

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

**ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛЬТ-ФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МДП
СТРУКТУР КВАЗИСТАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ
АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТОРСКОЙ РАБОТЫ**

Студента 2 курса

По направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

факультета нано- 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

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2020 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1.Практическое создание МОП структуры на основе кремния.....	4
2.Моделирование вольт -фарадных характеристик в Python.....	13
3.Вольт-фарадные характеристики МОП структуры.....	19
Заключение.....	23
Список литературы.....	24

Введение.

Основополагающее направление развития современной полупроводниковой электроники, это уменьшение размеров (миниатюризация) и увеличение функциональной эффективности изделий на основе полупроводниковых структур.

Основная направленность микроэлектроники в последнее время возможна благодаря постоянно ведущимся разработкам и модернизированию технологических методов, обеспечивающих массовое производство микроструктур с индивидуальными техническими параметрами и умеренными ценами. В наибольшей степени эти методы реализованы в полупроводниковом производстве при изготовлении ИМС. Именно в этом направлении достигнуты наиболее значимые практические результаты – существенно увеличивающие отклик микропроцессоров.

Целью данной работы было проведение ряда экспериментов по созданию МОП структуры, математическое моделирование поверхностного заряда и ВФХ при низких частотах с использованием программного пакета Python и библиотек NumPy и matplotlib, а так же проведение замеров полученной структуры и сравнения их результатами математического моделирования.

1. ПРАКТИЧЕСКОЕ СОЗДАНИЕ МОП СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ.

В данном эксперименте мы взяли несколько пластин кремния легированного атомами бором, не имеющие никаких скрытых слоев и провели операцию по отчистки и обезжириванию пластин от загрязнений и естественного оксида (толщи на которого обычно не превышает 10нм).

Скрайбирование пластины.

На первоначальном этапе было проведено скрайбирование с помощью высокоточный ручной алмазный скрайбера. Данная установка дает возможность выполнить точное скрайбирование на любом устройстве. Основана на платформе, можно выполнять точную настройку в направлении оси X. Вертикальное движение алмазной головки точно позиционируется и согласуется с вертикальным обзором. Точность резки менее 30 мкм. Для удобства проведение дальнейших операций, операция была произведена без предварительного нанесение защитных полимеров, поскольку дефекты на границе срезов не имеют особой значимости в данном эксперименте рис.5.3.

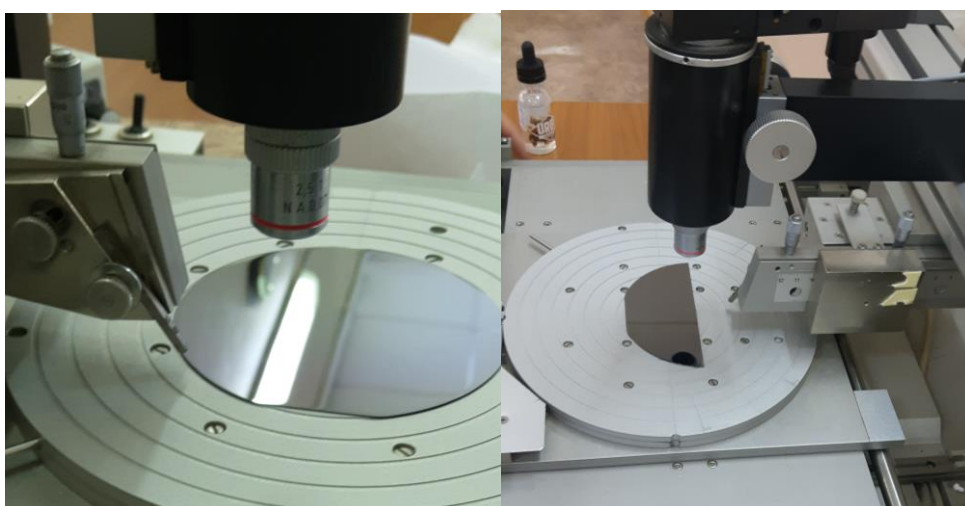


Рис.5.1 Вид пластины кремния, до и после на несения Web разметки.

После нанесения Web разметок пластину прокатывают силиконовым валиком для разделения ее на отдельные фрагменты.

Снятие загрязнения с поверхности подложки.

- Этап первый. В специально оборудованном вентилируемом шкафу, мы погрузили пластины в концентрат тетрахлорметана и держали их в растворе около 5 минут для снятия жировых пленок с поверхности пластин и высушили их на пористых бумажных фильтрах, после чего была проведена промывка, сушка и проверка на микроскопе с целью убедиться в отсутствии остаточных загрязнений на поверхности пластины рис.5.2



Рис.5.2 Обезжиривание пластины кремния в четыреххлористом углероде(тетрахлорметан)

-Этап второй. Происходит погружение пластин в 50% раствор фтороводорода для снятия пленки окисла с поверхности пластины рис.5.3. Нужно обратить внимание на то, что после погружения пластины в раствор

необходимым является периодичное перемещение пластины в лабораторной чашке для схождения слоя окисла и его равномерного удаления по всей площади и со всех сторон подложки.



Рис.5.3 Снятие естественной пленки оксида кремния с поверхности пластины.

-Этап третий. Многократная промывка пластины в дистиллированной воде и последующая сушка. Важно чтобы на пластине не оставалось ни каких разводов и мусора иначе это будет способствовать более быстрому наращиванию естественного слоя окисла.

Определения типа проводимости.

Для определения типа проводимости мы используем метод холодного и горячего контакта т.к. в нагретой области стержня происходит увеличение концентрации и энергии свободных электронов. Поэтому, стремясь ослабить градиент, они, под действием теплового движения, начинают диффундировать в холодную область полупроводникового стержня. В области низких температур (значительно меньше комнатной) к этому механизму добавляется процесс увлечения свободных электронов фононами, движущимися от горячего конца к холодному, т.к. их концентрация в этом случае значительна, и пренебрегать влиянием фононов на характер движения электронов уже нельзя. Диффузионное перемещение электронов приводит к образованию разности потенциалов, называемой термоэлектрической силой (термо-ЭДС). В условиях термодинамического равновесия термо-ЭДС формирует поток электронов равный, но противоположно направленный потоку диффузионных электронов. Тогда, при одинаковой температуре в полупроводнике, контактные разности потенциалов в области контактов будут равны по величине и направлены в противоположные стороны. Если же выполняется неравенство $T_2 > T_1$, то возникает разность контактных разностей потенциалов делающая свой вклад в термо-ЭДС полупроводника. Таким образом, возникновение термо-ЭДС обусловлено двумя механизмами: объемной диффузией носителей заряда от горячего конца к холодному и контактной диффузией, возникающей из-за температурной зависимости контактной разности потенциалов. При объемной диффузии наличие градиента температуры вызывает одностороннюю диффузию потока электронов от горячего конца полупроводника к холодному, обусловленную градиентом концентрации свободных носителей n и тепловым движением при постоянном коэффициенте диффузии электронов.



Рис.5.4 Определения типа проводимости полупроводника на основе эффекта термо-ЭДС

Наращивание оксида кремния методом сухого кислорода.

В современной микроэлектронике кремний пока остается основным материалом в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем (ИС). Это во многом связано с уникальным сочетанием физико-химических свойств его оксид SiO_2 , что обуславливает широкое применение SiO_2 в качестве универсального многофункционального диэлектрика. Среди примеров применения SiO_2 можно выделить его использование в качестве функционального диэлектрического слоя в полевых транзисторах со структурой металл-диэлектрик-полупроводник или МОП-транзисторах,

электрической изоляции активных и пассивных элементов ИС, а также межслойной изоляции многоуровневой металлизации, маски и источника диффузанта в процессах локального легирования полупроводниковой подложки, защитного или пассивирующего покрытия, предохраняющего поверхность полупроводника от воздействия внешних факторов (реагенты, температура, излучение и др.), геттерирующих слоев, обеспечивающих удаление нежелательных примесей и дефектов из активных областей полупроводниковых приборов.

В данном эксперименте мы погрузили заведомо отчищенную подложку кремния в печь под воздействие температуры в 1000°C на 5 часов. После чего, достав из печи проверили методом цветowych оттенков Ньютона, который показал толщину оксида в 300 мкм.



Рис.5.5 Нанесения оксида кремния в сухом кислороде.

Нанесение омического контакта.

Нанесение алюминиевого омического контакта было производилось на установке ВУП-5 (Вакуумный универсальный пост) предназначен для получения пленок из различных материалов с высокой производительностью методом магнетронного распыления, а также для подготовки объектов, исследуемых с помощью электронного микроскопа или других аналитических приборов. Предварительно подготовили поверхность и удалением окисла на месте нанесения металлизации. К основным достоинствам данного прибора можно отнести: много вариативность процесса, дающая возможность получить пленки металлов достаточно большой точности по толщине, возможность использования сплавов и полупроводников, внушительная скорость процесса осаждения с возможностью ее регулирования в больших пределах, сохранение компонентов при распылении вещества со сложно сочиненной структурой, возможность получения достаточно высоких показателей адгезию пленок и подложки, возможность изменения структуры и свойств пленок, возможность нанесение пленок нескольких различных металлов не нарушая герметизацию объема вакуума, малое воздействие тепловой составляющей на обрабатываемую структуру.



Рис.5.6 Внешний вид установки ВУП-5(Вакуумный Универсальный Пост)

Отжиг металлизации

После нанесения металлизации необходимо произвести отжиг металлических контактов для лучшего соединения их с приповерхностным слоем полупроводника. Процесс заключается в диффузии атомов металлических контактов вглубь подзатворного диэлектрика. Этот процесс необходим для увеличения качественных показателей прибора и избежание отхождения металлических пленок от структуры. Отжиг производился при температуре 450°C в течении 15 минут.



Рис.5.7 Отжиг металлизации



Рис.5.8 Образец после отжига

2.МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТ -ФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В PYTHON

Код программы.

```
!pip install matplotlib
import matplotlib
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import math
import pandas as pd
%pylab inline
q=1.6e-19
e0=8.85e-14
esi=11.7*e0
eox=3.97*e0
Pit=0.026
ni=1.45e10
k=1.38e-23
T=300
Na=1e15
Tox_nm=220
Tox=Tox_nm*1e-7
Pif=Pit*(math.log(Na/ni))
Cox = eox/Tox
Pis_ = np.linspace(-1,3,100)
print(Pis_)
Cgb_нч = np.arange(100, dtype=float)
Cgb_вч = np.arange(100, dtype=float)
for i in range(0, 100):
    Pis=Pis_[i]

    A = 1-math.e**(-Pis/Pit)+math.e**(-2*Pif/Pit)*(math.e**(Pis/Pit)-1)
    B = 2*(Pit*math.e**(-Pis/Pit)+Pis-Pit+math.e**(-
2*Pif/Pit)*(Pit*math.e**(Pis/Pit)-Pit-Pis))**0.5

    A1 = 1-math.e**(-Pis/Pit)+math.e**(-2*Pif/Pit)*(0.*math.e**(Pis/Pit)-1)
    B1 = 2*(Pit*math.e**(-Pis/Pit)+Pis-Pit+math.e**(-
2*Pif/Pit)*(0.*Pit*math.e**(Pis/Pit)-0.*Pit-Pis))**0.5

    if Pis<0:
        Csc = -(2*q*esi*Na)**0.5*(A/B)
        Csc1 = -(2*q*esi*Na)**0.5*(A1/B1)
    else:
```

$$C_{sc} = (2 \cdot q \cdot \epsilon_{si} \cdot N_a)^{0.5} \cdot (A/B)$$

$$C_{sc1} = (2 \cdot q \cdot \epsilon_{si} \cdot N_a)^{0.5} \cdot (A1/B1)$$

$$C_{gb_нч}[i] = (C_{ox} \cdot C_{sc}) / (C_{ox} + C_{sc})$$

$$C_{gb_вч}[i] = (C_{ox} \cdot C_{sc1}) / (C_{ox} + C_{sc1})$$

```
fig1, ax = plt.subplots()
plt.plot(Pis_, Cgb_нч/Cox, '-', label='Cgb_нч')
#plt.plot( Pis_, Cgb_вч/Cox, '--', label='Cgb_вч')
plt.xlabel('Поверхностный потенциал  $\bar{\phi}_s$ , В')
plt.ylabel('Нормир удельн емк Cgb на НЧ')
plt.title('Na='+str(Na)+' см^(-3)  '+'Tox='+str(Tox_nm)+'нм')
plt.legend()
plt.grid()
fig2, ax = plt.subplots()
#plt.plot(Pis_, Cgb_нч/Cox, '-', label='Cgb_нч')
plt.plot( Pis_, Cgb_вч/Cox, '--', label='Cgb_вч')
plt.xlabel('Поверхностный потенциал  $\bar{\phi}_s$ , В')
plt.ylabel('Нормир удельн емк Cgb на ВЧ')
plt.title('Na='+str(Na)+' см^(-3)  '+'Tox='+str(Tox_nm)+'нм')
plt.legend()
plt.grid()
```

```
fig3, ax = plt.subplots()
plt.plot(Pis_, Cgb_нч/Cox, '-', label='Cgb_нч')
plt.plot( Pis_, Cgb_вч/Cox, '--', label='Cgb_вч')

plt.xlabel('Поверхностный потенциал  $\bar{\phi}_s$ , В')
plt.ylabel('Нормир удельн емк Cgb на НЧ и ВЧ')
plt.title('Na='+str(Na)+' см^(-3)  '+'Tox='+str(Tox_nm)+'нм')

plt.legend()
plt.grid()
```

Моделирование зависимости объемной плотности заряда ρ от поверхностного потенциала ϕ_s при различной температуре T для p- типа (вверху) и n- типа (внизу) МОП структуры

Моделирование объемной плотности заряда ρ проводилось при следующих значениях констант и параметров:

$q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
$n_i = 1,45 \cdot 10^{10}$ см ⁻³
$N_a = 1,0 \cdot 10^{16}$ см ⁻³
$-1,2\text{В} < \varphi_s < 1,2\text{В}$
$T = 300$ К
$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К

по формулам:

$\varphi_t = kT/q$	температурный потенциал
$\varphi_f = \varphi_t \cdot \ln(N_a/n_i)$	разность потенциалов уровня Ферми и уровня Ферми собственного полупроводника р- типа
$p_{p0} = n_i \cdot \exp(\varphi_f/\varphi_t)$	равновесная концентрация дырок в полупроводнике р- типа (Hole concentration at thermal equilibrium)
$n_{p0} = n_i \cdot \exp(-\varphi_f/\varphi_t)$	равновесная концентрация электронов в полупроводнике р- типа (Electron concentration at thermal equilibrium)

$\rho_0 = q \cdot (n_{p0} - p_{p0} + p_{p0} \cdot \exp(-\varphi_s/\varphi_t) - n_{p0} \cdot \exp(\varphi_s/\varphi_t))$	объемная плотность заряда вблизи поверхности

Ниже приведены результаты моделирования

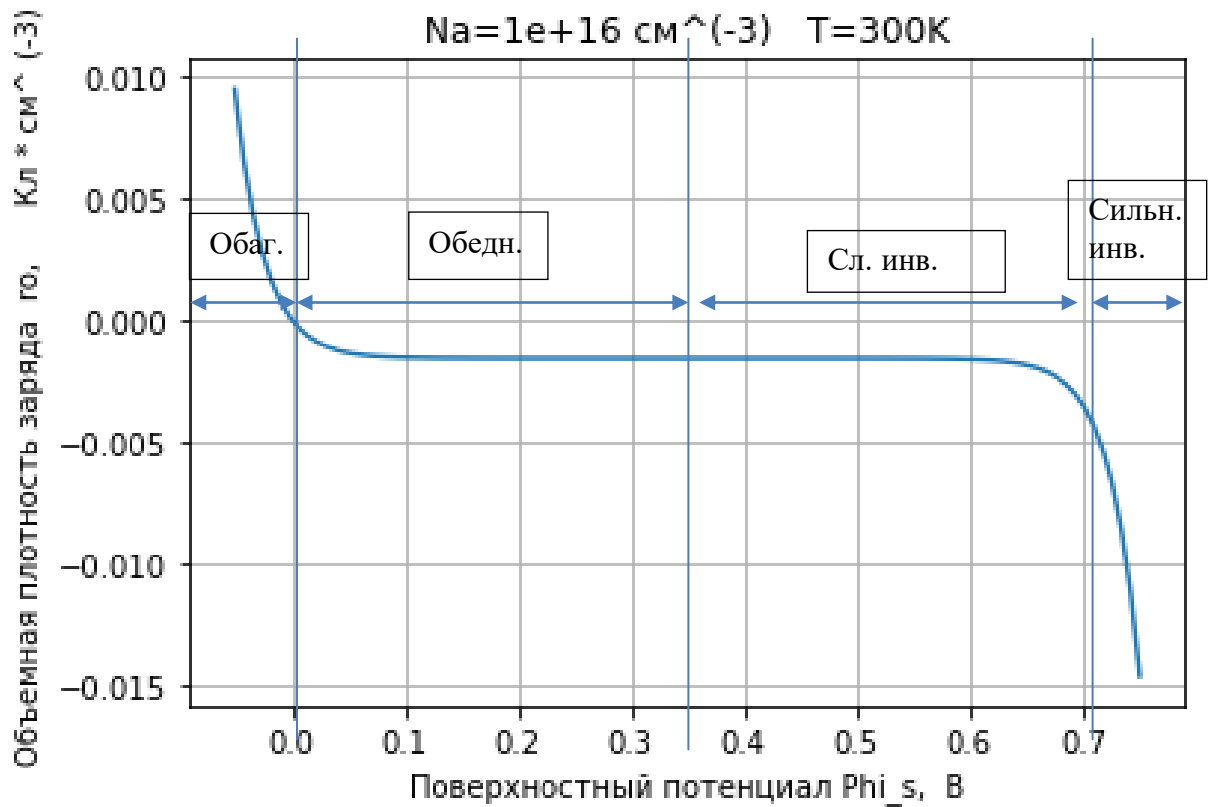


Рис. 6.1. Смоделированная зависимость объемной плотности заряда ρ_0 в полупроводнике вблизи поверхности МОП структуры от поверхностного потенциала φ_s для р- типа МОП структуры

Для р- типа , как видно из верхнего графика, для комнатной температуры $T=300\text{K}$, при $\varphi_s < 0\text{В}$ наступает режим обогащения (резкий рост кривой вверх), при $0 < \varphi_s < 0.35\text{В}$ - режим обеднения (слева от оси симметрии кривой), при $0.35\text{В} < \varphi_s < 0.7\text{В}$ – режим слабой инверсии (справа от оси симметрии кривой), при $\varphi_s > 0.7\text{В}$ – режим сильной инверсии (резкий спад кривой)

Моделирование зависимости удельной емкости C'_{eq} МОП структуры от поверхностного потенциала φ_s проводилось при следующих значениях констант и параметров:

$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-14} \text{ Ф/см}^{-1}$
$\epsilon_{Si} = 11,7\epsilon_0$
$\epsilon_{OX} = 3,97\epsilon_0$
$T_{ox} = 500 \cdot 10^{-7} \text{ см}$

с использованием соотношений:

$A = 1 - \exp(-\varphi_s/\varphi_t) + \exp(-2\varphi_f/\varphi_t) \cdot (\exp(\varphi_s/\varphi_t) - 1)$	на НЧ
$B = 2 \cdot \left(\varphi_t \cdot \exp(-\varphi_s/\varphi_t) + \varphi_s - \varphi_t + \exp(-2\varphi_f/\varphi_t) \cdot (\varphi_t \cdot \exp(-\varphi_s/\varphi_t) + \varphi_s - \varphi_t) \right)^{1/2}$	на НЧ
$A_{HF} = 1 - \exp(-\varphi_s/\varphi_t) + \exp(-2\varphi_f/\varphi_t)$	на ВЧ
$B_{HF} = 2 \cdot \left(\varphi_t \cdot \exp(-\varphi_s/\varphi_t) + \varphi_s - \varphi_t + \exp(-2\varphi_f/\varphi_t) \cdot (0 \cdot \varphi_t \cdot \exp(-\varphi_s/\varphi_t) + 0 \cdot \varphi_s - \varphi_t) \right)^{1/2}$	на ВЧ
$C'_{sc} = (2 \cdot q \cdot \epsilon_{Si} \cdot N_a)^{1/2} \cdot A/B$	удельная емкость полупроводника на НЧ
$C'_{sc} = (2 \cdot q \cdot \epsilon_{Si} \cdot N_a)^{1/2} \cdot A_{HF}/B_{HF}$	удельная емкость полупроводника на ВЧ
$C'_{ox} = \epsilon_{OX}/T_{ox}$	удельная емкость оксида
$C'_{eq} = C'_{ox} \cdot C'_{sc} / (C'_{ox} + C'_{sc})$	удельная емкость МОП структуры

Результаты моделирования нормированной удельной емкости C'_{eq}/C'_{ox} приведены на рис. 6.2.

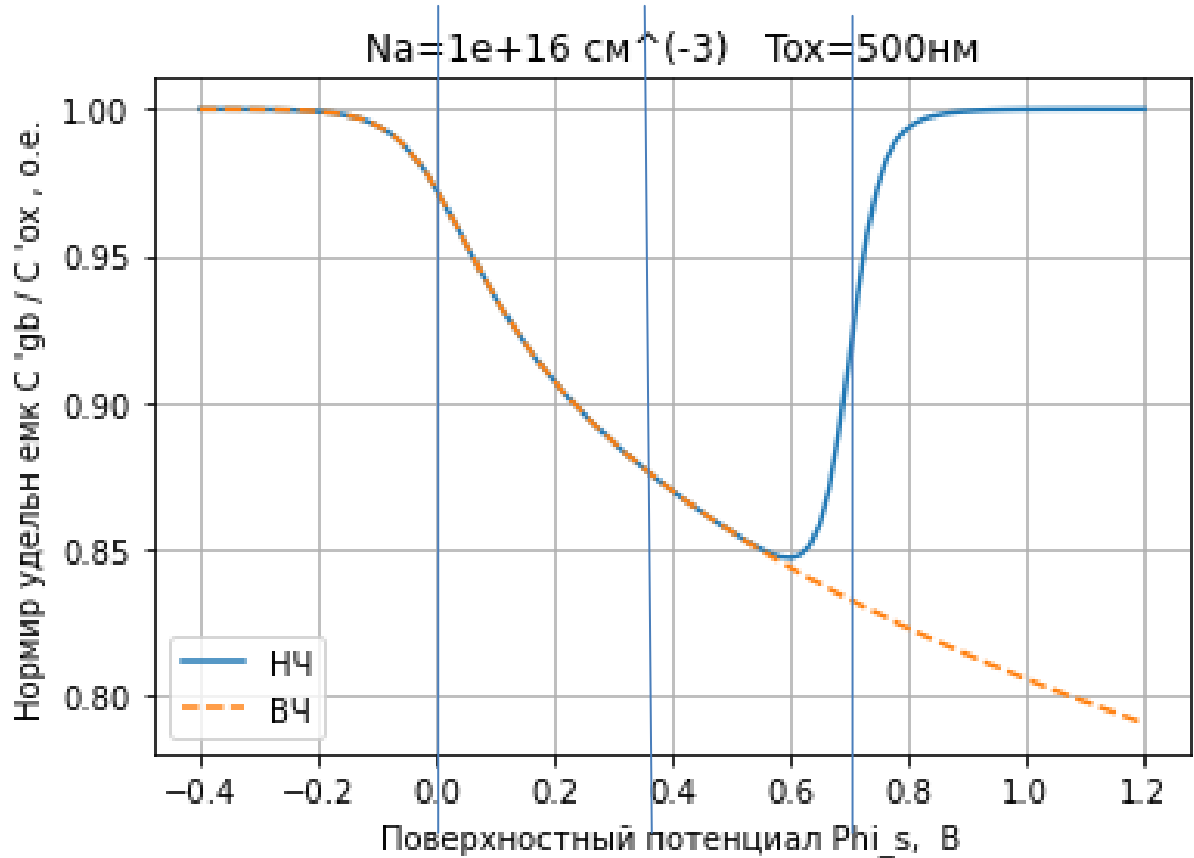


Рис.6.2 Зависимость нормированной удельной емкости C'_{eq}/C'_{ox} p- МОП структуры от поверхностного потенциала φ_s на НЧ (синяя) и ВЧ (красная)

Результаты моделирования вольт- емкостных характеристик при различных концентрациях легирующей примеси от 1×10^{14} до $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, толщине оксида 300 нм и температуре 300К приведены на рис. 2.4

Результаты моделирования нормированной удельной емкости от напряжения затвор-подложка приведены на рис.2.3.

3.ВОЛЬТ-ФАРАДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОП СТРУКТУРЫ

Результаты измерения вольт-фарадных характеристик на были получены на измерителе RCL E7-11 рис.7.1 с подключением внешнего линейного непрерывного блока питания, для того чтобы иметь возможность задать напряжение смещения. E7-11 является универсальным измерителем предназначенным для проведения замеров индуктивности, емкости, сопротивления и других параметров электрических компонентов и так же применяется для осуществления их ремонта. И пользуется в диапазоне частот от 100 до 1000 Гц с возможностью наведения мостов от источника наружного питания, работает от сети 50Гц и 220В, либо 400Гц и 115В. В основе работы прибора заложен мостовой метод измерения. Все данные были занесены в Excel и представлены на рис. 7.2. для структур n- и p- типа



Рис.7.1 Измеритель RCL характеристик E7-11

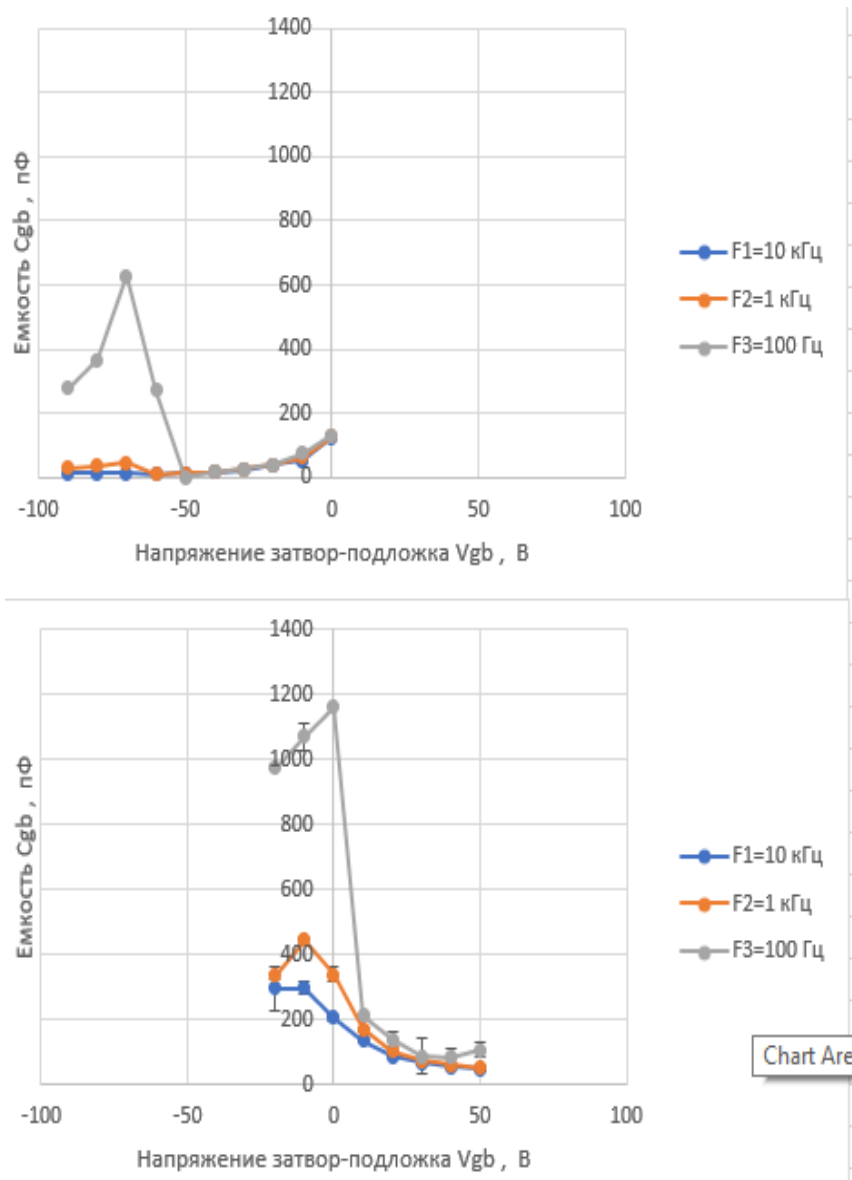


Рис.7.2 Результаты измерения вольт-фарядных характеристик на LCR – метре для структур n- типа (вверху) и p- типа (внизу)

Увеличенные фрагменты графиков (режим обеднения и слабой инверсии) представлены на рисунке 7.3.

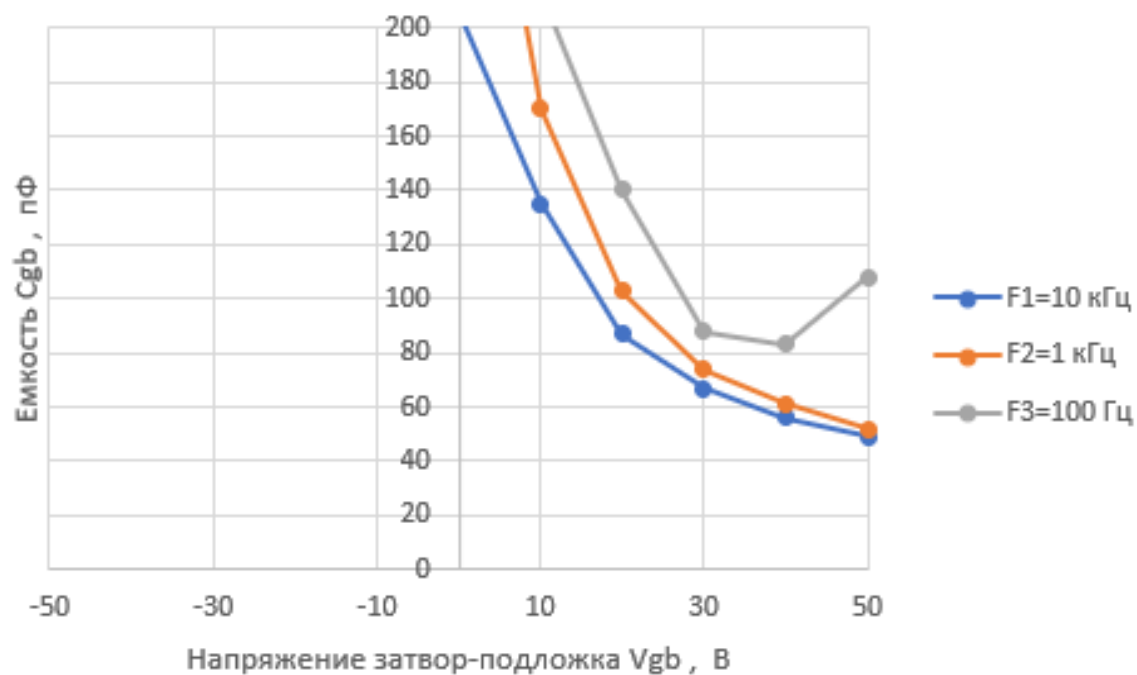
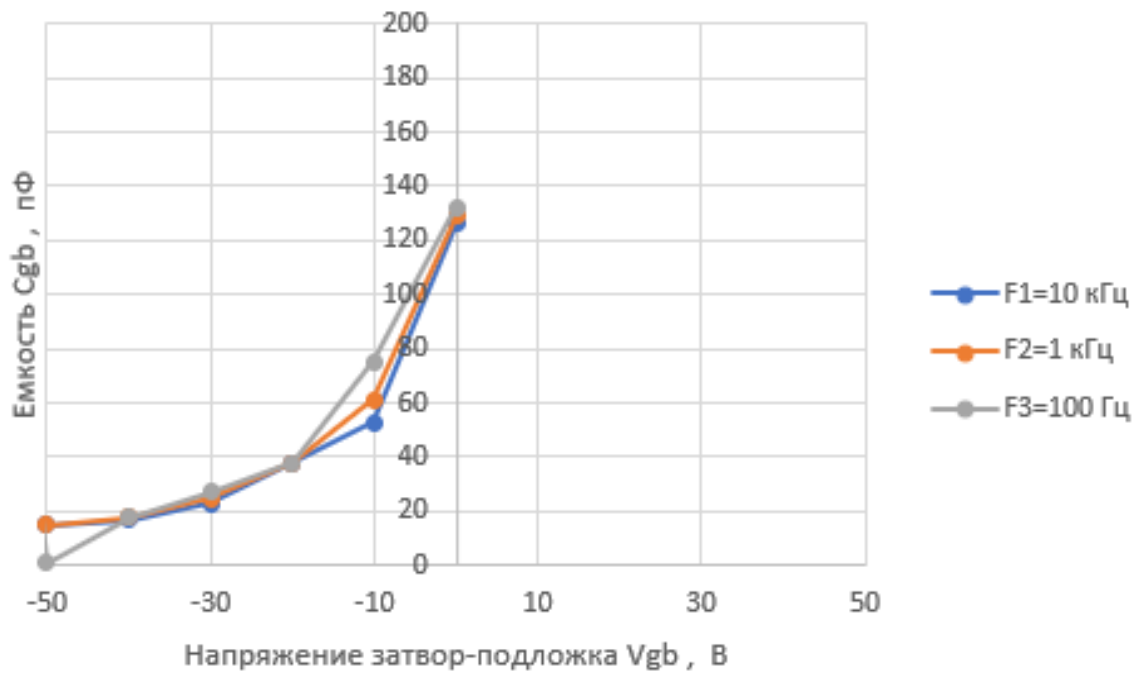


Рис.7.3.Увеличенные фрагменты графиков (режим обеднения и слабой инверсии)

Рис. 7.2 Зависимость дифференциальной емкости от приложенного напряжения при трех значениях частот зондирующего сигнала

Эта же зависимость, построенная средствами Python, показана на рис. 7.4

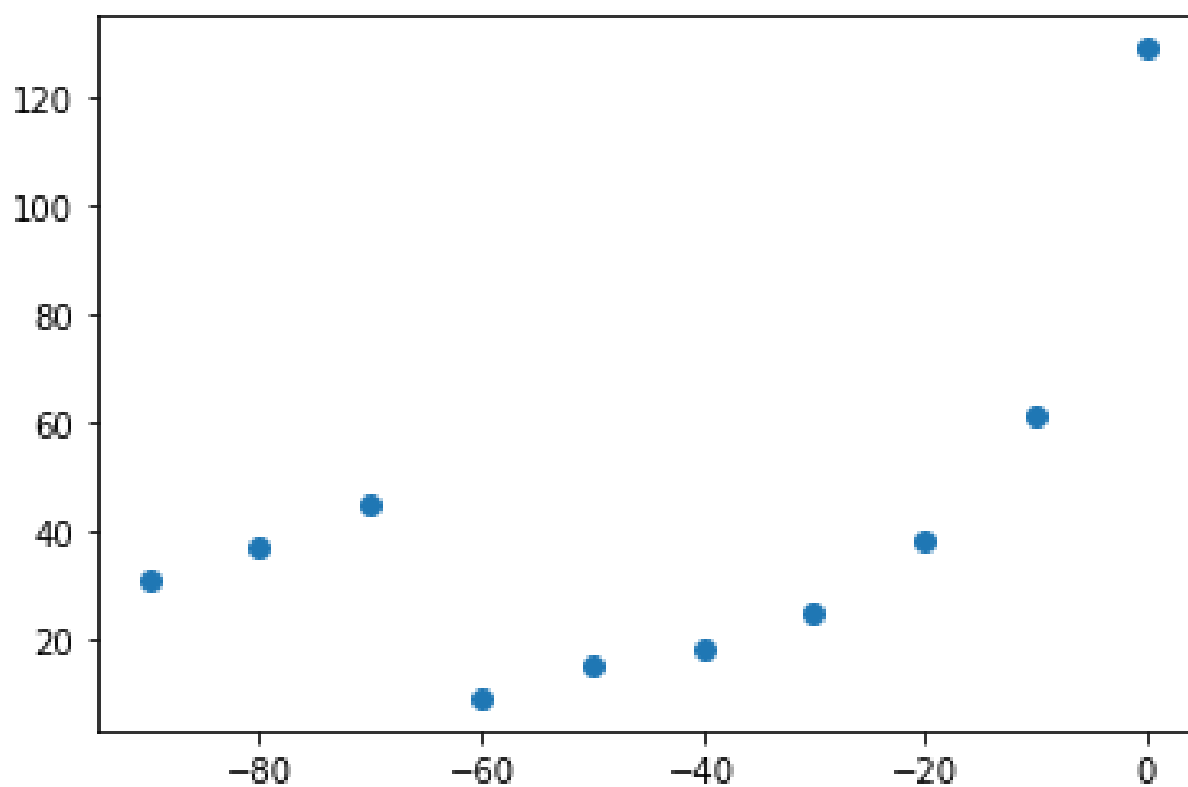


Рис. 7.4 Зависимость дифференциальной емкости от приложенного напряжения построенная средствами Python.

Заключение.

В данной работе были рассмотрены и проделаны все операции производства МОП структур, проведено математическое моделирование вольт-фарадных характеристик в системе Python и замеры реальных структур. Проведен ряд экспериментов по воссозданию процессов применяемых в данной тематике. В результате проведенных работ были освоены как теоретические, так и практические навыки создания структур на основе кремния. Получен опыт в отработке технологических операций, математические и эмпирические модель ВФХ. В результате их сопоставления было установлено, что моделирование достаточно точно описывает поведение структуры.

Список литературы.

1. Ануфриев, Д.Л. Конструкционные методы повышения надёжности интегральных схем/Д.Л. Ануфриев, М.И. Горлов, А.П. Достанко. – Минск: Интегралполиграф, 2007. – 264 с.
2. Бер, А.Ю. Сборка полупроводниковых приборов и интегральных микросхем/ А. Ю. Бер, Ф.Е. Минскер – М.: Высшая школа, 1986. – 279 с.
3. Бочкин, О.Ч. Механическая обработка полупроводниковых материалов/ О.Ч. Бочкин, В.А. Брук, Т.М. Никифорова-Денисова – М.: Высшая школа, 1977.– 140 с.
4. Горлов, М.И. Обеспечение и повышение надёжности полупроводниковых изделий в процессе серийного производства/М.И. Горлов, Л.П. Ануфриев – Минск: Бестпринт, 2003. – 202 с.
5. Емельянов, В. А. Технология микромонтажа интегральных схем/В.А. Емельянов – Минск: Бел наука, 2002. – 335 с.
6. Емельянов, В. А. Эпитаксиальные слои кремния и германия для интегральных микросхем/В.А. Емельянов, А.С. Турцевич, О.Ю. Наливайко – Минск.: Интегралполиграф, 2008. – 288 с.
7. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн. 1. Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
8. Козырь И. Я. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. В 10 кн.: Кн. 1. Общая технология / И.Я. Козырь, Ю.И. Горбунов и др. – М.: Высш. шк., 1989. – 233 с.
9. Минайчев, В.Е. Нанесение пленок в вакууме. Кн. 6 / В.Е. Минайчев – М.: Высшая школа, 1989. – 110 с.
10. Парфенов, О.Д. Технология микросхем / О.Д. Парфенов – М.: Высшая школа, 1986. – 320 с.
11. Ченг, Л. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры Пер. с англ./ Под ред. Л. Ченга, К. Плога. – М.: Мир, 1989. – 584 с.