

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И  
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра электронных приборов (ЭП)

**ИЗМЕРЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКА  
МЕТОДОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО СКАНИРОВАНИЯ**

Отчет по лабораторной работе  
по дисциплине «Основы оптоэлектроники»

Выполнили

Студенты группы 151

\_\_\_\_\_ Ооржак Д.Б.

\_\_\_\_\_ Новосёлов А.А.

\_\_\_\_\_ Стрюков С.А.

Проверил

Профессор кафедры ЭП,

\_\_\_\_\_ В.Н. Давыдов

Томск 2023

## **1 ВВЕДЕНИЕ**

Целью данной работы является ознакомление студентов с общим подходом к определению фундаментальных параметров полупроводниковых материалов, а также экспериментальное определение ширины запрещенной зоны полупроводников различного физико-химического состава методом температурного сканирования (методом экстракции неосновных носителей заряда).

## 2 ТЕОРИТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Равновесная концентрация собственных носителей заряда в полупроводнике зависит только от ширины запрещенной зоны  $\Delta E_g$  и температуры  $T$ :

$$n_i = (N_C N_V)^{\frac{1}{2}} i e^{\frac{-\Delta E_g}{2kT}} \quad (1)$$

где  $N_C$ ,  $N_V$  - эффективные плотности квантовых состояний в зоне проводимости и валентной зоне, соответственно;  $k$  - постоянная Больцмана.

Поэтому с высокой степенью точности можно считать, что

$$I_{об} \approx A * e^{\frac{-\Delta E_g}{kT}} \quad (2)$$

где  $A$  - почти не зависящая от температуры константа материала.

Исходя из этого выражения, можно предложить методику экспериментального определения ширины запрещенной зоны. Для этого прологарифмируем выражение (2):

$$\ln(I_{об}) = \ln(A) - \frac{\frac{\Delta E_g}{k} * 1}{T} \quad (3)$$

Сравнив его с уравнением прямой  $y = a - b \cdot x$ , видим, что построенная в логарифмическом масштабе зависимость обратного тока от температуры (3) будет иметь вид наклонной прямой с углом наклона, пропорциональным ширине запрещенной зоны

$b = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta E_g}{k}$ , где  $\alpha$  - угол наклона прямой к оси абсцисс (рис.1). Однако на практике

брать в качестве независимой переменной  $x = \frac{1}{T}$  неудобно, т.к. получающиеся при этом ее численные значения будут меньше единицы и дробными.

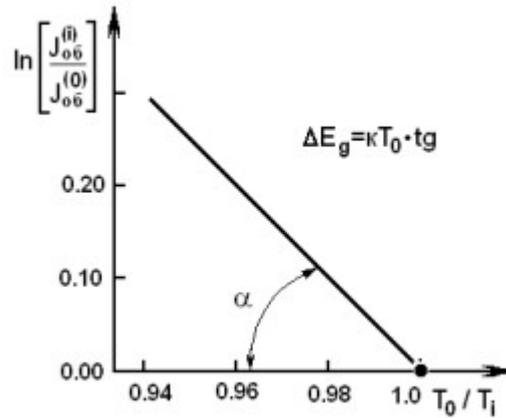


Рисунок 1. Вычисления угла наклона зависимости обратного тока от обратной температуры

Поэтому предлагается выражение (2) видоизменить, умножив и разделив второе слагаемое правой части на начальную температуру  $T_0$ . Тогда

$$i(I_{об}) = i(A) - \frac{\frac{\Delta E_g}{k} * T_0}{T} \quad (4)$$

Теперь в качестве независимой переменной выступает нормированная температура, а тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс будет равен:

$$b = tg\alpha = \frac{\Delta E_g}{k T_0} \quad (5)$$

Таким образом, для того, чтобы определить ширину запрещенной зоны полупроводника необходимо установить температуру р-п перехода и измерить величину его обратного тока. Повторив этот эксперимент для нескольких температур, строим зависимость логарифма обратного тока от нормированной температуры. Неизбежный разброс экспериментальных точек на графике сглаживают прямой линией, максимально приближенной к экспериментальным точкам. Затем по полученному графику вычисляют значение тангенса угла наклона прямой линии к оси абсцисс и по выражению (2) вычисляют значение ширины запрещенной зоны исследованного р-п перехода:

$$\Delta E_g = k \frac{T_0 * \Delta(i(I_{об}))}{\Delta(T_0/T)} \quad (3)$$

Следующий вопрос – как экспериментально измерить требуемые параметры: обратный ток и температуру р-п перехода? Температуру можно измерить с высокой

точностью, используя термопару двух металлов, например, «медь - константан», которая дает линейную зависимость контактной разности потенциалов (КРП) термопары от ее температуры. Значительно сложнее вопрос о точном измерении обратного тока. Дело в том, что реальных полупроводниковых р-п переходах обратный ток с увеличением обратного напряжения не остается постоянным, как это предсказывает теория, а монотонно увеличивается (см. рис.1). Причины увеличения тока таковы: генерация электронно-дырочных пар в пределах обедненной части р-п перехода Рисунок 4 – Вычисление угла наклона зависимости обратного тока от обратной температуры 12 примесями, утечки по поверхности р-п перехода и т.д. Поэтому встает вопрос - как из измеренной ВАХ найти обратный ток  $I_{об}$ . Для этого предлагается координатную систему экспериментальной ВАХ повернуть вокруг начала координат против часовой стрелки так, чтобы ВАХ в

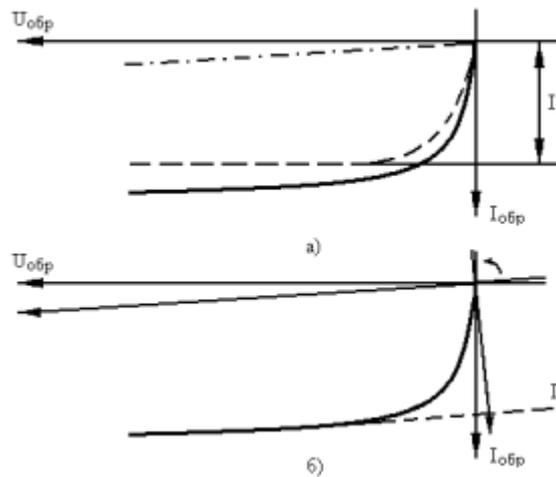


Рисунок 2 – Определение величины обратного тока поворотом системы координат

области запертых напряжений стала параллельной новой оси абсцисс. При этом ось токов, оставаясь перпендикулярной новой оси напряжений, также повернется вокруг начала координат. Поэтому отсчет значения тока насыщения следует производить по оси ординат, также повернутой относительно исходных координат. Эта операция выполняется для каждого значения температуры  $T$ , получая тем самым зависимость обратного тока от температуры  $I_{об} = f(T)$ . По полученным для разных температур величинам обратных токов строят зависимость  $\ln(I_{об}) = \varphi(T_0/T)$ . При этом полученные экспериментальные точки следует аппроксимировать прямой линией, даже если точки не ложатся на прямую. Для этого используют вычисление тангенс угла наклона прямой линии по линии по методу наименьших квадратов по формуле:

$$tg\alpha = \frac{n \sum_1^n x_i * y_i - \sum_1^n x_i * \sum_1^n y_i}{n \sum_1^n x_i^2 - \left( \sum_1^n x_i \right)^2} \quad (10)$$

где n – число экспериментальных точек;  $x_i$  и  $y_i$  – абсцисса и ордината каждой экспериментальной точки; i – индекс принадлежности экспериментальных точек к значению температуры.

### 3 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для проведения экспериментов используются р-п переходы германиевых и кремниевых полупроводниковых диодов. При подаче обратного напряжения на диод наибольшим сопротивлением в цепи является сопротивление обратного смещенного диода. Поэтому при измерении обратной ветви ВАХ можно пренебречь падением напряжения на омических контактах, базе диода и считать напряжение источника питания приложенным к обедненной части р-п перехода. Исследуемый диод включен в измерительную цепь по схеме (рис.3) и помещен в термостатированную печь с измеряемой температурой. Температуру печи можно менять от меньшего значения к большему значению. После каждого изменения мощности нагревателя в печи необходимо выждать некоторое время для растекания температуры от нагревателя по элементам печи и схемы измерения температуры, в течение которого устанавливается ее равновесное значение.

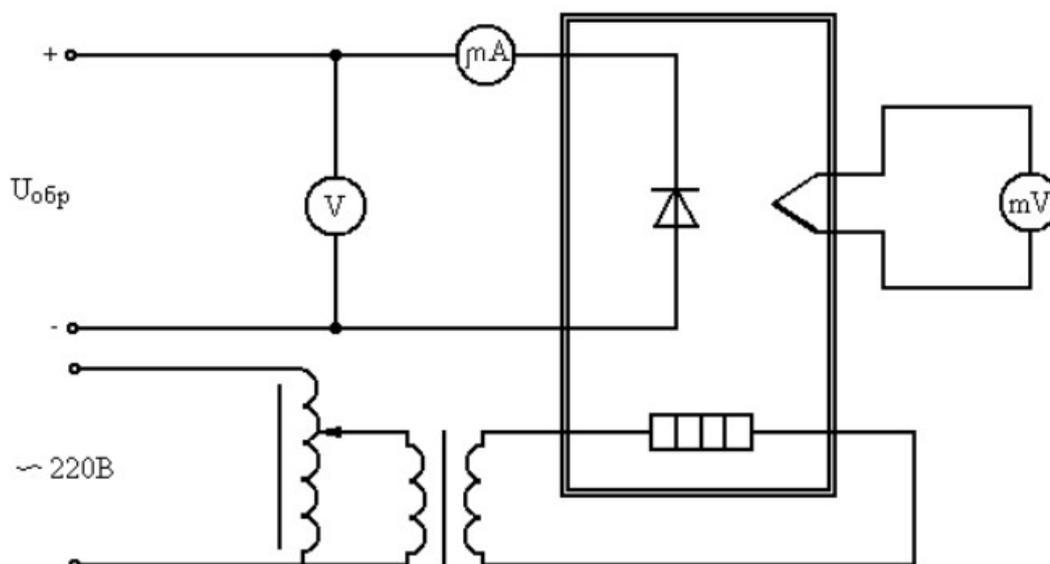


Рисунок 3 - Схема экспериментального измерения температурной зависимости обратного тока диода

Для каждого диода снимается ВАХ обратного включения перехода при фиксированном значении температуры. При фиксированной температуре снимаются ВАХ всех, определенных для исследования диодов, затем меняются температура и опять снимаются ВАХ диодов. Для каждого диода проводится графическое построение ВАХ при различных температурах на одном графике, находятся значения тока насыщения при всех температурах.

После для каждого диода строится зависимость в относительных единицах

$$i \left( \frac{I_{0i}}{I_{00}} \right) = f \left( \frac{T_0}{T_i} \right)$$

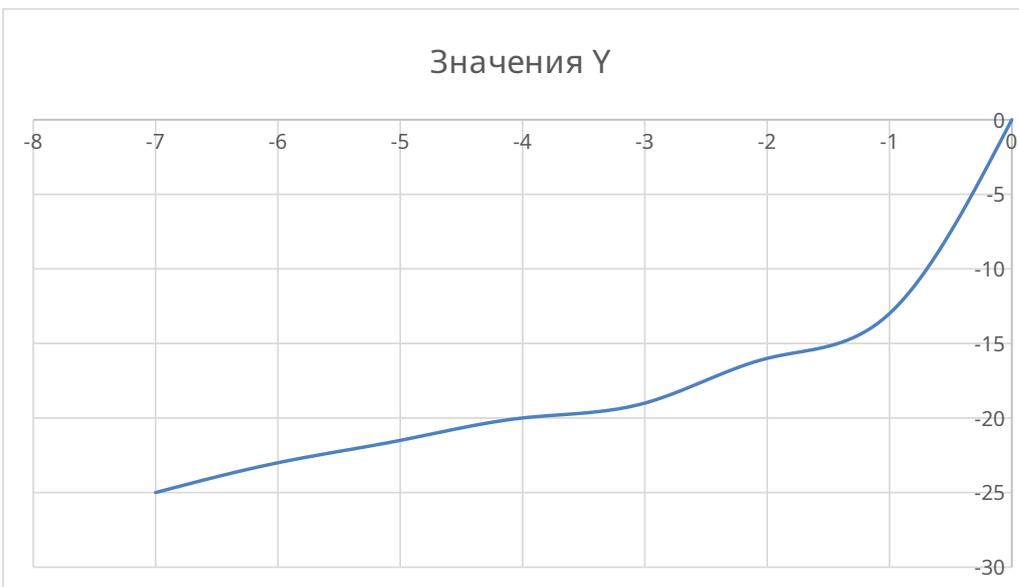
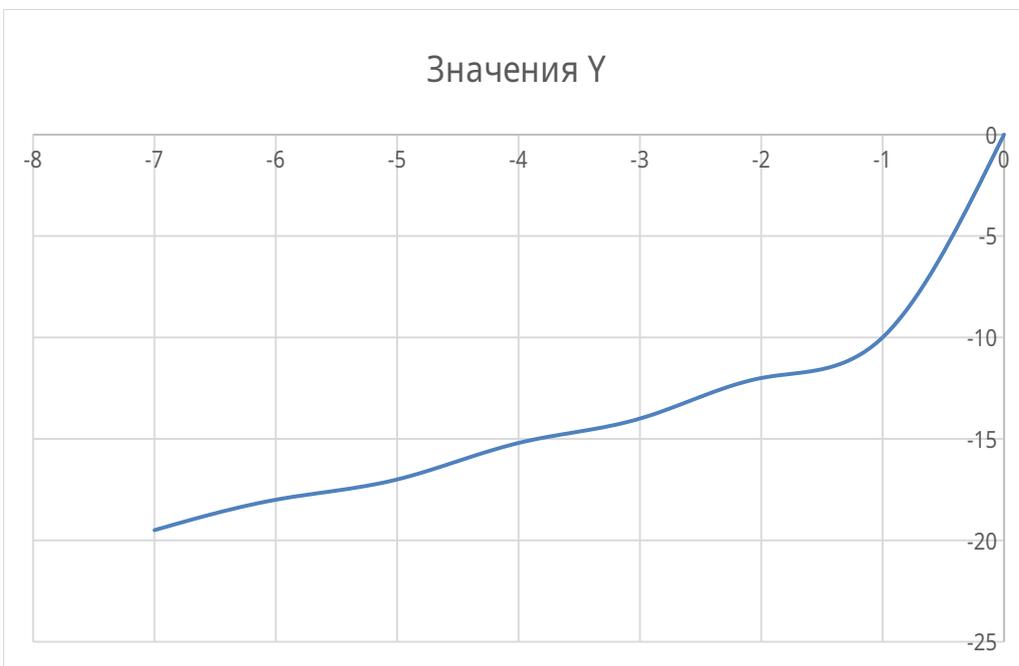
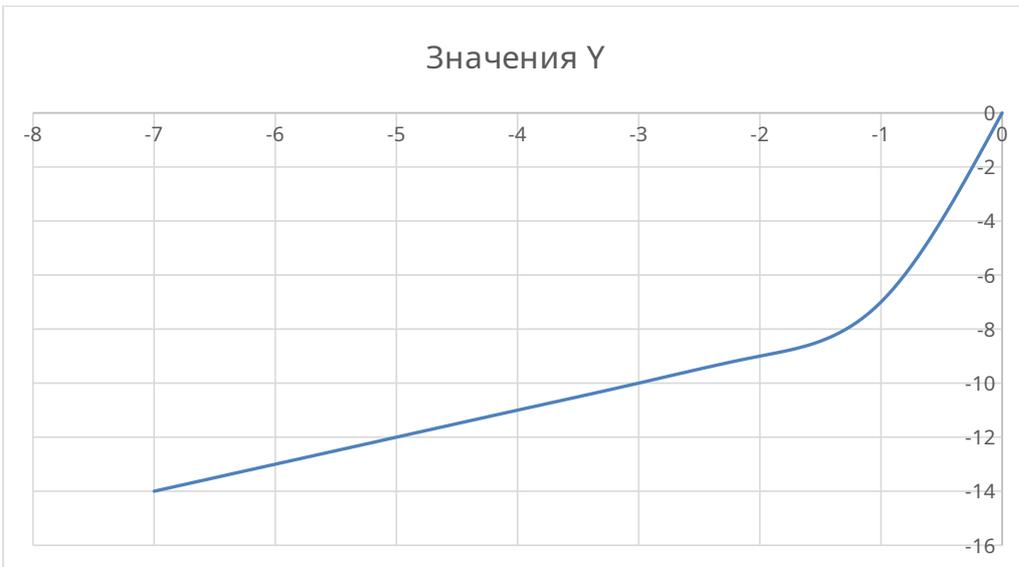
где  $T_0$  – температура при проведении первого эксперимента (без нагрева);  $T_i$  – температуры проведения последующих экспериментов (с нагревом);  $I_{00}$  - обратный ток при температуре  $T_0$ ;  $I_{0i}$  – обратный ток диода при других значениях температуры.

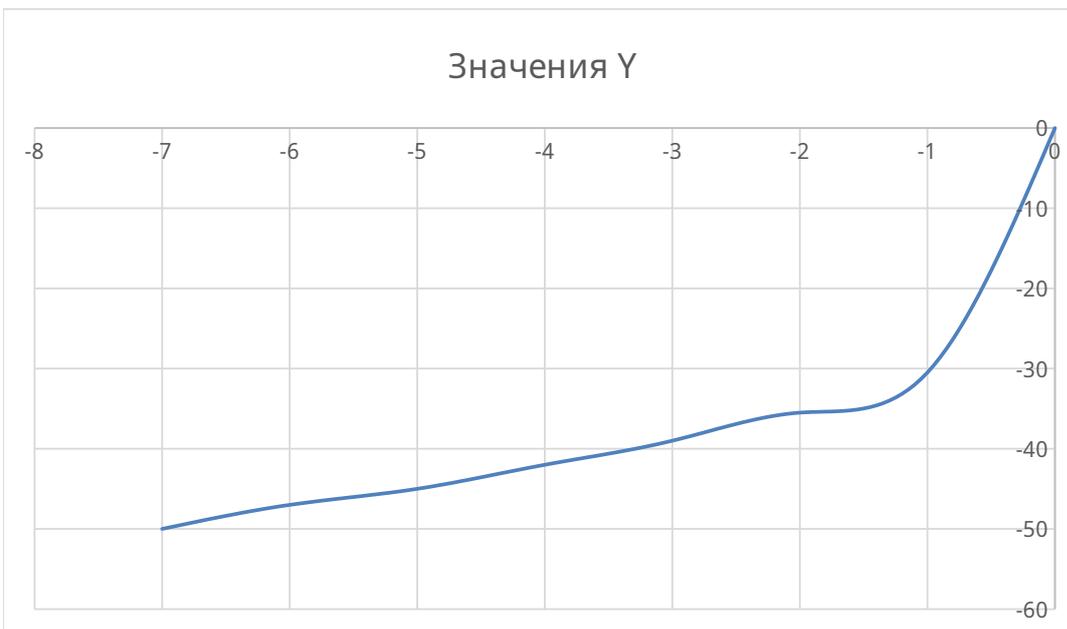
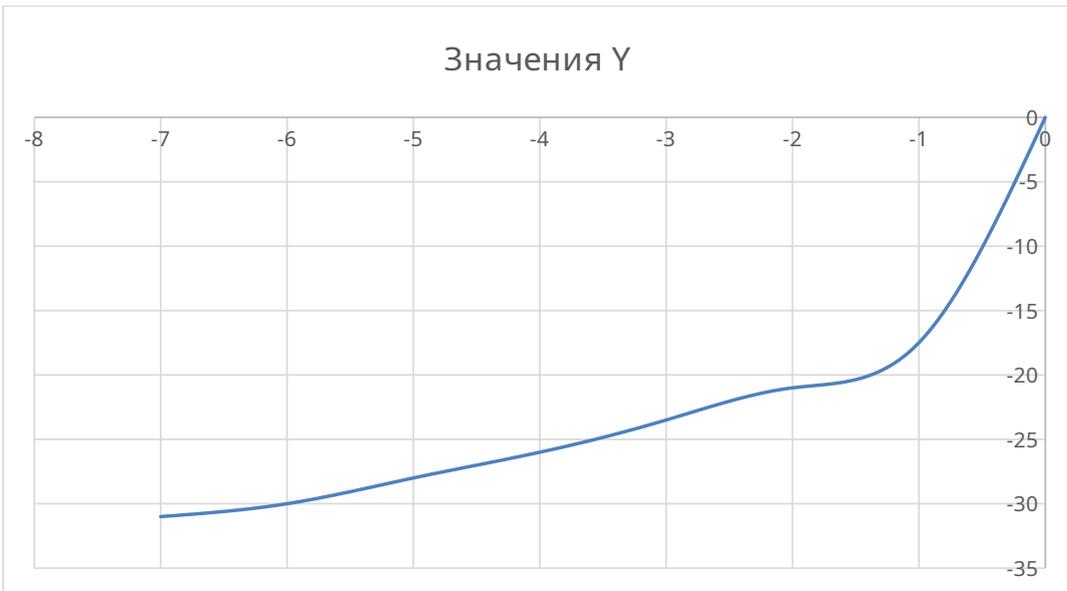
#### 4 ЭКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Сняли зависимости  $I_{об} = f(V)$ . Экспериментальные данные занесли в таблицу 1 и таблицу 2.

Таблица 1. ВАХ диода D2E

$T_1 = 27,5$ К		$T_2 =$ 32,5К		$T_3 =$ 37,5К		$T_4 =$ 42,5К		$T_5 =$ 47,5К		$T_6 =$ 52,5К		$T_7 = 57,5$ К		$\frac{T_1}{T_7}$	$ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$
$U_{об}$ р,В	$I_{обр,}$ мк А	$U_{об}$ р,В	$I_{обр,}$ мк А	$U_{об}$ р,В	$I_{обр,}$ мк А	$U_{об}$ р,В	$I_{обр,}$ мк А	$U_{об}$ р,В	$I_{обр,}$ мк А	$U_{об}$ р,В	$I_{обр,}$ мк А	$U_{об}$ р,В	$I_{обр,}$ мк А	0,	
1	7	1	10	1	13	1	17,	1	23	1	30,	1	37	47	
							5				5			8	
2	9	2	12	2	16	2	21	2	27	2	35,	2	42		
											5				
3	10	3	14	3	19	3	23,	3	30	3	39	3	48		
							5								
4	11	4	15,	4	20	4	26	4	32,	4	42	4	51		
			2						5						
5	12	5	17	5	21,	5	28	5	35	5	45	5	54		
					5										
6	13	6	18	6	23	6	30	6	37	6	47	6	58		
7	14	7	19,	7	25	7	31	7	39	7	50	7	60		
			5												
$I_{ST1} =$		$I_{ST2} =$		$I_{ST3} =$		$I_{ST4} =$		$I_{ST5} =$		$I_{ST6} =$		$I_{ST7} =$			





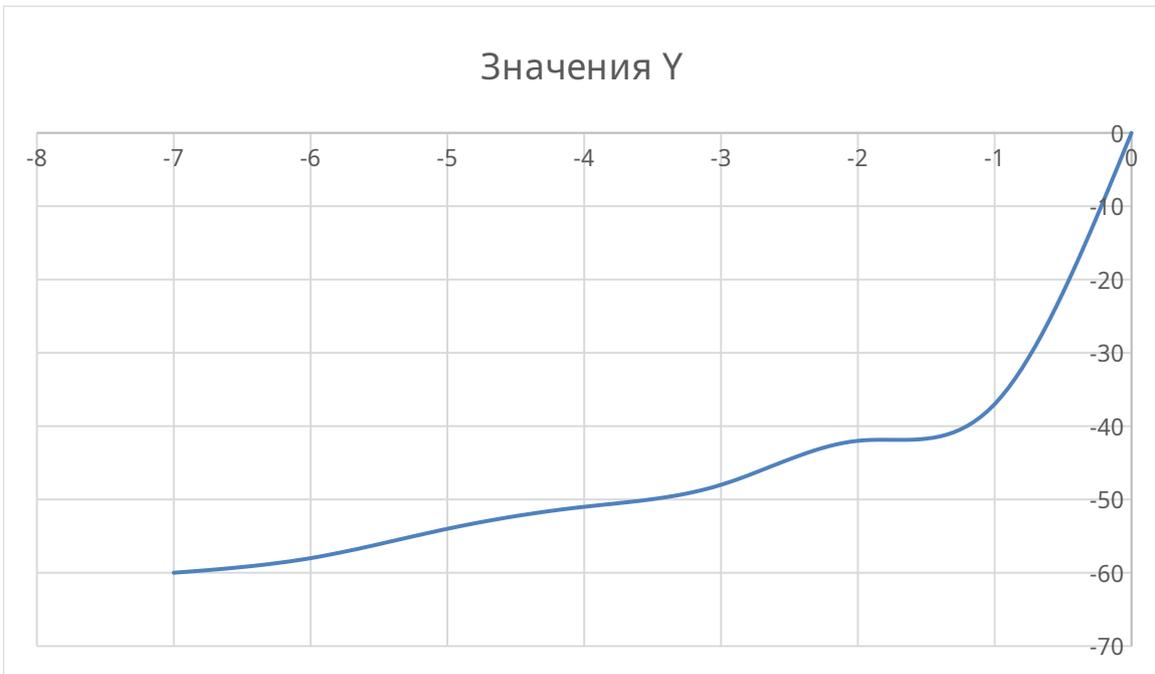
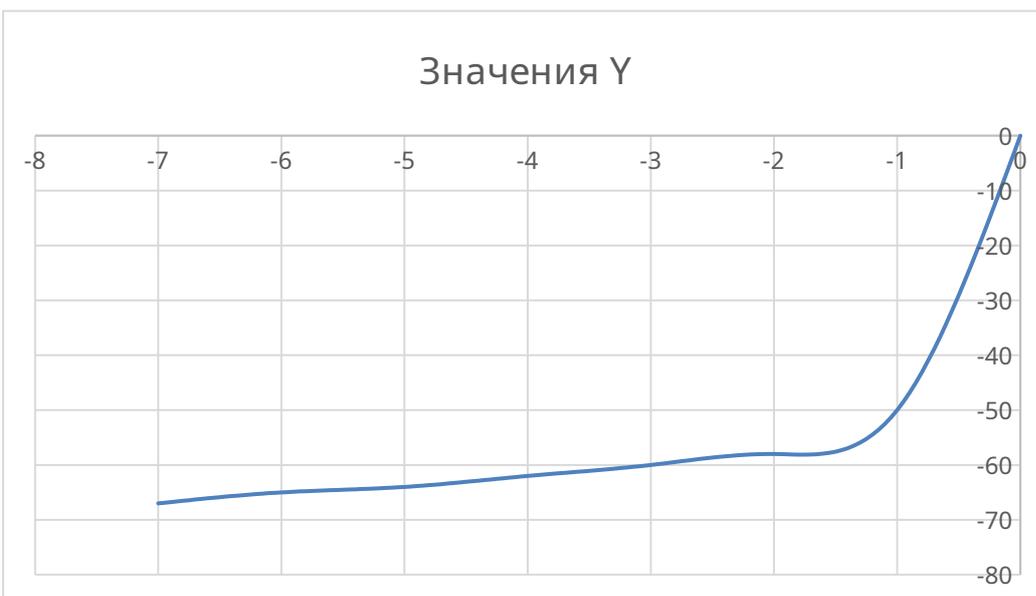
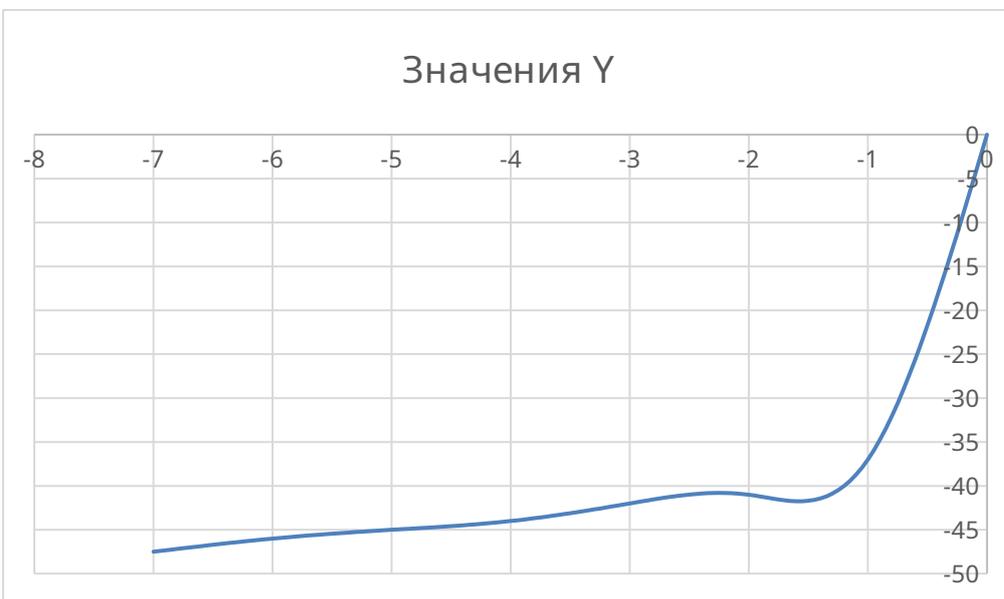
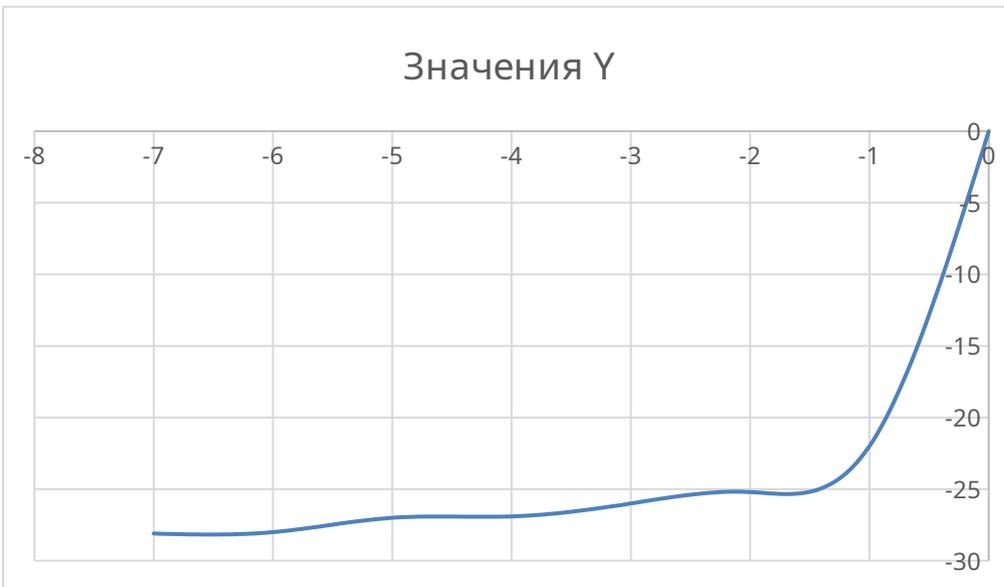
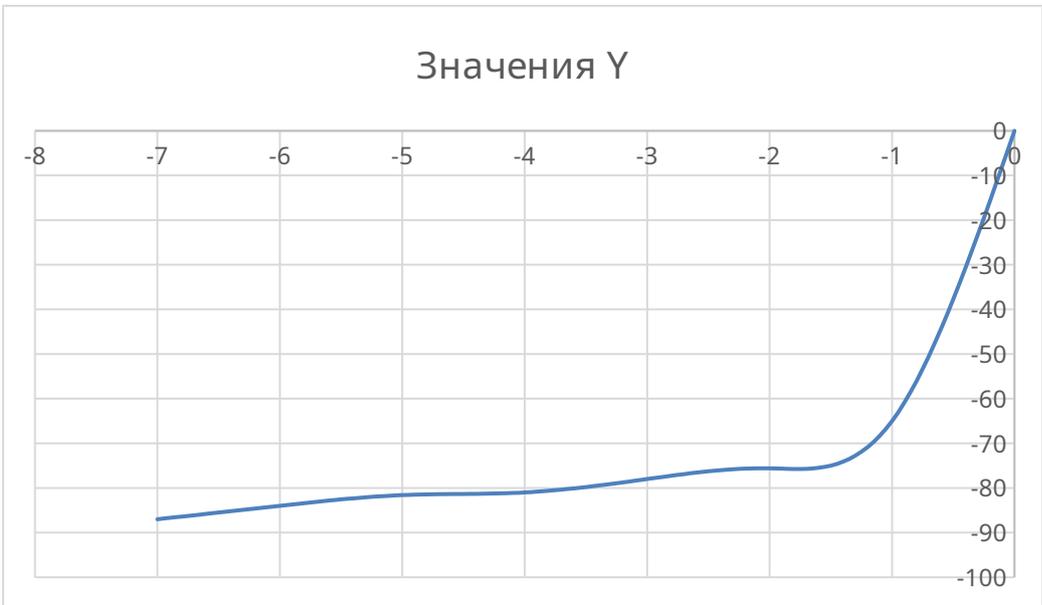
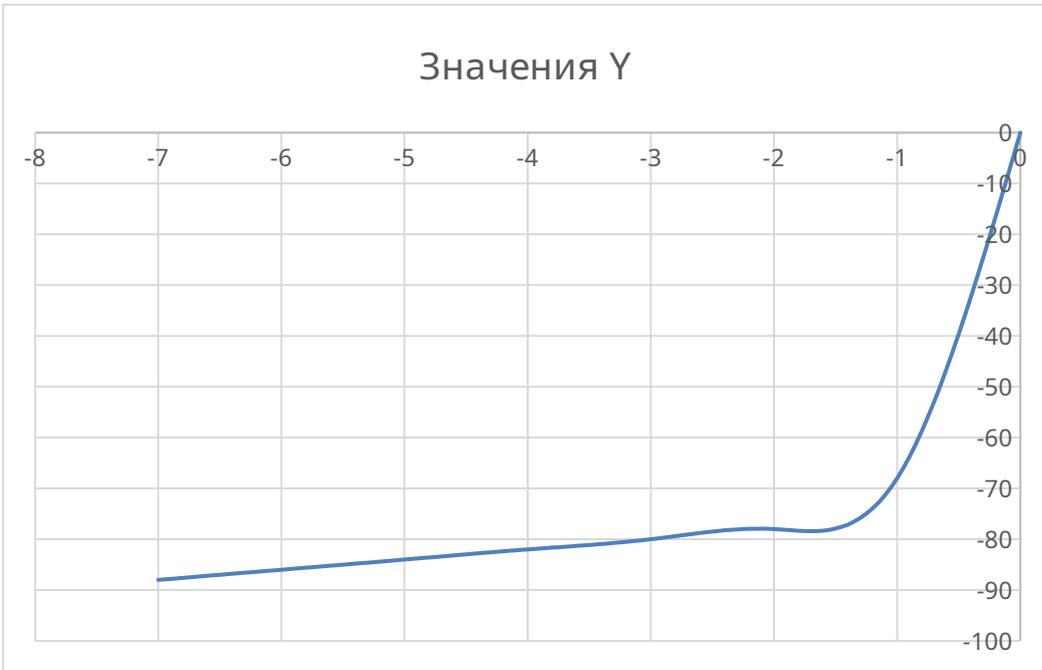
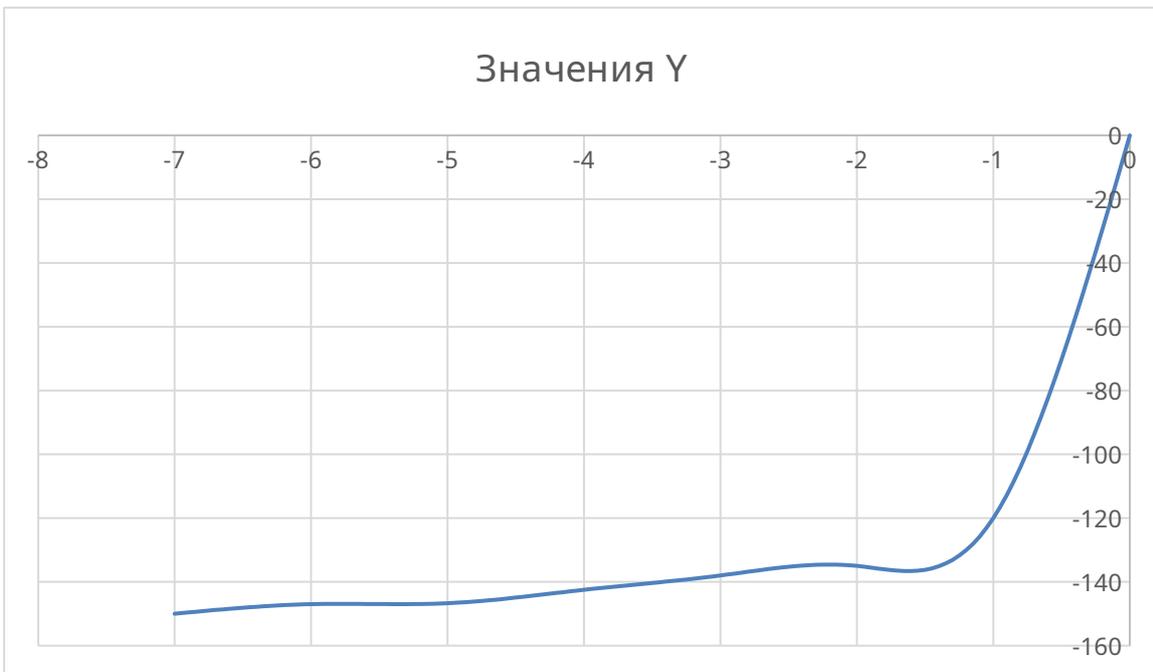
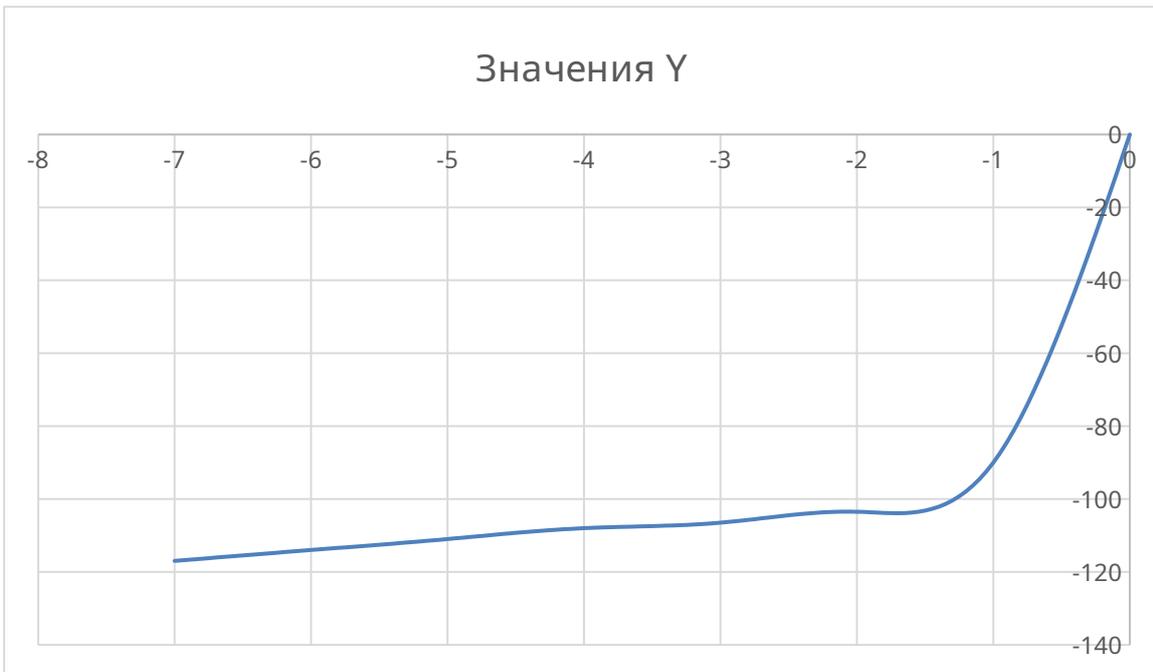


Таблица 2. ВАХ диода D7D

T <sub>1</sub> = 27,5 К		T <sub>2</sub> = 32,5К		T <sub>3</sub> = 37,5К		T <sub>4</sub> = 42,5К		T <sub>5</sub> = 47,5К		T <sub>6</sub> = 52,5К		T <sub>7</sub> = 57,5 К		$\frac{T_1}{T_7}$	$I n \left( \frac{I}{I_1} \right)$
I <sub>обр,</sub> мк А	U <sub>об</sub> р,В	I <sub>обр,</sub> мк А	I <sub>обр,</sub> мк А	U <sub>об</sub> р,В	I <sub>обр,</sub> мк А	U <sub>об</sub> р,В	I <sub>обр,</sub> мк А	U <sub>об</sub> р,В	I <sub>обр,</sub> мк А						
24,5	1	39	1	56	1	74	1	75	24,5	1	39	1	56	1	74
25,2	2	41	2	58	2	78	2	75,6	25,2	2	41	2	58	2	78
26	3	42	3	60	3	80	3	78	26	3	42	3	60	3	80
26,9	4	44	4	62	4	82	4	81	26,9	4	44	4	62	4	82
27	5	45	5	64	5	84	5	81,6	27	5	45	5	64	5	84
28	6	46	6	65	6	86	6	84	28	6	46	6	65	6	86
28,1	7	47,5	7	67	7	88	7	87	28,1	7	47,5	7	67	7	88
$I_{ST1} =$		$I_{ST2} =$		$I_{ST3} =$		$I_{ST4} =$		$I_{ST5} =$		$I_{ST6} =$		$I_{ST7} =$			







3. Найти, описанным выше методом экстраполяции, для каждого значения температуры величину тока насыщения  $IST_i$  и занести в таблицу.
4. Вычислить величины  $T1/T_i$  и  $\ln(IST_i / IST_1)$  и занести в таблицу для ВАХ диодов при различных температурах.
5. Для каждого диода в осях  $T1/T_i$  и  $\ln(IST_i / IST_1)$  нанести экспериментальные точки. Через полученные точки провести прямую линию, максимально приближенную ко всем экспериментальным точкам.
6. Обработать экспериментальные данные методом наименьших квадратов. Вычислить угловой коэффициент для каждой прямой.
7. Вычислить ширину запрещенной зоны исследуемых полупроводников.

## 5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы ознакомились с общим подходом к определению фундаментальных параметров полупроводниковых материалов. К таким параметрам относятся ширина запрещенной зоны, энергетическое положение и концентрация примесей в нем, энергетическое распределение концентрации электронных состояний в хвостах энергетических, а также энергетическое распределение и концентрация поверхностных состояний и т.д.

Также экспериментально определили ширину запрещенной зоны полупроводников различного физико-химического состава методом температурного сканирования (методом экстракции неосновных носителей заряда).