

Министерство образования и науки Российской Федерации

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

Кафедра физики твердого тела

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТ-ФАРАДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОП
СТРУКТУРЫ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 411 группы

направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Бурлакова Никиты Сергеевича

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

М.Ю.Калинкин

подпись, дата

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

Д.А.Усанов

подпись, дата

инициалы, фамилия

Саратов, 2017

ВВЕДЕНИЕ

Основная причина изучения металл – оксид – полупроводниковых структур (МОП-структур) заключается в том, что данные структуры являются основой современной базы микроэлектроники.

Схемы на МОП-транзисторах составляют в настоящее время значительную часть изделий, выпускаемых электронной промышленностью. На их основе строится большинство интегральных схем с сверх большой и большой степенью интеграции. Схемы на МОП-транзисторах занимают доминирующее положение при создании таких функционально законченных изделий, как постоянные и оперативные запоминающие устройства, микроконтроллеры, микропроцессоры, АЦП, ЦАП и т.д.

Благодаря своей высокой надежности и большой функциональной сложности МОП СБИС позволяют строить более дешевую аппаратуру. При равной функциональной сложности они имеют меньшие геометрические размеры, чем схемы на биполярных транзисторах, а процесс их изготовления, как правило, проще, чем технология схем на биполярных приборах. Значительным достоинством МОП ИС является и то, что их применение в устройствах позволяет повысить надежность и сложность последних, а также предсказывать параметры разрабатываемых на их основе систем [1].

При технологическом изготовлении необходимо контролировать характеристики полученных полупроводниковых структур, в частности, концентрацию легированной примеси в полупроводниковой подложки исходя из исследования вольт-фарадной характеристики (ВФХ).

Цель данной бакалавровской работы – рассчитать основные параметры МДП структуры как по алгоритму для модели идеального МОП конденсатора, так и с помощью компьютерного моделирования.

Задачи:

1. Произвести оценку некоторых основных параметров МДП структуры.
2. Выполнить компьютерное моделирование ВФХ.
3. Осуществить эксперимент по определению ВФХ с использованием автоматизированной системы научных исследований NI ELVIS.

Основные главы:

1. Конденсатор структуры "металл - диэлектрик - полупроводник"
2. Электростатический анализ структуры МОП
3. Решение уравнения Пуассона для МОП-конденсатора
4. Математическое моделирование зависимости емкости МОП конденсатора в режиме малого сигнала
5. Экспериментальные исследования вольт-фарадной характеристики и сравнение с теоретическим исследованием

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Для проведения эксперимента использовалась установка для автоматического измерения вольт-емкостных характеристик полупроводниковых структур ИППМ-2. Для снятия вольт-емкостных характеристик на рабочем столике была установлена измеряемая структура. МОП структура была изготовлена в учебно-научной лаборатории микроэлектроники и использовалась для проведения исследования лабораторного практикума. Был установлен предел напряжения 20В. Предварительно вращая ручку изменения напряжения производилась диагностика МОП структуры на правильность работы.

Ход эксперимента.

Для автоматизации измерения к данному устройству была подключена лабораторно измерительная станция NI-ELVIS (Education Laboratory Virtual Instrumentation). Захват сигнала производился по двум каналам. По первому каналу записывалось напряжение подаваемое на затвор структуры, а по второму каналу передавался сигнал емкости(в вольтах). Для калибровки емкости измерялся сигнал при подключенной эталонной емкости в размере 100пф. В среде разработки LabVIEW (англ. Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) была написана программа по захвату сигнала(DAQ – assistant),

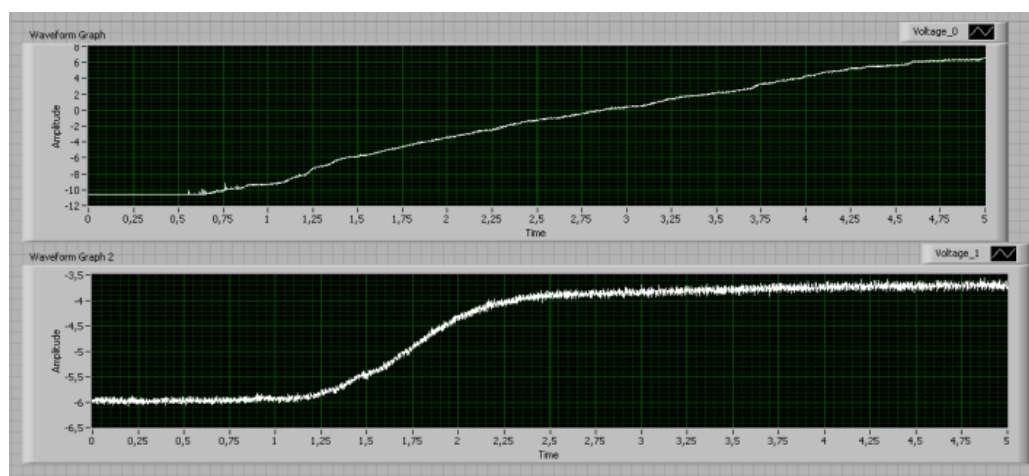


Рисунок 18. Экспериментальные исследования вольт-фарадной характеристики (напряжение на структуре (В) от времени – верхний, сигнал (В), пропорциональный емкости (пф) структуры, от времени – нижний графики

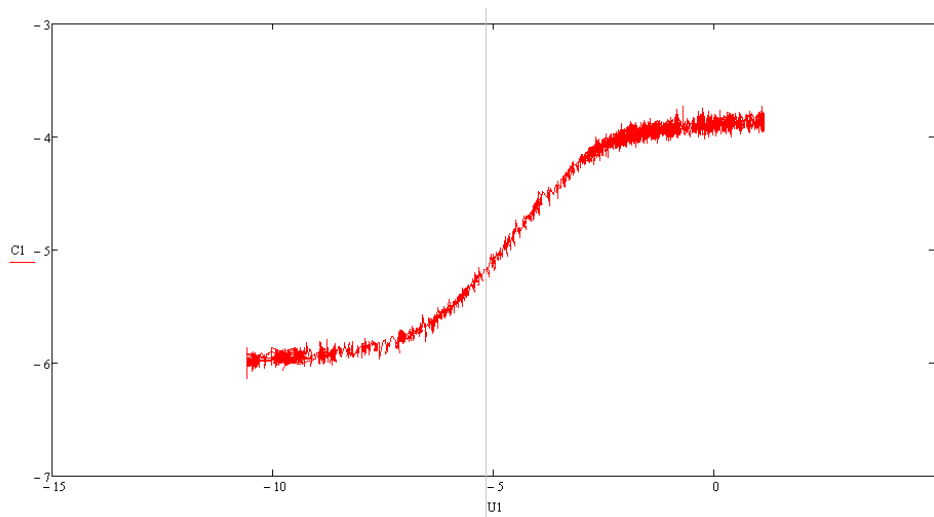


Рисунок 19. ВФХ МОП структуры с полупроводниковой подложкой n-типа (сигнал в В, пропорциональный емкости структуры в пФ, – напряжение, приложенное к структуре)

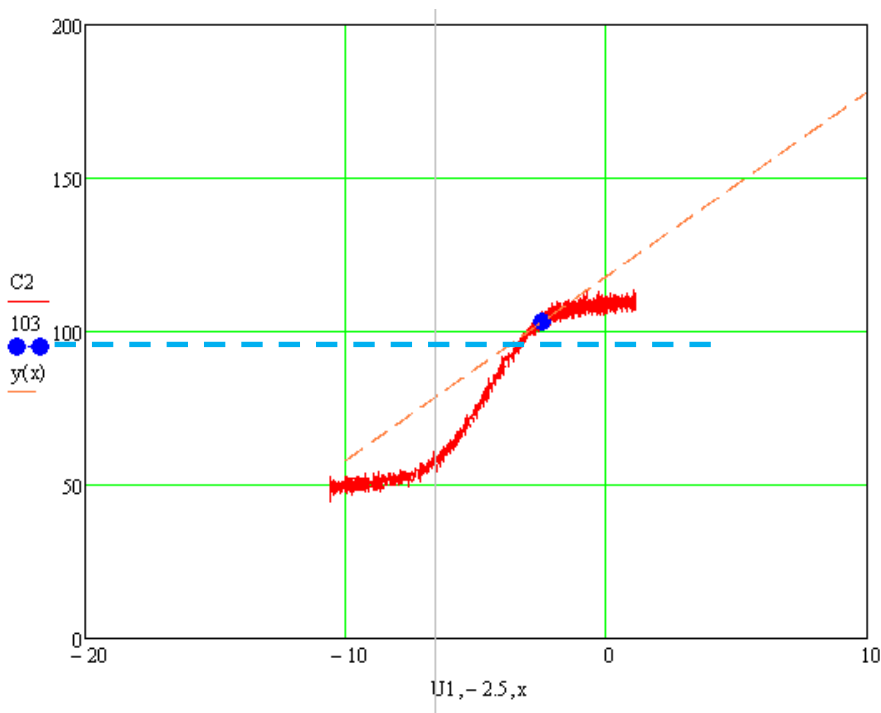


Рисунок 20. Обработка результатов исследования ВФХ (ёмкость в пф – напряжение в В) с геометрическим построением C_{max} (синий пунктир)

Произвели оценку некоторых параметров МДП структуры по алгоритму:

1. Измерили площадь напыленного контакта над окислом:

$$S = 1,13 \text{ мм}^2 \text{ Место для формулы.} \quad (58)$$

2. По максимальному значению измеренной емкости C_{max} определили толщину пленки окисла :

$$d = \frac{kS(\text{мм}^2)}{C_{\text{max}}(\text{пф})} = \frac{34 * 1,13}{120} = 0,32 \text{мк} \quad (59)$$

Где C_{max} (пф) определили из рисунка 11, $k=34$ для термической пленки SiO_2 .

3. По номограмме №1.1а (приложение к прибору ИППМ – 2), для режима сильной инверсии и по известным величинам d и отношения $C_{\text{min}}/C_{\text{max}}$, взятого из вольт-емкостной характеристики (рисунок 11) определили концентрацию легирующей примеси N_b в приповерхностном слое полупроводника

$$N_b = 4 * 10^{15} \text{ 1/см}^3 \quad (60)$$

4. Для полученной концентрации и данной толщины окисла ($\frac{C_{fb}}{C_{ok}} = 0,94$) по номограмме №2 определили величину емкости в точке плоских зон

$$C_{fb} = 0,94 * 120 = 112,8 \text{пф} \quad (61)$$

5. По экспериментальной вольт-емкостной характеристике, зная C_{fb} , определили напряжение плоских зон структуры

$$U_{fb} = -0,5 \text{В} \quad (62)$$

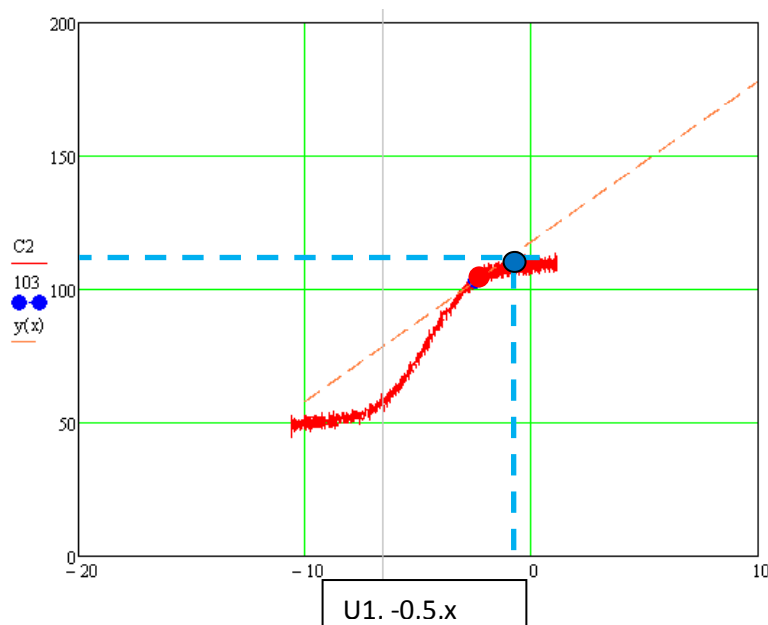


Рисунок 21. Обработка результатов исследования ВФХ (ёмкость в пф – напряжение в В) с геометрическим построением напряжения плоских зон (синий пунктир)

6. Рассчитали плотность полного заряда на границе раздела с диэлектриком по формуле:

$$Q_s = \frac{C_{max}(\text{пФ})}{S(\text{мм}^2)} * V_{fb}(\text{В}) * 10^{-10} = 2,43 * 10^{-8} \text{К/см}^2 \quad (63)$$

Математически смоделировали ВФХ МОП структуры:

Используемые константы:

$q := 1.6 \cdot 10^{-19}$	заряд электрона	+
$\epsilon_0 := 8.845 \cdot 10^{-10}$	диэлектрическая проницаемость вакуума	
$\epsilon_{si} := 11.7 \cdot \epsilon_0$	диэлектрическая проницаемость Si	
$\epsilon_{ox} := 3.97 \cdot \epsilon_0$	диэлектрическая проницаемость SiO ₂	
$T := 300$	температура	
$n_i := 1.45 \cdot 10^{10}$	концентрация собственных носителей	
$k := 1.38 \cdot 10^{-23}$	постоянная Больцмана	
$PIt := k \cdot \frac{T}{q}$	температурный потенциал	
		PIt = 0.026
$N_b := 4 \cdot 10^{15}$	объемная концентрация примеси	
$T_{ox} := 350 \cdot 10^{-9}$	толщина подзатворного окисла	
$PIf := PIt \cdot \log\left(\frac{N_b}{n_i}\right)$	разность потенциалов между уровнем Ферми в собственном и уровнем Ферми в легированном полупроводниках	
$C_{ox} := \frac{\epsilon_{ox}}{T_{ox}}$	полная емкость окисла	

Расчет производился по формулам:

```

Cgb := for n ∈ 0..50
  if PIsn < 0
    An ← 1 - e- $\frac{PIs_n}{PIt}$  + e $\left(-2 \cdot \frac{PIf}{PIt}\right) \cdot \frac{PIs_n}{PIt} - 1$ 
    Bn ← 2 · √ $\left[ \frac{-PIs_n}{PIt \cdot e^{\frac{-PIs_n}{PIt}} + PIs_n - PIt + e^{-2 \cdot \frac{PIf}{PIt} \cdot \left(\frac{PIs_n}{PIt} - PIs_n - PIt\right)}} \right]$ 
    Ccn ← -√ $2 \cdot q \cdot esi \cdot Nb \cdot \left(\frac{A_n}{B_n}\right)$ 
  if PIsn ≥ 0
    An ← 1 - e- $\frac{PIs_n}{PIt}$  + e $\left(-2 \cdot \frac{PIf}{PIt}\right) \cdot \frac{PIs_n}{PIt} - 1$ 
    Bn ← 2 · √ $\left[ \frac{-PIs_n}{PIt \cdot e^{\frac{-PIs_n}{PIt}} + PIs_n - PIt + e^{-2 \cdot \frac{PIf}{PIt} \cdot \left(\frac{PIs_n}{PIt} - PIs_n - PIt\right)}} \right]$ 
    Ccn ← √ $2 \cdot q \cdot esi \cdot Nb \cdot \left(\frac{A_n}{B_n}\right)$ 
    Cgbn ←  $\frac{Cox \cdot Cc_n}{Cox + Cc_n}$ 
  Cgbn

```

При выводе теоретического графика было проведено его смещение вдоль горизонтального направления(оси напряжений) на величину -0.5В. Что привело к относительно хорошему согласованию теоретического и экспериментального графиков.

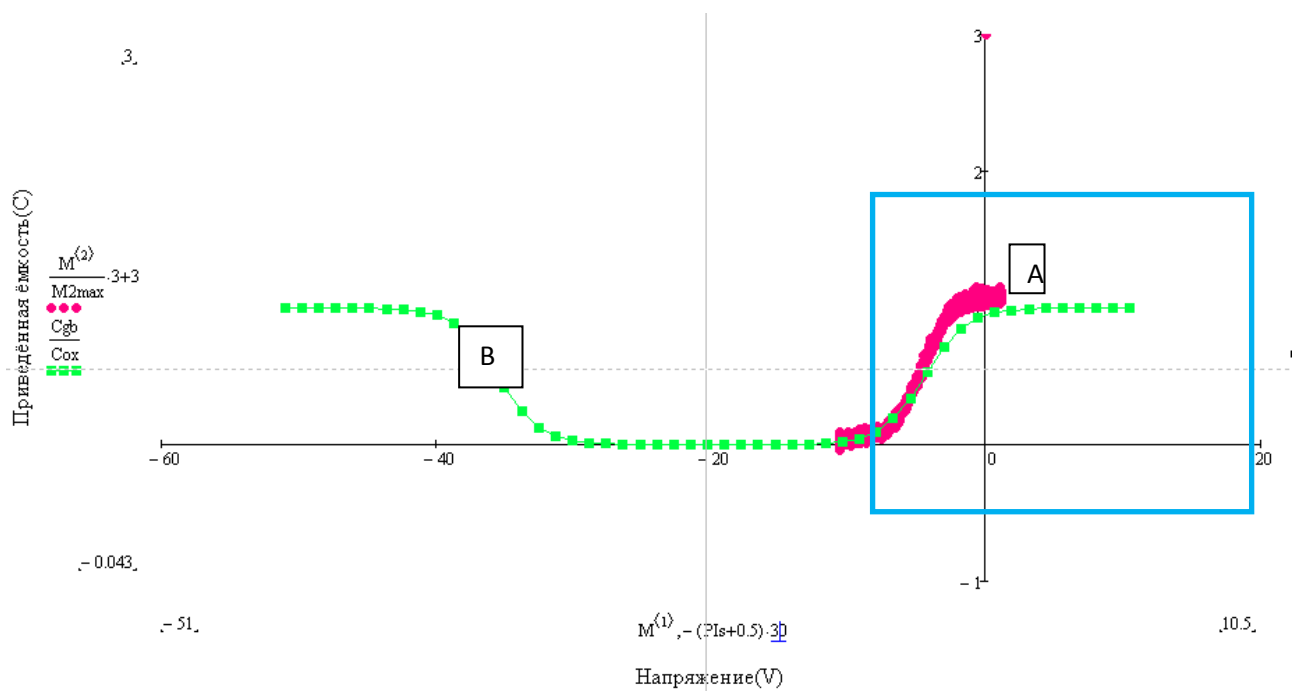


Рисунок 22. Наложение экспериментально измеренной вольт – фарадной характеристики (А) на теоретически рассчитанную (В), нормированных на максимальное значение

Как видно из рисунка 22 в областях обогащения и обеднения (синяя рамка) наблюдается относительно хорошее согласование хода графиков. При уменьшении приложенного напряжения как теоретически так и экспериментальный графики монотонно убывают, что говорит о соответствующем уменьшении емкости. Заметим, что напряжение плоских зон для идеальной структуры должно быть равно нулю, в то время как напряжение плоских зон для реальной МОП структуры оказалось равным, согласно аналитическим расчетам $-0,5\text{В}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Произвели оценку основных параметров МДП структуры по алгоритму модели идеальной МОП структуры. Для МОП структуры с n-типом полупроводника были проведены измерения: толщины окисла $T_{ox}=320\text{nm}$, концентрации примеси $N_A = 4,0 * 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, емкости плоских зон $C_{fb} = 112,8\text{пФ}$ и напряжения плоских зон $U_{fb} = -0,5\text{В}$.

2. Выполнено компьютерное моделирование вольт-емкостной характеристики, и результаты экспериментальных исследований были наложены на теоретические. В областях обогащения и обеднения наблюдается относительно хорошее согласование хода графиков. При уменьшении приложенного напряжения как теоретический, так и экспериментальный графики монотонно убывают, что говорит о соответствующем уменьшении емкости структуры.