

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧЕРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

**Компьютерное моделирование вольт-амперных и вольт-
фарадных характеристик диода с барьером Шоттки при низких
температурах**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса

По направления 12.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

факультета nano- и биомедицинских технологий

Новиков Александр Валентинович

Научный руководитель

к.ф.- м.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

М.Ю.Калинки

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой:

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

Д.А.Усанов

инициалы, фамилия

Саратов 2018 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Вольтамперная характеристика диода с барьером Шоттки.....	5
1.1 Моделирование вольтамперной характеристики диода с барьером Шоттки.....	5
1.1.1 Моделирование при температурах от нормальной до близких к криогенным.....	5
1.1.2 Моделирование вольтамперных характеристик при нагреве.....	7
1.2. Экспериментальная зависимость вольтамперной характеристики диода Шоттки при нагреве и охлаждении до температур.....	9
1.2.1 Условия и метод проведения эксперимента.....	9
1.2.2 Экспериментальные ВАХ при охлаждении.....	11
2. ВФХ диода с барьером Шоттки при низких температурах.....	12
2.1 Моделирование ВФХ диода Шоттки.....	12
2.2 Условия проведения эксперимента.....	14
2.3. Экспериментальная зависимость вольтамперной характеристики диода Шоттки при отрицательных и криогенных температурах.....	15
Заключение.....	16
Список литературы.....	17

ВВЕДЕНИЕ

Диод Шоттки – это полупроводниковый прибор, свойства которого обусловлены выпрямлением электрического тока в области контакта металл/полупроводник (КМП). По сравнению с р-п переходом, сформированном в самом полупроводнике, КМП (при прочих равных условиях) имеет ряд важных отличительных черт:

1) Отсутствие инжекции и накопления неосновных носителей заряда в базовой области (в полупроводнике).

2) Меньшая (по сравнению с р-п переходом) величина прямого падения напряжения.

3) Большая теплопроводность КМП, чем у р-п перехода при нормальной характеристике теплопроводности Al, Pb и Mo являются более высокими чем теплопроводность обычного кристаллического кремния).

4) Выпрямляющие свойства сохраняются при больших частотах и плотностях электрического тока.

В процессе изготовления приборов микро и нанoeлектроники необходим контроль параметров полупроводниковых материалов и структур. К числу таких методов контроля относят измерение концентрации примеси по вольтфарадной характеристике. Другой параметр - высоту барьера при контакте металла с полупроводником можно определить из температурных зависимостей вольтамперной и вольтфарадной характеристик.

Целью данной работы было изучение вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик (ВАХ и ВФХ) диода Шоттки при относительно высоких (ниже температуры кипения воды) и относительно низких и криогенных температурах (выше температуры кипения жидкого азота). Для достижения указанной цели были сформулированы следующие задачи:

-Провести анализ литературы по теории и технологии изготовления барьера Шоттки.

-Провести микроскопическое и исследование и структурный и химический анализ материалов, использующихся в промышленно изготовленном диоде Шоттки «BAT 48 do 35».

-Смоделировать ВФХ и ВАХ барьера при различных температурах.

-Получить экспериментально ВФХ (при подаче напряжения -20В до +1В) и ВАХ (при подаче напряжения от -1В до +1В) при различных температурах в интервале от 77К (кипение жидкого азота) до 373К (кипение воды).

1. Вольтамперная характеристика диода с барьером Шоттки

1.1 Моделирование вольт-амперной характеристики диода с барьером Шоттки.

1.1.1 Моделирование при температурах от нормальной до близких к криогенным

Моделирование ВАХ следующим методом.

Моделирование проводилось при следующих пяти значениях температуры по Кельвину:

$$T01 := 298 \quad T02 := 223 \quad T03 := 163 \quad T04 := 113 \quad T05 := 73$$

В предположении, что барьер Шоттки образован в кремнии при контакте с золотом, у которого работа выхода $W_{om}=4,8$ эВ

Согласно модели термоионной эмиссии вольт- амперная характеристика $J_S = A \cdot T0^2 \cdot \exp\left(\frac{-F_{Bn}}{k \cdot T0}\right) \cdot (\exp(\beta \cdot V) - 1)$ где постоянная Ричардсона $A=120 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$

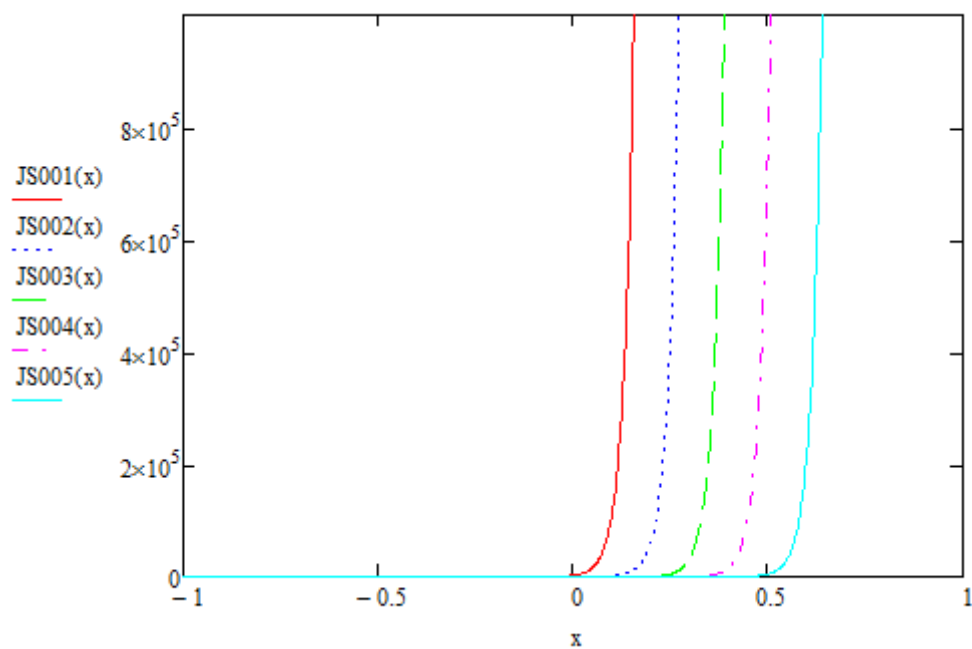


Рис 1.1 ВАХ при отрицательных температурах JS001(x) –(20°C), JS2(x) –(-50°C), JS3(x) –(-110°C), JS4(x) –(-160°C), JS5(x) –(-200°C). Горизонтальная ось x-напряжение смещения(В), вертикальная ось - плотность тока (А/м²)

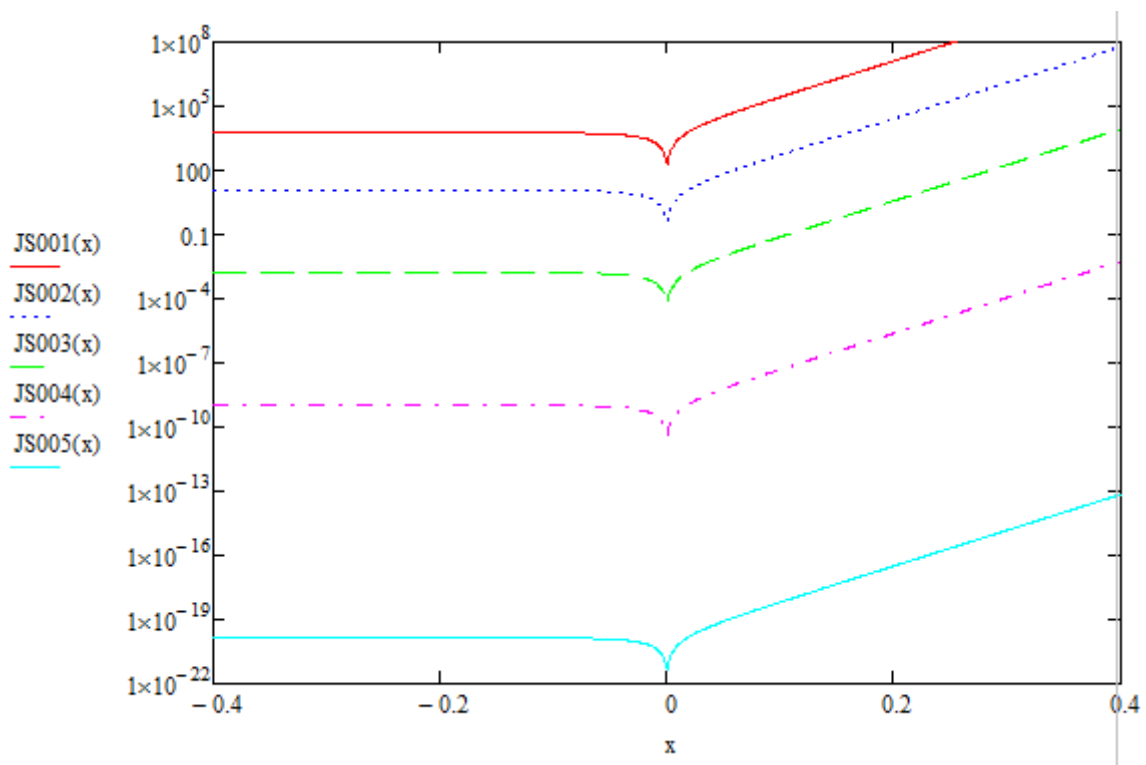


Рис 1.2 Та же ВАХ, но в логарифмическом масштабе JS001(x) – (20°C), JS2(x) – (-50°C), JS3(x) – (-110°C), JS4(x) – (-160°C), JS5(x) – (-200°C). Горизонтальная ось x – напряжение смещения (В), вертикальная ось – плотность тока (А/м²)

Как видно из графиков, прямая ветвь на большом участке имеет в логарифмическом масштабе линейный вид (т. е. при обычном масштабе является экспонентой). Все графике при прямом смещении имеют равный наклон, определяемый β , а расстояния по вертикальной оси между графиками определяются множителем $A \cdot T_0^2 \cdot \exp\left(\frac{-F_{Bn}}{k \cdot T_0}\right)$. Более верхний график соответствует более высокой температуре

1.1.2 Моделирование вольтамперных характеристик при нагреве.

T01 := 298 T02 := 313 T03 := 333 T04 := 353 T05 := 373

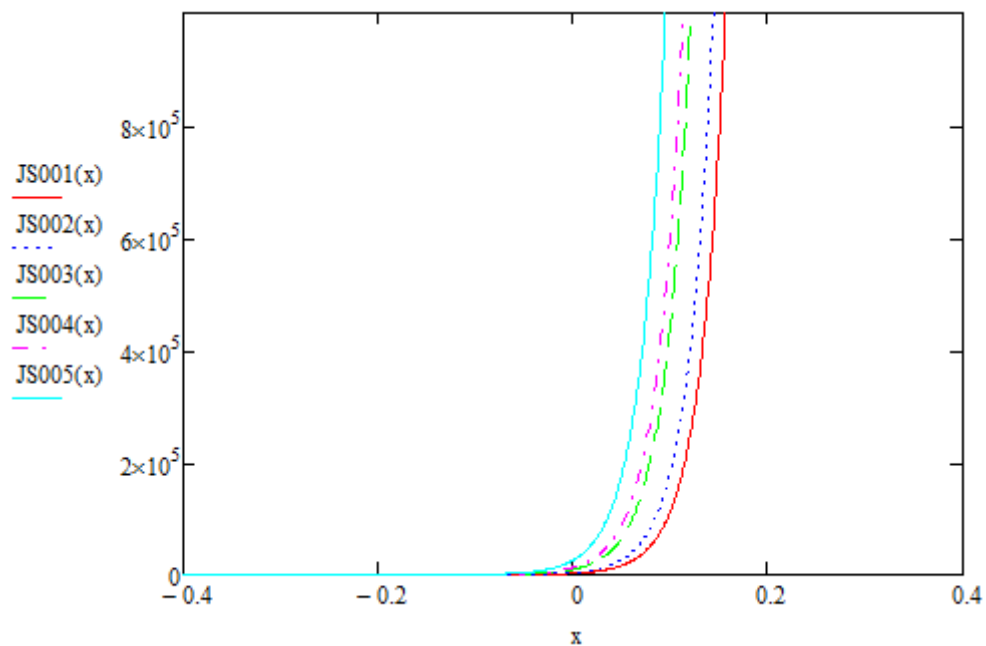


Рис 1.3 ВАХ при нагреве JS001(x) –(20°C), JS002(x) –(40°C), JS003(x) –(60°C), JS004(x) –(80 °C), JS005(x) –(100°C).;Горизонтальная ось x-напряжение смещения(В), вертикальная ось - плотность тока (А/м²)

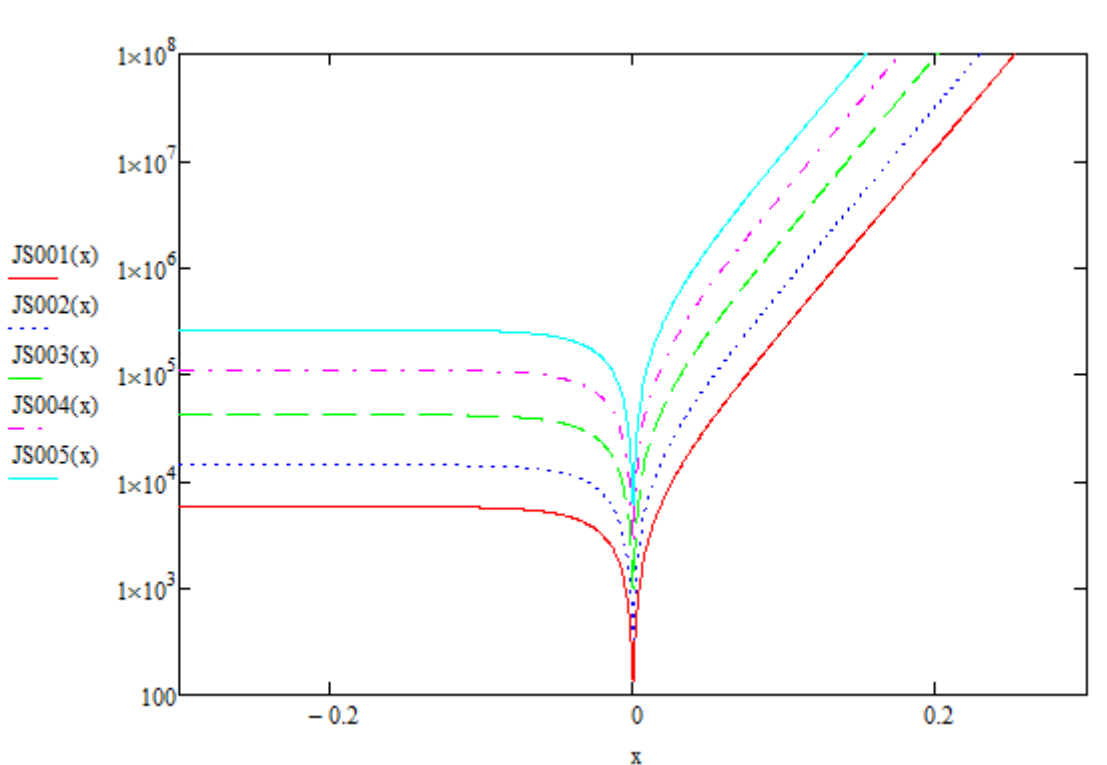


Рис 1.4 Та же ВАХ в логарифмическом масштабе JS001(x) –(20°C), JS002(x) –(40°C), JS003(x) –(60°C), JS004(x) –(80 °C), JS005(x) –(100°C).;Горизонтальная ось x-напряжение смещения(В), вертикальная ось - плотность тока (А/м²)

Характер графиков аналогичен характеру графиков для отрицательных температур. Однако изменение по области токов происходит на интервале, охватывающим только три порядка $5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$

1.2. Экспериментальная зависимость вольтамперной характеристики диода Шоттки при нагреве и охлаждении до криогенных температур

1.2.1 Условия и метод проведения эксперимента

Была экспериментально получена ВАХ диода “BAT48 do 35” при различных температурах в диапазоне напряжения от -1В до +1В с шагом 0.01В. Для проведения эксперимента была использована настольная рабочая станция для проведения автоматизированных измерений NI ELVIS, подключенная к стационарному компьютеру. Так же был подобран латунный корпус со внутренней изоляцией для погружения в емкость с жидким азотом, в котором помимо диода находилась термопара для измерения температуры внешней среды.

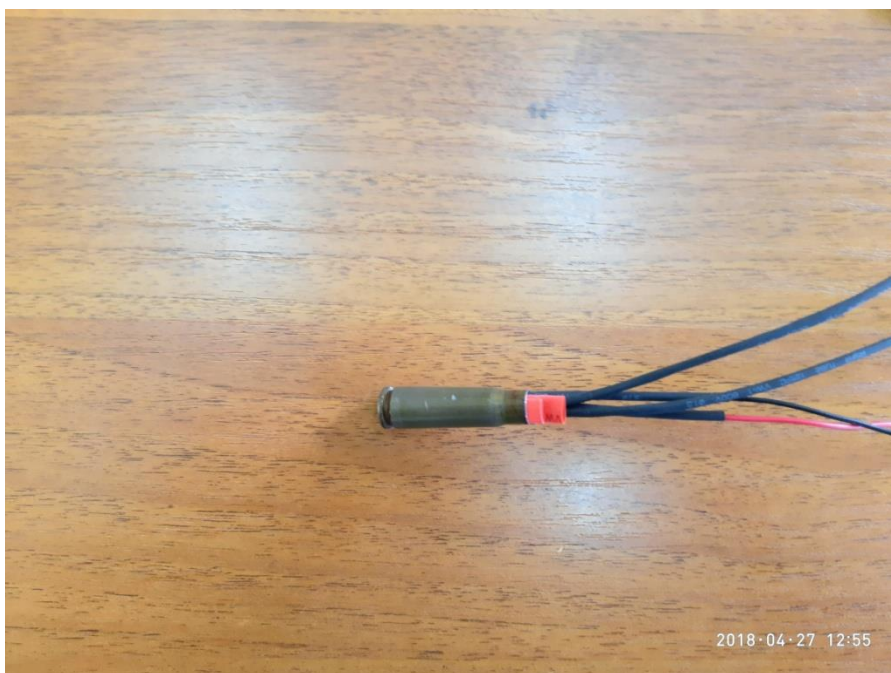


Рис.1.5 Зонд с диодом и термопарой

Для измерения температуры зонда была использована хромель-алюмелевая термопара подключенная к мультиметру.

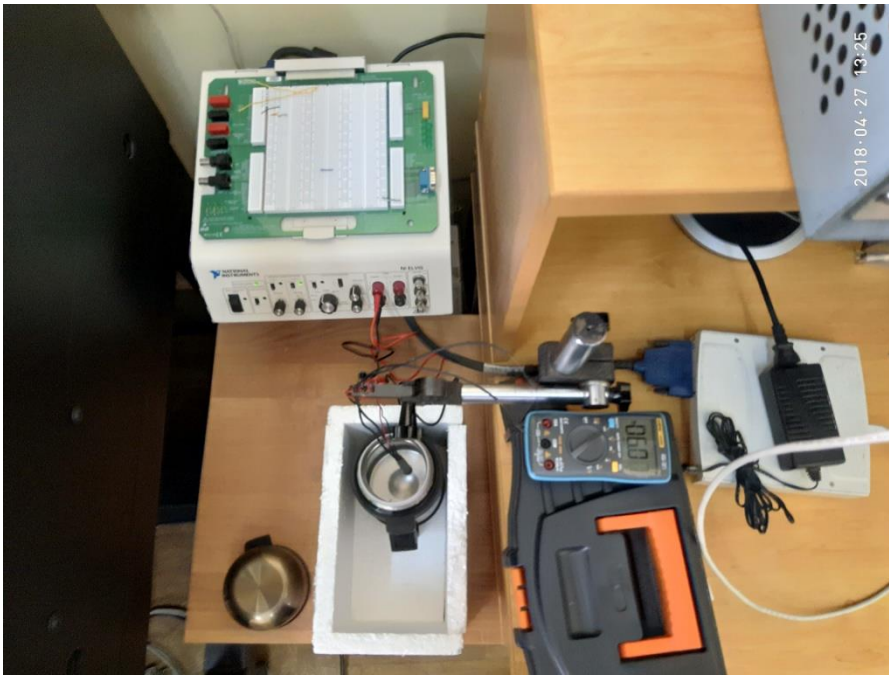


Рис.1.6 Зонд погруженный в жидкий азот

После чего данные были зарегистрированы и обработаны с помощью системы инженерных расчетов MathCad.

1.2.2 Экспериментальные ВАХ при охлаждении

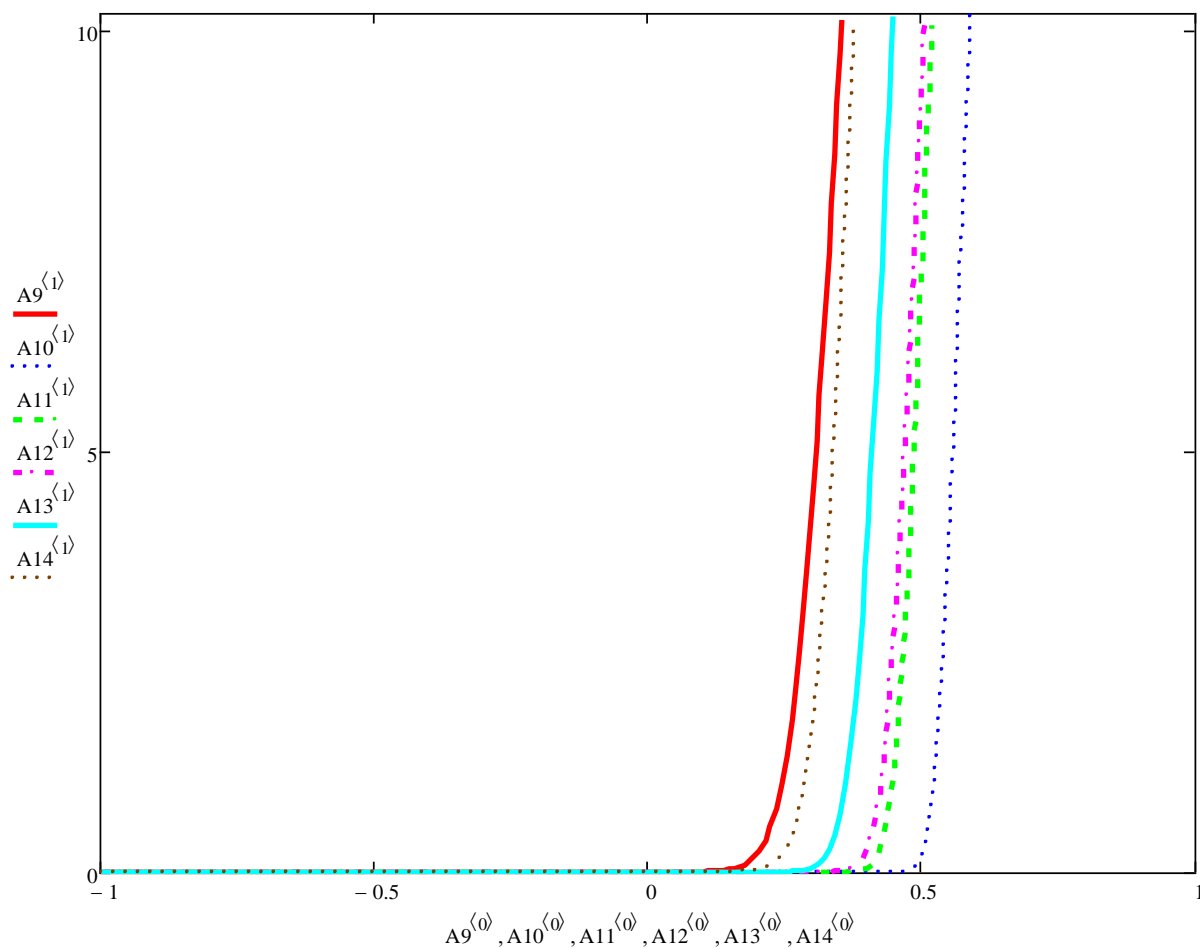


Рис 1.7 График зависимости прямой ветви ВАХ при низких температурах A9-(20°C), A10-(-200°C), A11-(-120°C), A12-(-90°C), A13-(-50°C). где по оси x-напряжение смещения(V), по y-ток(mA)

2. ВФХ диода с барьером Шоттки при низких температурах

2.1 Моделирование ВФХ диода Шоттки.

Нами было проведено моделирование удельной емкости (отнесенной к площади поверхности) Формула для удельной емкости при четырех значениях концентрации примеси:

$$N_{1d} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$$

$$N_{2d} = 10^{17} \text{ см}^{-3}$$

$$N_{3d} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$$

$$N_{4d} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$$

$$C1(V) := \sqrt{\frac{e \cdot N_{1d} \cdot \epsilon_s}{2 \cdot (V_{bi} - V)}}$$

$$C2(V) := \sqrt{\frac{e \cdot N_{2d} \cdot \epsilon_s}{2 \cdot (V_{bi} - V)}}$$

$$C3(V) := \sqrt{\frac{e \cdot N_{3d} \cdot \epsilon_s}{2 \cdot (V_{bi} - V)}}$$

$$C4(V) := \sqrt{\frac{e \cdot N_{4d} \cdot \epsilon_s}{2 \cdot (V_{bi} - V)}}$$

где $\epsilon_s = 12 \cdot 8.85418782 \times 10^{-12} \text{ м}^{-3} \text{ кг}^{-1} \text{ с}^4 \text{ А}^2$ - произведение диэлектрической проницаемости кремния на электрическую постоянную;

V_{bi} - встроенный потенциал, определяется выражением $v_{bi} = \frac{F_{bn}}{e} + V_n$

Значение полной емкости (С учетом площади диода)

$$C1_total(v) := C1(v) \cdot S$$

$$C3_total(v) := C3(v) \cdot S$$

$$C4_total(v) := C4(v) \cdot S$$

где площадь поверхности диода

$$S = 100 \cdot 100 \text{ мкм}^2$$

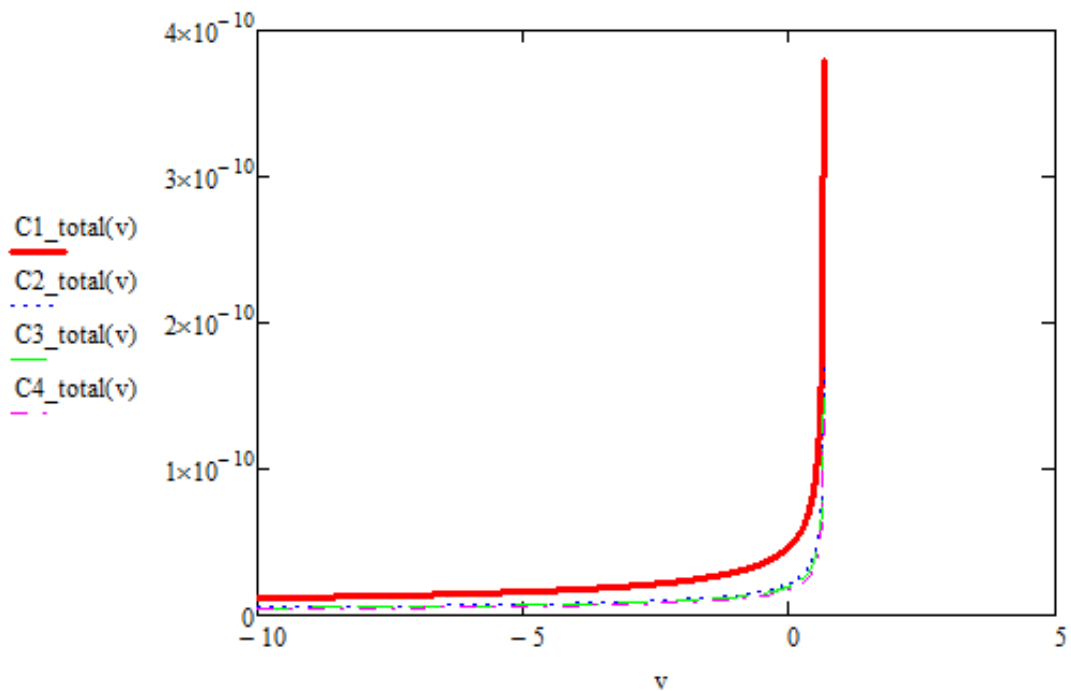


Рис.2.1 График ВФХ при $N_{1d}=10^{18} \text{ см}^{-3}, N_{2d}=10^{17} \text{ см}^{-3}, N_{3d}=10^{16} \text{ см}^{-3}$ Горизонтальная ось x -напряжение смещения(V), вертикальная ось емкость(Φ)

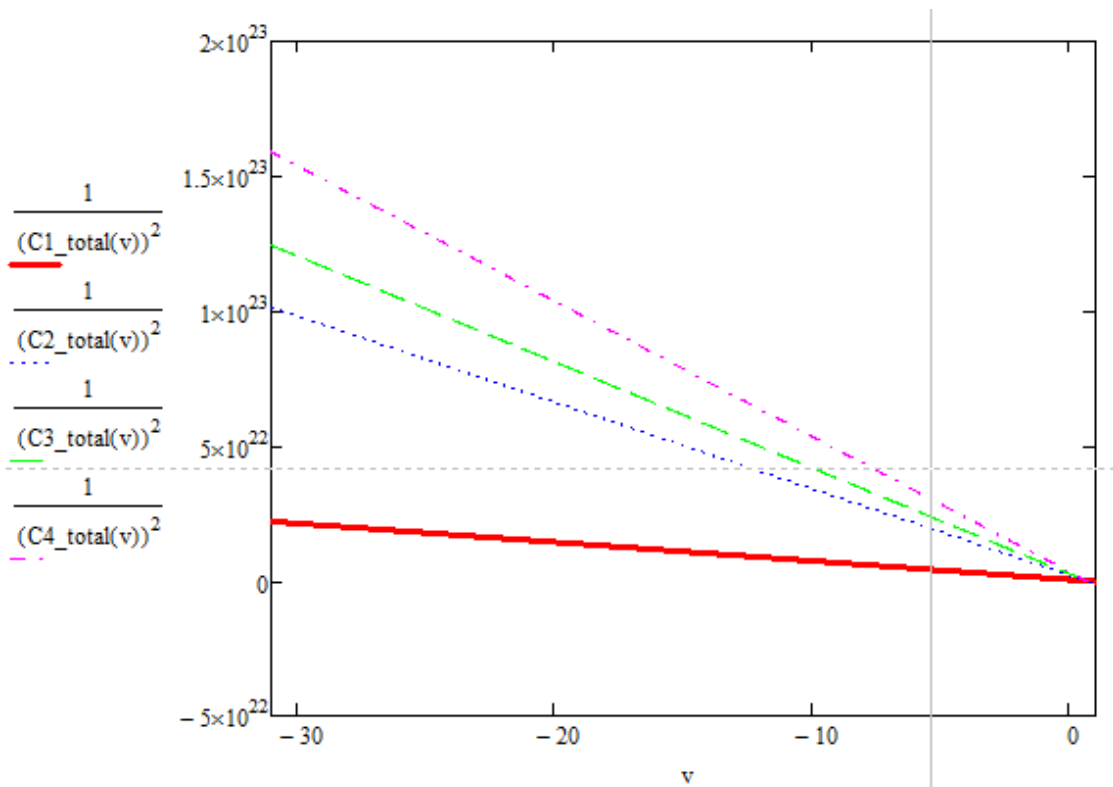


Рис.2.2 График в логарифмическом масштабе ВФХ при четырех значениях концентрации примеси $N_{1d}=10^{18} \text{ см}^{-3}, N_{2d}=10^{17} \text{ см}^{-3}, N_{3d}=10^{16} \text{ см}^{-3}, N_{4d}=10^{15} \text{ см}^{-3}$ Горизонтальная ось x -напряжение смещения(V), вертикальная ось — обратный квадрат емкости (Φ^{-2})

2.2 Условия проведения эксперимента

Были проведены измерения вольтфарадной характеристики диода с Барьером Шоттки и экспериментально получена ВФХ диода “BAT48 до 35” при различных температурах в диапазоне напряжения от -20В до +1В . Для проведения эксперимента было использовано установка для автоматического измерения вольт-емкостных характеристик полупроводниковых структур ИПНМ-2. Изготовленный зонд для погружения в емкость с жидким азотом, в котором помимо диода находилась термопара для измерения температуры внешней среды.

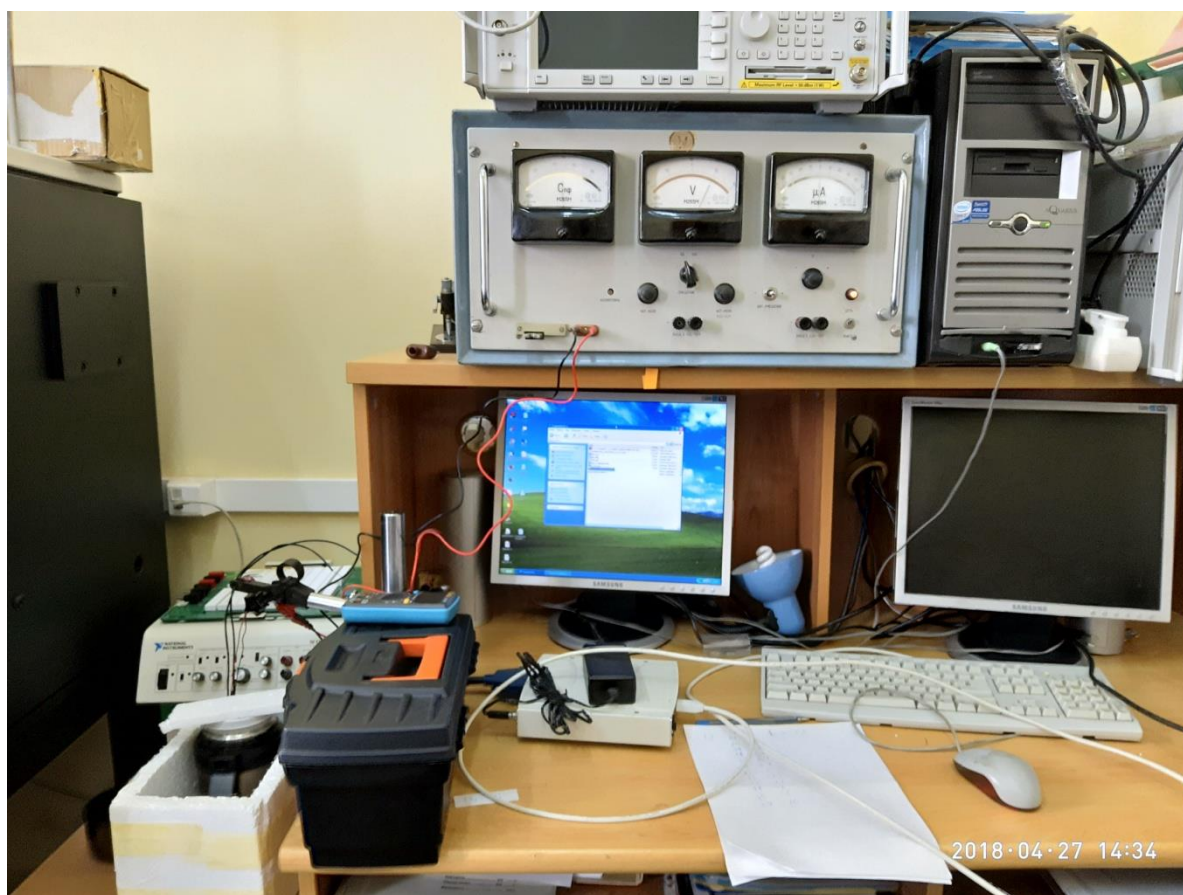


Рис.2.3 Установка ИПНМ-2 с подключенным к ней зондом для проведения измерений при низкой температуре в среде с жидким азотом.

2.3. Экспериментальная зависимость вольтамперной характеристики диода Шоттки при отрицательных и криогенных температурах.

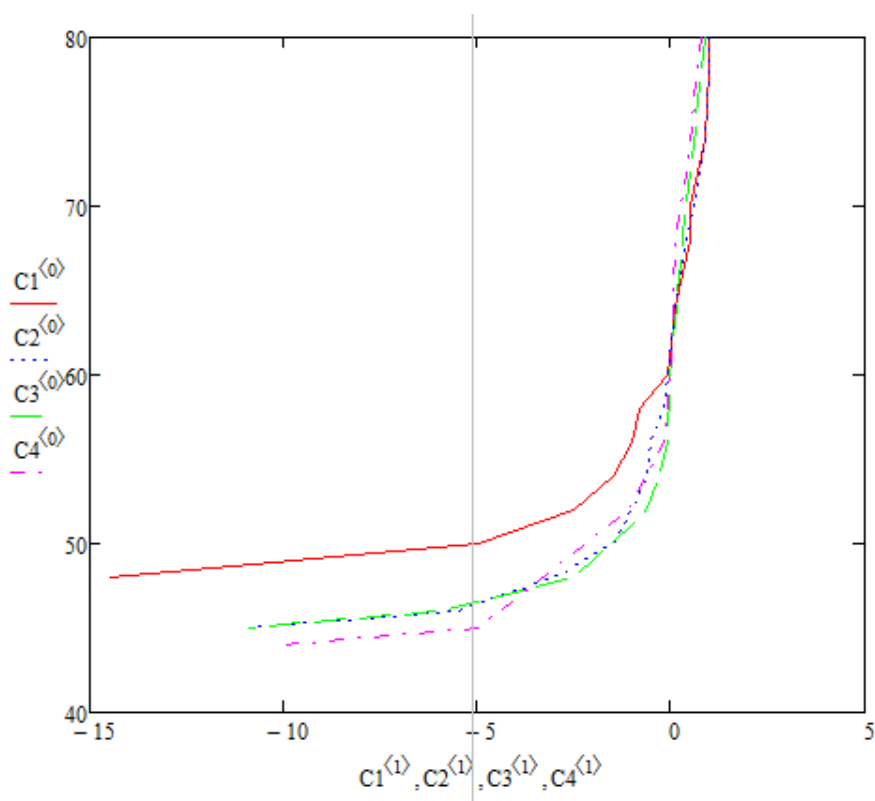


Рис 2.4 Экспериментальные данные ВФХ при охлаждении C1-(20°C), C2-(-200°C), C3-(-110°C), C1-(-90°C), C1-(-50°C) где по оси x-напряжение смещения(В), по y-емкость(пФ)

Как видно из графиков с ростом температуры вольт-фарядные кривые проходят выше, что может быть связано с изменением темпа генерации неосновных носителей при изменении температуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

В рамках выпускной квалификационной работы бакалавра было проведено теоретическое рассмотрение вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик контакт металл/полупроводник. На примере диода с барьером Шоттки ВАТ 48 до 35 с помощью сканирующего электронного микроскопа INCA Penta FET X3 был проведен микроанализ поверхности вскрытого диода Шоттки для установления параметров, необходимых при дальнейшем моделировании. Измерения топологических размеров кристалла были сделаны с помощью 3D преобразовании на микроскопе MICROSCOPE KH-7700. В заключении были проведены эксперименты с получением вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик с при различных температурах от температуры кипения воды до криогенных температур кипения жидкого азота. Экспериментальные результаты качественно совпадают результатами моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1.Грундман М. Основы физики полупроводников. Нанопизика и технология применения.-2-е изд./Пер. с англ. под ред. В.А. Гергеля.- М.:ФИЗМАТЛИТ,2012 ISBN-978-5-9221-1394-6.
- 2.Поклонский Н.А., Горбачук Н.И., Лапчук Н.М. Физика электрического контакта металл/полупроводник. БГУ Минск, Белоруссия 2003г. УДК 537.311.322(075.08)
- 3.Верещагин И.К., Кокин В.А. Физика твердого тела-2-е изд., испр-М.:Вышш. Шк.,2001.-237с.:ил.
- 4.Attia, John Okyere."FrontMatter" Electronics and Circuit Analysis using MATLAB, Boca Raton: CRC Press LLC,1999 ISBN 0-8493-1176-4.
5. Критская Т.В., Пашаев И.Г., Изучение деградации характеристик кремниевых диодов Шоттки . Физика и техника полупроводников, 2007, том 41, вып. 11.2012 УДК 621.382
- 6.Бланк Т.В.Гольдберг Ю.А., Механизм протекания тока в омическом контакте металл-полупроводник. ФТИ им. А.Ф. Иоффе Ран, Санкт-Петербург. УДК 621.315.592
- 7.Жуковский П.В., Партыка Я. Диэлектрические свойства полупроводниковых соединений, БГУ Минск, Белоруссия 1998 г.
8. Вендик О.Г., Зубко С.П., Никольский М.А., Моделирование и расчет емкости планарного конденсатора содержащего тонкий слой сегнетоэлектрика., Санкт-Петербургский Государственный электротехнический университет, 1997г.
9. Кушнир Ф. В. Радиотехнические измерения: Учебник для техникумов связи.— М.: Связь, 1980.— 176 с., ил.
10. Афанасьев М.С., Митягин А.Ю., Чучева Г.В.//Известия СГУ. Новая серия. Физика. 2013. №1
11. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2 кн. – М.: Мир, 1984
12. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987.

13. Медведев С.П. Физика полупроводниковых и микроэлектронных приборов (биполярные приборы): Учеб. пос. – Пенза, 1996.
14. Н.А. Торхов, Влияние периферии контактов металл–полупроводник с барьером Шоттки на их статические вольт-амперные характеристики, Физика и техника полупроводников, том 44, вып. 5, Томск , Россия 2010 г.
15. Е.Б. Шадрин, А.В. Ильинский, О природе фазового перехода металл–полупроводник в диоксиде ванадия, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия 1999 г.
16. Н.А. Торхов, Природа прямых и обратных токов насыщения в контактах металл–полупроводник с барьером Шоттки, Физика и техника полупроводников, 2010, том 44, вып. 6
17. Н.А. Торхов , В.А. Новиков, Влияние периферии контактов металл–полупроводник с барьером Шоттки на их электрофизические характеристики, Томский государственный университет, 634050 Томск, Россия 2010г.
18. Киреев П.С. Физика полупроводников, Учеб. пособие для втузов. М., «Высш. школа», 1975.
19. Кардона М., Основы физики полупроводников, ISBN:5-9221-0268-0,Издательство: ФИЗМАТЛИТ 2002г.

