Semicond.: Symp., Boston, Nov. 28-Dec. 2, 1988. – 1989. – Pittsbur. – P. 3-8.
- 5 Von Bardeleben H., Bourgouin J., Stevenard D., Lannoo M. On the metastable state of EL2 in GaAs. // Gallium arsenide and relat. compounds: Proc. 14th Int. Symp. Heraclion 28 Sept.-10 Oct. 1987. – 1988. – P. 399-452.



- 6 Литвинов В.Г. Автоматизированный измерительно-аналитический комплекс токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней. – Рязань: Рязанское ЦНТИ, информационный листок о НТР № 61-081-02. – 2002. – 4 с.
- 7 Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х т. / Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – Т. 1. – 456 с.

#### References

- 1 L.S. Berman, A.A. Lebedev *Emkostnaya spektroskopiya glubokikh tsentrov v poluprovodnikakh*. – L.: Nauka, 1981, 176 p. (in russ.)
- 2 D.V. Lang, *J. Appl. Phys.*, 45, (1974).
- 3 S.V. Bulyarskiy, N.V. Grushko *Generatsionno-rekombinatsionnye protsessy v aktivnykh elementakh*. – М.: MGU, 1995, 391 s. (in russ.)
- 4 X. Boddaert, X. Letartle, D. Stevenard, J. Bourgouin, *Add. Mater., Process and Devices III-V Compound Semicond.: Symp.*, Boston, Nov. 28-Dec. 2, 1988, Pittsbur, 3-8, (1989).
- 5 H. Von Bardeleben, J. Bourgouin, D. Stevenard, M. Lannoo, *Gallium arsenide and relat. compounds: Proc. 14th Int. Symp. Heraclion 28 Sept.-10 Oct. 1987*, 399-452, (1988).
- 6 V.G. Litvinov *Avtomatizirovannyi izmeritel'no-analiticheskiy kompleks tokovoi relaksatsionnoi spektroskopii glubokih urovnei*. – Ryazan:' Ryazanskoye TsNTI, informatsionnyi listok o NTR No. 61-081-02, 2002, 4p. (in russ.)
- 7 S.M. Zi *Phizika poluprovodnikovykh priborov. V 2-kh t.*, М.: Mir, 1984, 1. 456.