

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра физики твердого тела  
наименование кафедры

**Моделирование высокочастотных вольт-фарадных характеристик МОП  
структур**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 201 группы  
направления (специальности) 11.04.04 Электроника и наноэлектроника  
профиль «Диагностика нано- и биомедицинских систем»  
код и наименование направления (специальности)  
факультета нано- и биомедицинских технологий  
наименование факультета, института, колледжа  
Олопе Олумиде Инносент  
фамилия, имя, отчество

Научный руководитель  
доцент, к.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

подпись, дата

М.Ю. Калинин

инициалы, фамилия

Ал.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2020

## ВВЕДЕНИЕ

Метод контроля C-V характеристик является *актуальным* и применяется при создании СБИС. Например, при проведении термополевых испытаний этим методом определяют стабильность подзатворного диэлектрика. Измерения могут показать, сдвигается ли напряжение плоских зон и на какую величину.

*Целью* работы явилось исследование особенности вольтфарадных характеристик кремниевых металл-окисел-полупроводниковых (МОП) структур на высокой частоте, связанных с полным зарядом (зарядом на границе раздела плюс зарядом в диэлектрике).

*Задачи:*

1. Теоретически описать физические процессы неидеальной структуры металл-окисел-полупроводник.
2. Провести компьютерное моделирование вольт-емкостной характеристики идеальной МОП структуры с помощью математического пакета Scilab.
3. Экспериментально исследовать зависимость дифференциальной емкости на частоте 1 МГц от напряжения смещения МОП структур p- и n – типов.

В качестве материала исследования использовались кремниевые пластины p- и n – типа с напыленным на непланарную сторону алюминиевым омическим контактом. Пластины на планарной стороне имели слой оксида и вакуумно напыленные поверх оксида через маску алюминиевые затворы квадратной формы  $1,0 \times 1,0 \text{ мм}^2$

Выпускная работа состоит из списка сокращений, введения, главы 1. Обзор литературы, главы 2. Исследуемые МОП структуры и экспериментальная установка, главы 3. Результаты экспериментов, заключения, списка используемых источников и приложения с программным кодом на языке Scilab.

В работе проведено компьютерное моделирование вольт – емкостных характеристик в математическом пакете Scilab (ссылка на код программы:

<https://yadi.sk/d/MiMdn1l8m1RR0g>). Исследована особенность поведения вольт-фарадных характеристик реальных МОП структур, проявляющаяся в растяжении графика вдоль оси напряжений. Эта особенность подтверждается компьютерным моделированием, и связана с наличием полного заряда на границе и в диэлектрике. *Научная новизна* исследования заключается в том, что на экспериментальной ВФХ обнаружен участок слабого изменения (плато), в области обогащения.

*Положения, выносимые на защиту:*

- Процесс калибровки установки автоматического измерения вольт-емкостных характеристик ИППМ-2 модернизирован с помощью сконструированного модуля переключения эталонной емкости.
- Наложение экспериментальной вольт – фарадной характеристики на теоретическую показывает, что наличие ненулевого напряжения плоских зон приводит как к смещению вольт-фарадной характеристики, так и к растяжению ее вдоль оси напряжений.
- На экспериментальной ВФХ обнаружен участок слабого изменения (плато), в области обогащения, что говорит о неизменности полного заряда при изменении напряжения затвор- подложка и, возможно, связанного с наличием поверхностных состояний, либо встроенного в диэлектрик заряда.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**1.Обзор литературы.** Метод контроля C-V характеристик является *актуальным* [1-3]. Физика работы МОП структуры подробно рассмотрена в [4-5]. Математическое моделирование физических процессов с помощью пакета Matlab приведено в [6]. Методы контроля характеристик МОП структуры по ВЧ вольт-фарадной характеристики описаны в [7-9]

Моделирование зависимости удельной емкости  $C'_{eq}$  МОП структуры от поверхностного напряжения затвор-подложка  $V_{gb}$  на ВЧ проводилось при следующих значениях констант и параметров [6]:

|                                                        |                                                          |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл                            | -заряд электрона                                         |
| $n_i = 1,45 \cdot 10^{10}$ см <sup>-3</sup>            | -собственная концентрация электронов в кремнии           |
| $N_a = 1.0 \cdot 10^{16}$ см <sup>-3</sup>             | -концентрация акцепторной примеси                        |
| $N_d = 1.0 \cdot 10^{16}$ см <sup>-3</sup>             | -концентрация донорной примеси                           |
| $T = 300$ К                                            | - термодинамическая температура                          |
| $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К                         | - постоянная Больцмана                                   |
| $-1,2\text{В} < \varphi_s < 1,2\text{В}$               | -поверхностный потенциал                                 |
| $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-14}$ Ф/см <sup>-1</sup> | -электрическая постоянная                                |
| $\epsilon_{Si} = 11,7\epsilon_0$                       | -абсолютная диэлектрическая проницаемость кремния        |
| $\epsilon_{Ox} = 3,97\epsilon_0$                       | -абсолютная диэлектрическая проницаемость оксида кремния |
| $T_{ox} = 500 \cdot 10^{-7}$ см                        | - толщина оксида                                         |

по формулам, выражающим больцмановское приближение функции распределения, уравнение электронейтральности, решение уравнения Пуассона для плотности объемного заряда вблизи поверхности и определение дифференциальной емкости через заряд:

|                                                 |                                                                                                                |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\varphi_t = kT/q$                              | - температурный потенциал                                                                                      |
| $\varphi_f = \varphi_t \cdot \ln(N_a/n_i)$      | - разность потенциалов уровня Ферми и уровня Ферми собственного полупроводника р-типа                          |
| $\varphi_f = -\varphi_t \cdot \ln(N_d/n_i)$     | - то же для полупроводника n-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) |

$$p_{n0} = n_i \cdot \exp(\varphi_f/\varphi_t)$$

- равновесная концентрация дырок в полупроводнике n- типа (Hole concentration at thermal equilibrium)

$$n_{n0} = n_i \cdot \exp(-\varphi_f/\varphi_t)$$

- равновесная концентрация электронов в полупроводнике n- типа (Electron concentration at thermal equilibrium)

$$A_{HF} = 1 - \exp(-\varphi_s/\varphi_t) + \exp(-2\varphi_f/\varphi_t) \cdot (0 \cdot \exp(\varphi_s/\varphi_t) - 1)$$

- для p- типа

$$B_{HF} = 2 \cdot \left( \varphi_t \cdot \exp(-\varphi_s/\varphi_t) + \varphi_s - \varphi_t + \exp(-2\varphi_f/\varphi_t) \cdot (0 \cdot \varphi_t \cdot \exp(-\varphi_s/\varphi_t) + 0 \cdot \varphi_s - \varphi_t) \right)^{1/2}$$

- для p- типа

$$A_{HF} = -1 + \exp(-\varphi_s/\varphi_t) + \exp(2\varphi_f/\varphi_t) \cdot (0 \cdot \exp(\varphi_s/\varphi_t) - 1)$$

- для n- типа

$$B_{HF} = 2 \cdot \left( \varphi_t \cdot \exp(\varphi_s/\varphi_t) - \varphi_s - \varphi_t + \exp(2\varphi_f/\varphi_t) \cdot (0 \cdot \varphi_t \cdot \exp(-\varphi_s/\varphi_t) + 0 \cdot \varphi_s - \varphi_t) \right)^{1/2}$$

- для n- типа

$$C'_{sc} = (2 \cdot q \cdot \epsilon_{Si} \cdot N_a)^{1/2} \cdot A_{HF}/B_{HF}, \text{ если}$$

- удельная емкость полупроводника

$$\varphi_s > 0$$

$$C'_{sc} = -(2 \cdot q \cdot \epsilon_{Si} \cdot N_a)^{1/2} \cdot A_{HF}/B_{HF},$$

$$\text{если } \varphi_s < 0$$

|                                                                                                                                                                                                                |                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| $C'_{ox} = \epsilon_{ox}/T_{ox}$                                                                                                                                                                               | - удельная емкость оксида               |
| $C'_{eq} = C'_{ox} \cdot C'_{sc}/(C'_{ox} + C'_{sc})$                                                                                                                                                          | - удельная емкость МОП структуры        |
| $B = 2 \cdot \left( \varphi_t \cdot \exp(-\varphi_s/\varphi_t) + \varphi_s - \varphi_t + \exp(-2\varphi_f/\varphi_t) \cdot (\varphi_t \cdot \exp(-\varphi_s/\varphi_t) + \varphi_s - \varphi_t) \right)^{1/2}$ | - для p- типа                           |
| $B = 2 \cdot \left( \varphi_t \cdot \exp(\varphi_s/\varphi_t) - \varphi_s - \varphi_t + \exp(2\varphi_f/\varphi_t) \cdot (\varphi_t \cdot \exp(-\varphi_s/\varphi_t) + \varphi_s - \varphi_t) \right)^{1/2}$   | - для n- типа                           |
| $F_{Si0} = (2 \cdot q \cdot N_a \cdot \varphi_t/\epsilon_{Si})^{1/2} \cdot B/(2\sqrt{\varphi_t})$ ,<br>если $\varphi_s > 0$                                                                                    | - напряженность поля вблизи поверхности |
| $F_{Si0} = -(2 \cdot q \cdot N_a \cdot \varphi_t/\epsilon_{Si})^{1/2} \cdot B/(2\sqrt{\varphi_t})$ ,<br>если $\varphi_s < 0$                                                                                   |                                         |
| $V_{gb} = (\epsilon_{Si}/\epsilon_{ox}) \cdot F_{Si0} \cdot T_{ox} + \varphi_s$                                                                                                                                | -напряжение затвор - подложка           |

Ниже приведены результаты моделирования.

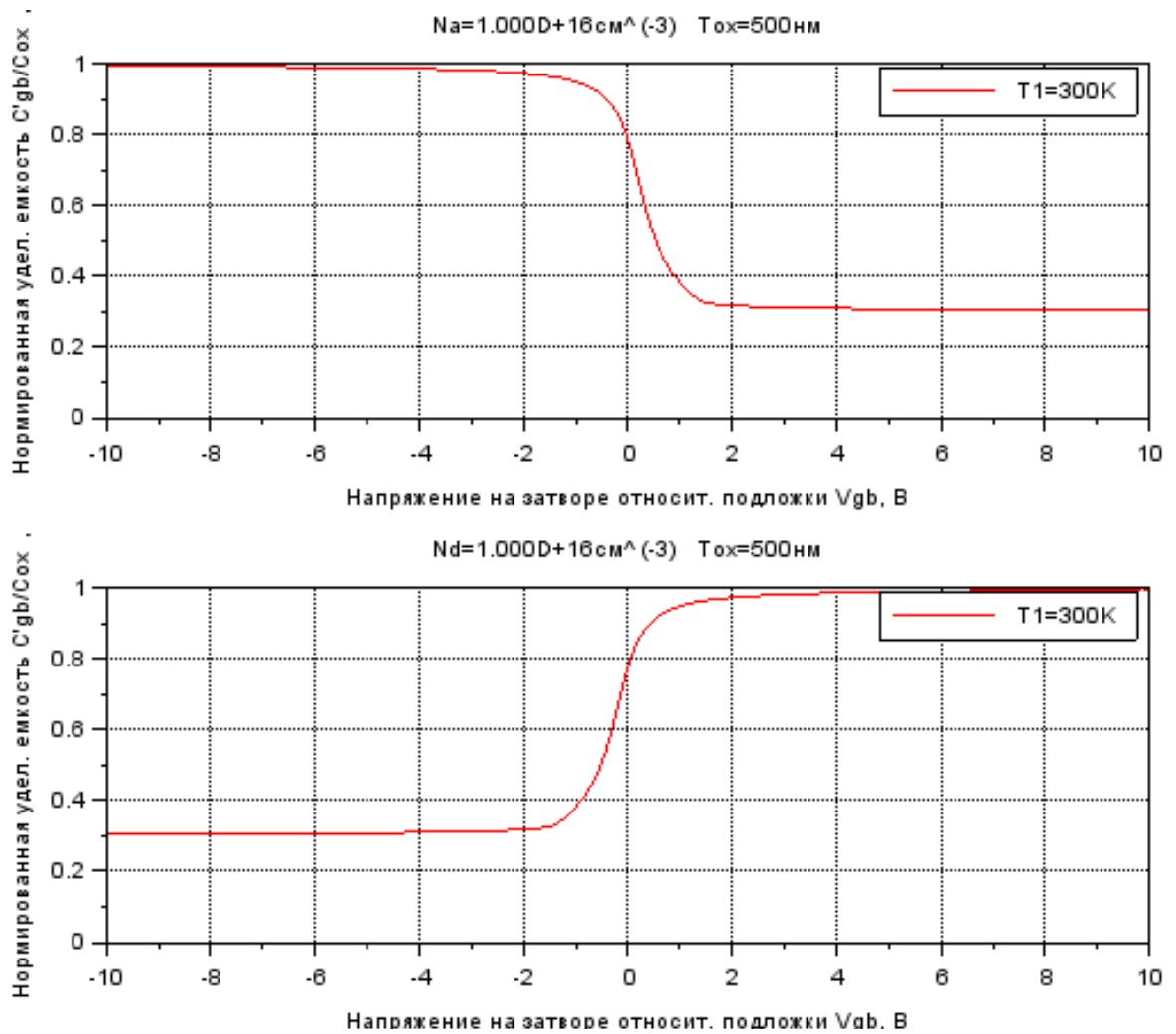


Рис.1. Зависимость нормированной удельной емкости от напряжения затвор-подложка для p- типа (вверху) и n – типа (внизу)

**2. Исследуемые МОП структуры и экспериментальная установка.** На рисунке приведена планарная поверхность исследуемой МОП структуры до и после припаивания с помощью индия микропроволочных контактов

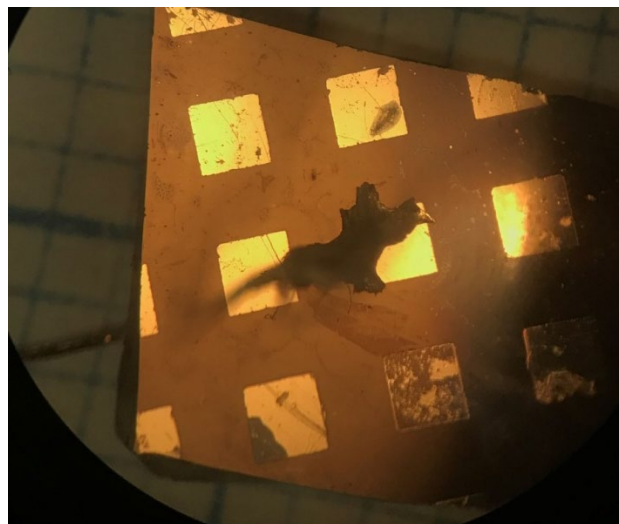
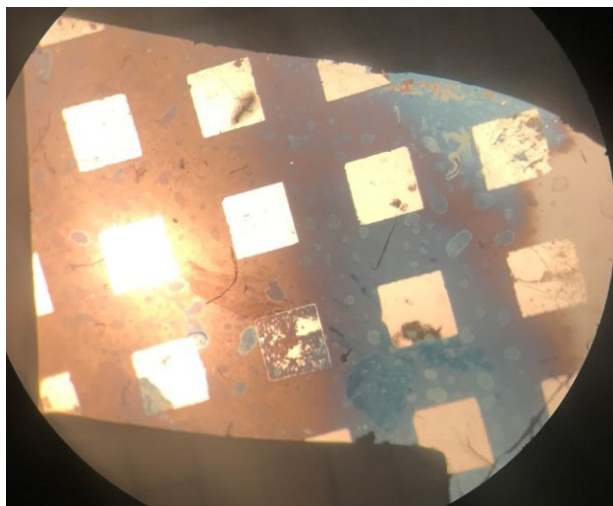


Рис. 2. Увеличенное изображение планарной стороны кремниевой МОП структуры с алюминиевыми затворами (слева). Планарная сторона с припаянной с помощью индия микропроволокой к одному из затворов (справа)

Исследования проводились на установке [8] для автоматического измерения вольт-емкостных характеристик полупроводниковых структур ИППМ-2. Установка состоит из генератора сигнала 1 МГц амплитудой 10 мВ, блока постоянного смещения от -20В до 20В, RC – цепи, благодаря АЧХ которой формируется выходной сигнал, зависящий от величины измеряемой емкости, усилителя и детектора.

Для возможности проведения калибровки во время длительных измерений без извлечения рабочего столика с образцом из установки была сконструирована схема переключателя калибровки. Такая модернизация позволяет повысить точность измерений.



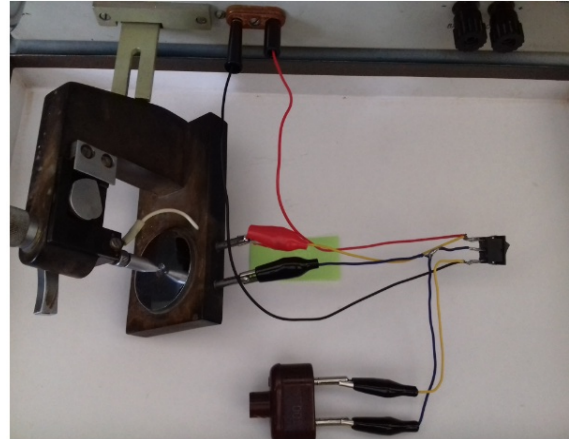
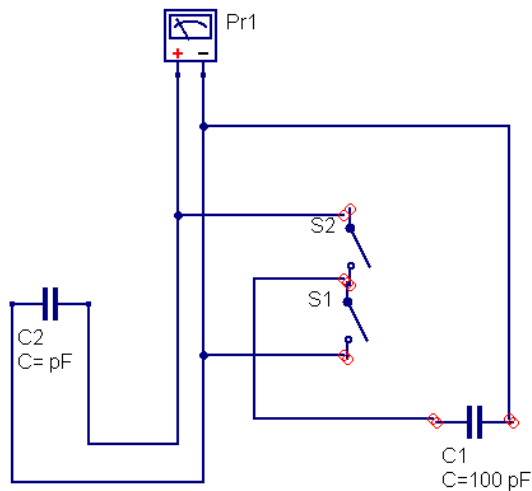


Рис. 3. Принципиальная схема (слева) и сконструированный переключатель калибровки (справа) C1- эталонный калибровочный конденсатор 100 пФ, C2- неизвестная емкость образца, которую нужно измерить, S1, S2 - переключатели (совмещенные в одном), Pr1 - вход измерительной установки ИППМ-2 (клеммы рабочего столика)

**3. Результаты экспериментов.** На рис. 3.2. показана экспериментальная вольт-ёмкостная характеристика.

Толщина пленки окисла [7-9]:  $d = \frac{kS(\text{мм}^2)}{C_{\text{max}}(\text{пФ})} = 0,22$  (мкм), где:  $S = 1,0$  мм<sup>2</sup>- площадь напыленного контакта;  $k = 34$  для термической пленки  $\text{SiO}_2$ ;  $C_{\text{max}} = 158$  пФ.

По известной величине  $d$  и отношению  $\frac{C_{\text{min}}}{C_{\text{max}}}$ , взятому из вольт-ёмкостной характеристики, определили концентрацию легирующей примеси в приповерхностном слое полупроводника по номограмме № 1 руководства [8]:  $N = 1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$

Для полученной концентрации и данной толщины окисла по номограмме № 2 определили величину ёмкости в точке плоских зон:  $\frac{C_{\text{FB}}}{C_{\text{OK}}} = 0,6$  ( $C_{\text{OK}} = C_{\text{max}}$ ).

По экспериментальной вольт-ёмкостной характеристике, зная  $C_{\text{FB}}/C_{\text{OK}}$ , определили напряжение плоских зон структуры  $V_{\text{FB}} = 2,0$  В.

В Scilab провели математическое моделирование фундаментальных уравнений, описывающих процессы в полупроводнике, при полученных из эксперимента значениях толщины окисла, концентрации примеси и пяти значениях коэффициента растяжения вдоль оси напряжений графика вольт-фарадной характеристики.

Ниже приведены результаты измерений вольт – фарадной характеристики с наложением на нее смоделированных зависимостей с разным коэффициентом растяжения. Наилучшее согласование между экспериментальным и теоретическим графиком происходит при коэффициенте  $10 \div 15$

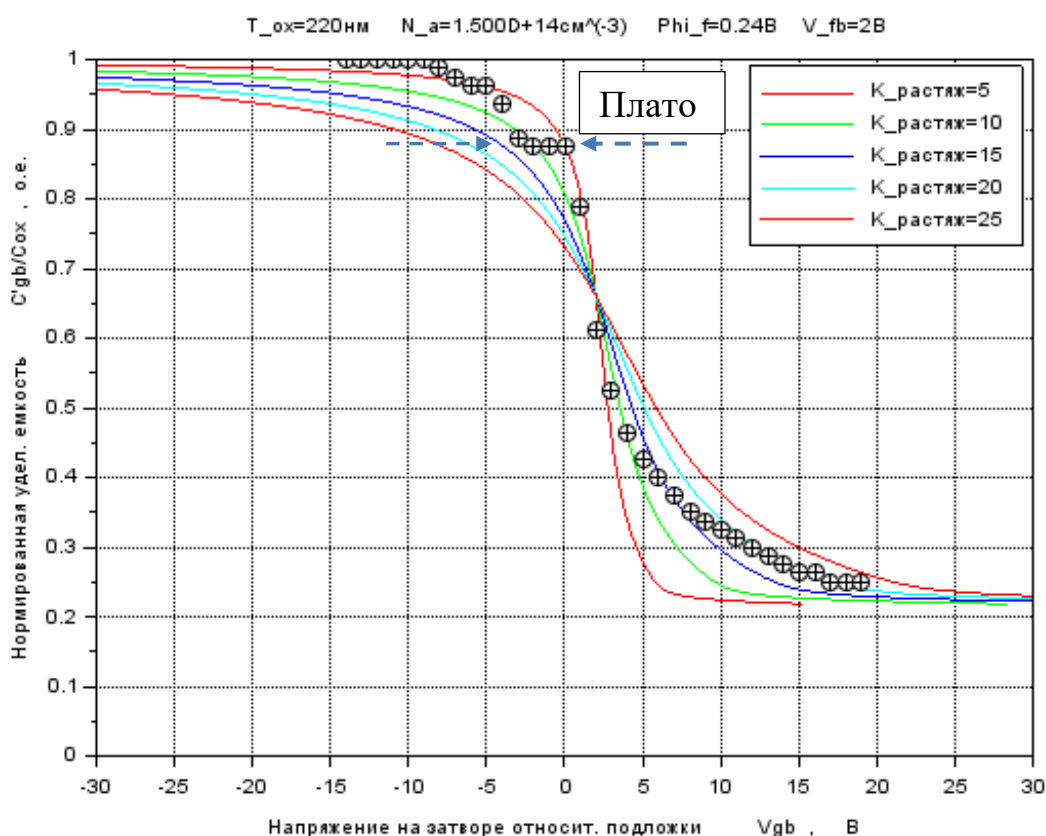


Рис. 4. Результаты измерений вольт – фарадной характеристики с наложением на нее смоделированных зависимостей с разным коэффициентом растяжения вдоль оси напряжений

Рассчитали плотность полного заряда на границе раздела и в диэлектрике:

$$Q_s \left( \frac{\text{Кл}}{\text{см}^2} \right) = \frac{C_{max}(\text{пФ})}{S(\text{мм}^2)} V_{FB}(\text{В}) 10^{-10} = 3,2 * 10^{-8}.$$

Провели касательную к полученной вольт ёмкостной характеристике в точке, соответствующей ёмкости плоских зон  $C_{FB}$  и определили тангенс угла наклона  $tg\alpha_1$ . Для данных концентраций и толщин окисла по номограмме № 3 определили тангенс угла наклона «идеальной» вольт ёмкостной характеристики  $tg\alpha_2$ . Определили эффективную плотность быстрых состояний на единичный энергетический интервал:  $N_{SS} = 6,25A \frac{C_{max(пФ)}}{S(мм^2)} \left( \frac{tg\alpha_2}{tg\alpha_1} - 1 \right) * 10^8 \text{см}^{-2} * \text{В}^{-1}$ , где «А» определяется по номограмме 4:  $A=4,7$ ;  $S=1,0$  (мм<sup>2</sup>)

$$N_{SS} = 6,25 * 4,7 \frac{160}{1} (15 - 1) * 10^8 \approx 6,6 * 10^{12} (\text{см}^{-2} * \text{В}^{-1})$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской работы были исследованы параметры и характеристики МОП - структур.

На основе систем уравнений, описывающей процессы на границах металл – оксид – полупроводник, были смоделированы вольт- фарадные характеристики для ВЧ зондирующего сигнала. Было проведено моделирование зависимости объемной плотности заряда и удельной емкости структуры от поверхностного потенциала и от напряжения затвор – подложка для р- и п – типа структур.

Описана технология калибровки установки и предложена модернизация процесса калибровки. Описана технология подготовки образцов для измерения и проведено измерение площади затворов.

Проведен технологический этап скрайбирования и припаивания микропроволоки к МОП структуре.

Получены вольт- фарадные характеристики образцов МОП – структур р – и п- типа.

Измерены концентрация легирующей примеси, напряжение плоских зон. Проведено наложение экспериментальной вольт – фарадной характеристики на теоретическую. Показано, что наличие ненулевого напряжения плоских зон приводит как к смещению вольт-фарадной характеристики, так и к растяжению

ее вдоль оси напряжений. Проведено измерение полного заряда на границе и в диэлектрике.

На экспериментальной вольт-фарадной характеристике обнаружен участок слабого изменения (плато), в области обогащения, что говорит о неизменности полного заряда при изменении напряжения затвор-подложка и, возможно, связанного с поверхностными состояниями, либо встроенным в диэлектрик зарядом.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Беляев А. Е. и др. Физические методы диагностики в микро- и наноэлектронике //Харьков: ИСМА. – 2011. – Т. 384.
2. Поклонский Н. А. и др. Эквивалентные схемы замещения структуры металл (Al)–диэлектрик (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)–полупроводник (n-Si) в режимах сильной инверсии и обогащения. – 2014.
3. Kasap S., Capper P. (ed.). Springer handbook of electronic and photonic materials. – Springer, 2017.
4. Грундман М. Основы физики полупроводников. Нанопфизика и технические приложения //М.: Физматлит. – 2012. – Т. 771.
5. Гуртов В. А. Г957 Твердотельная электроника: учеб. пособие ПетрГУ. – 2008.
6. Bhattacharyya A. B. Compact MOSFET models for VLSI design. – John Wiley & Sons, 2009.
7. Петров М. Н., Гудков Г. В. Моделирование компонентов и элементов интегральных схем. – 2011.
8. Автоматизированная установка измерения вольт-емкостных характеристик ИППМ-2. Руководство. 1971 г.
9. «Руководство к практическим занятиям по курсу «Методы исследования полупроводниковых материалов, приборов и ИМС»/ Под ред. Д.И. Биленко. Саратов Изд-во Саратовского ун-та 1980г., Ч1,2.