

УДК 669.782

Е.И. Зубко, асп.

*Запорожская государственная инженерная академия*

## Моделирование электрических свойств процесса изготовления пористого кремния методом электролитического анодирования

Разработан комплекс математического имитационного моделирования, которое описывает динамические изменения электрических свойств кремниевых пластин с разной структурой и уровнем легирования при изготовлении пористого кремния методом электролитического анодирования.  
**модель, пористый кремний, емкость, сопротивление**

**Введение.** Моделирование и исследование свойств пористого кремния является важным и актуальным вопросом выбора материала с необходимыми электрическими свойствами для применения в приборах микроэлектроники. На сегодня существуют несколько моделей, которые связаны со структурными свойствами пористых материалов. Эти работы объясняют закономерности порообразования на основе теории клеточных автоматов [1, 2], метода Монте-Карло [3], молекулярной динамики [4] и метода частиц [5]. Однако разработок по моделированию электрических свойств, кроме морфологических, в литературе не освещено.

*Целью работы* была разработка комплекса математического имитационного моделирования и программного обеспечения моделирования электрических свойств пористого кремния (ПК) в процессе электролитического анодирования (ЭА) монокристаллического кремния (МК).

Для достижения поставленной цели были решены следующие *задачи*:

- представить математические модели зависимостей удельного электрического сопротивления, поверхностной плотности заряда, удельной электрической проводимости, удельной электрической емкости, диэлектрической проницаемости, абсолютной магнитной проницаемости от технологических параметров (ТП) изготовления ПК;

- разработать программное обеспечение для получения зависимостей удельного электрического сопротивления, поверхностной плотности заряда, удельной электрической проводимости, удельной электрической емкости, диэлектрической проницаемости, абсолютной магнитной проницаемости от ТП изготовления ПК на кремниевых пластинах с различной структурой и уровнем легирования исходного материала.

**Основной материал и методика исследования.** В работе использовались пластины МК р- и n- типа проводимости с разной легирующей примесью ( р-тип проводимости - марка КДБ-0,2, n- тип проводимости - КЕС-0,01) и различным уровнем легирования с ориентацией (100) и (111), толщиной 300 мкм. Третий, пятый (с одной стороны), шестой (с обеих сторон) образцы МК р- типа проводимости подвергались операции ионной имплантации при 30 кЭв бором с дозой  $D_p = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . 7 образец - стандартная пластина МК n- типа проводимости, которая подверглась операции ионной имплантации при 30 кЭв фосфором с дозой  $D_p = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Все образцы после

ионной имплантации были отождествлены при  $T = 900 \text{ }^\circ\text{C}$  в течении 30 минут.

Пластины проходили операцию ЭА в смеси  $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}=1:1:1$ . Освещение использовалось естественное. Пористость ПК была определена гравиметрическим методом.

Для сбора электрических параметров: напряжения и плотности тока была разработана автоматизированная система в среде LabView.

В работе использовалось математическое моделирование по теореме Букингема. Где функциональные соотношения, если они однородные, можно выразить через безразмерные комбинации величин. Имитационное моделирование проводили в среде Matlab.

**Построение и функционирования модели.** На основе полученных данных электрических параметров ЭА: напряжения и плотности тока для образцов n-, n-p-, p-, p<sup>+</sup>-, p<sup>+</sup>-p-, p-p<sup>+</sup>-, p<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup>- типа проводимости получена модель удельного электрического сопротивления (рис. 1) с учетом формулы  $R_s = \frac{U \cdot S}{I \cdot l}$  [6] и влияния ТП образования ПК:

$$R_s = \frac{U}{hJ}, \quad (1)$$

где  $J$  – плотность тока, мкА/см<sup>2</sup>;

$h$  – толщина слоя полученного ПК, мкм;

$U$  – напряжение, В.

На рис. 1, а представлены зависимости удельного поверхностного сопротивления от времени ЭА для образцов 4, 7, 2, 1, 3, 5, 6 соответственно с n-, n-p-, p-, p<sup>+</sup>-, p<sup>+</sup>-p-, p-p<sup>+</sup>-, p<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup>- типа проводимости. Где область выделения водорода находилась в пределах от 0 до 20 секунд, формирование ПК наблюдалось от 20 секунд. Для p<sup>+</sup> - типа проводимости формирование ПК происходило в промежутке времени от 20 до 70 секунд. От 70 секунд для 1 образца в течении времени наблюдался процесс электрополирования. На рис. 4, б изображена структуры p и p - p<sup>+</sup> типа проводимости на которых область выделения водорода длилась от 5 до 10 секунд, формирование ПК – 10 - 27,5 секунд, электрополирование - 27,6 - 33 секунд.

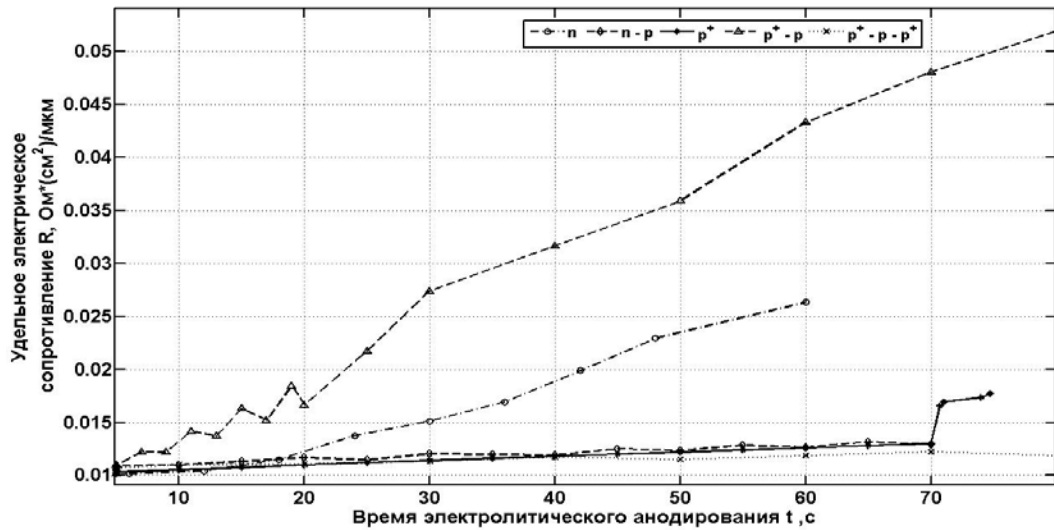
Большие поверхностные сопротивления наблюдаются для нелегированных пластин p- типа проводимости, меньшие - для структур p<sup>+</sup>- p-p<sup>+</sup>-, n- p-, p<sup>+</sup> - типа проводимости. В области выделения водорода видим резкое увеличение удельного поверхностного сопротивления для всех образцов. При переходе в область формирования ПК наблюдаем снижение удельного поверхностного сопротивления для образцов p и p- p<sup>+</sup>- типа проводимости.

Следующим параметром электрических свойств поверхности ПК рассмотрим расчет поверхностной плотности заряда, который был получен по формуле  $\sigma = \frac{q}{S}$  [7] с учетом влияния ТП формирования ПК на пластинах МК:

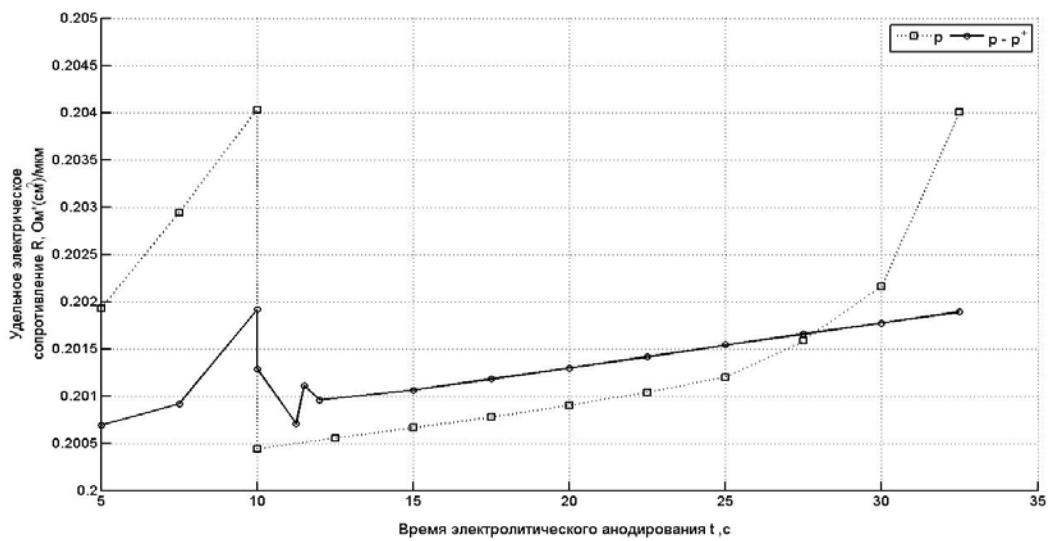
$$\sigma = J \cdot t, \quad (2)$$

где  $t$  - время ЭА пластины кремния, с;

$J$  - плотность тока, мкА/см<sup>2</sup>.



а



б

Рисунок 1 - Зависимость удельного поверхностного сопротивления от времени ЭА для образцов:  
 а – для пластин n-, n-p-, p<sup>+</sup>-, p<sup>+</sup>-p-, p<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup>-типа проводимости;  
 б – для пластин p-, p-p<sup>+</sup>-типа проводимости

Зависимости поверхностной плотности заряда от времени ЭА приведены на рис. 2 для образцов 4, 7, 2, 1, 3, 5, 6.

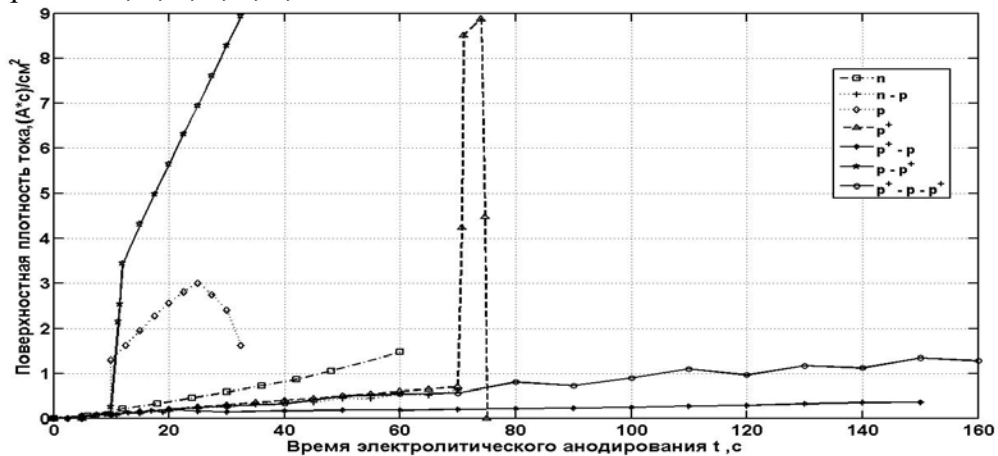


Рисунок 2 - Зависимость поверхностной плотности заряда от времени ЭА для образцов 4, 7, 2, 1, 3, 5, 6 соответственно n-, n-p-, p-, p<sup>+</sup>-, p<sup>+</sup>-p-, p<sup>+</sup>-p<sup>+</sup>-, p<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup>-типа проводимости

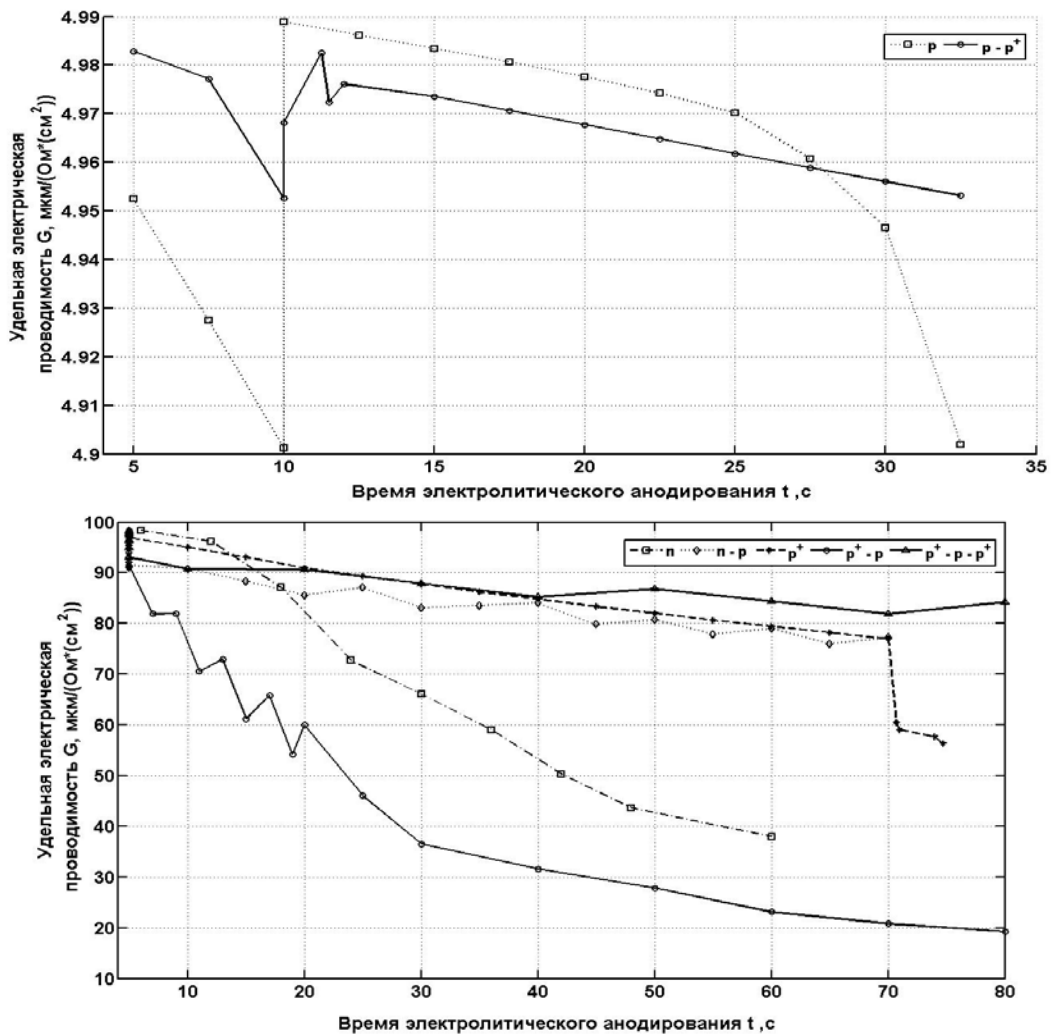
Анализ рис. 2 показывает, что при увеличении заряда  $q$  пропорционально возрастает поверхностная плотность заряда в соответствии с ростом площади поверхности в любой точке на каждом образце. Более всего ее рост определен для образцов  $p - p^+$  и  $p^+ - p^-$  типа проводимости.

Величина удельной электрической проводимости, согласно формуле  $G = \frac{1}{R}$  [7] при учете влияния электрических параметров  $U$  и  $J$  для пластин МК имеет вид:

$$G = \frac{hJ}{U}, \quad (3)$$

где  $J$  – плотность тока, мкА/см<sup>2</sup>;  
 $h$  – толщина слоя формирования ПК, мкм;  
 $U$  – напряжение, В.

На рис. 3 представлены зависимости удельной электрической проводимости от времени ЭА для образцов  $n$ ,  $n-p$ ,  $p$ ,  $p^+$ ,  $p^+ - p^-$ ,  $p^- - p^+$ ,  $p^+ - p^- - p^+$  типа проводимости.



а – для пластин  $n$ -,  $n-p$ -,  $p^+$ -,  $p^+ - p^-$ -,  $p^- - p^+$ -типа проводимости и б – для пластин  $p$ -,  $p^- - p^+$ - типа проводимости

Рисунок 3 - Зависимость удельной электрической проводимости от времени ЭА

Общий характер зависимостей показывает, что на поверхности МК образовывается ПК. Это подтверждается тем, что в течении времени ЭА наблюдается снижение удельной электрической проводимости. Это характерно для свойств ПК. Области проведения реакции совпадают с удельным поверхностным сопротивлением.

По формуле  $C = \frac{q}{U} = \frac{I \cdot t}{U}$  [7] получено удельную электрическую емкость при учете влияния ТП формирование ПК на пластинах МК:

$$C = \frac{t \cdot J \cdot h^3}{U}, \quad (4)$$

где  $t$  - время ЭА пластины МК, с;

$J$  - плотность тока, мкА/см<sup>2</sup>;

$h$  - толщина слоя ПК, мкм;

$U$  - напряжения, В.

На рис. 4 показана зависимости удельной электрической емкости от времени ЭА для образцов 4, 7, 2, 1, 3, 5, 6 соответственно n-, n-p-, p-, p<sup>+</sup>-, p<sup>+</sup>-p-, p-p<sup>+</sup>-, p<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup>- типа проводимости.

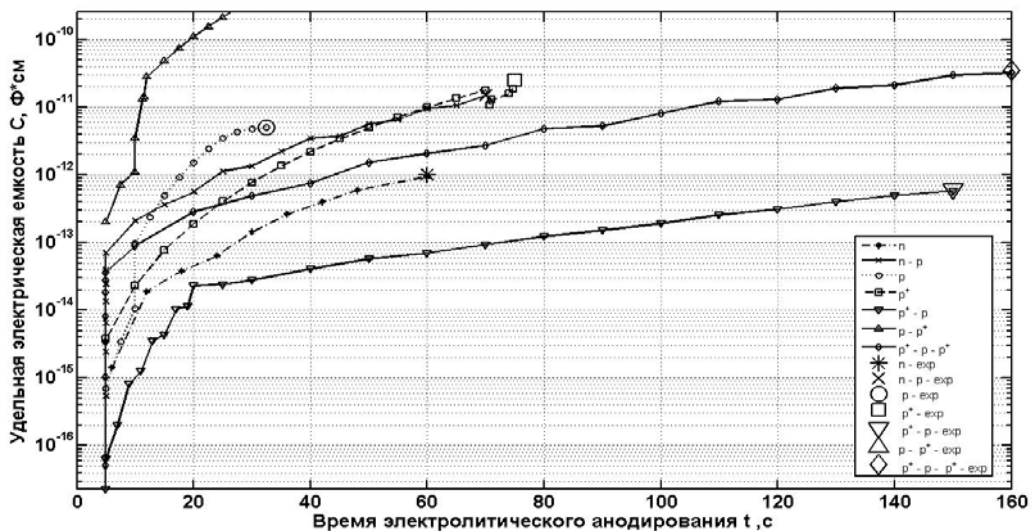


Рисунок 4 - Зависимость удельной электрической емкости от времени ЭА для образцов 4, 7, 2, 1, 3, 5, 6 соответственно n-, n-p-, p-, p<sup>+</sup>-, p<sup>+</sup>-p-, p-p<sup>+</sup>-, p<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup>-типа проводимости

Экспериментально полученные значения электрической емкости методом Хола для разных структур совпадают с полученными теоретическими значениями электрической емкости (рис. 4) и подтверждаются работой С. П. Зимина [8].

Рассчитаем абсолютную диэлектрическую проницаемость по формуле [7]

$\epsilon_0 = \frac{D}{U}$  с учетом влияния ТП формирование ПК на пластинах МК:

$$\epsilon_0 = \frac{hJt}{U}, \quad (5)$$

где  $t$  - время ЭА пластины кремния, с;

$J$  - плотность тока, мкА/см<sup>2</sup>;

$h$  - толщина слоя формирования ПК, мкм;

$U$  - напряжение, В.

На рис. 5 представлены зависимости абсолютной диэлектрической проницаемости от времени ЭА для образцов 4, 7, 2, 1, 3, 5, 6 соответственно n-, n-p-, p-, p<sup>+</sup>-, p<sup>+</sup>-p-, p-p<sup>+</sup>-, p<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup>- типа проводимости.

Исходя из рис. 5 при влиянии плотности тока и напряжения на пластины МК в среде HF наблюдается увеличение абсолютной диэлектрической проницаемости. Это подтверждает образование на поверхности МК структуры ПК с диэлектрическими свойствами, для которой характерным является повышение поверхностного сопротивления.

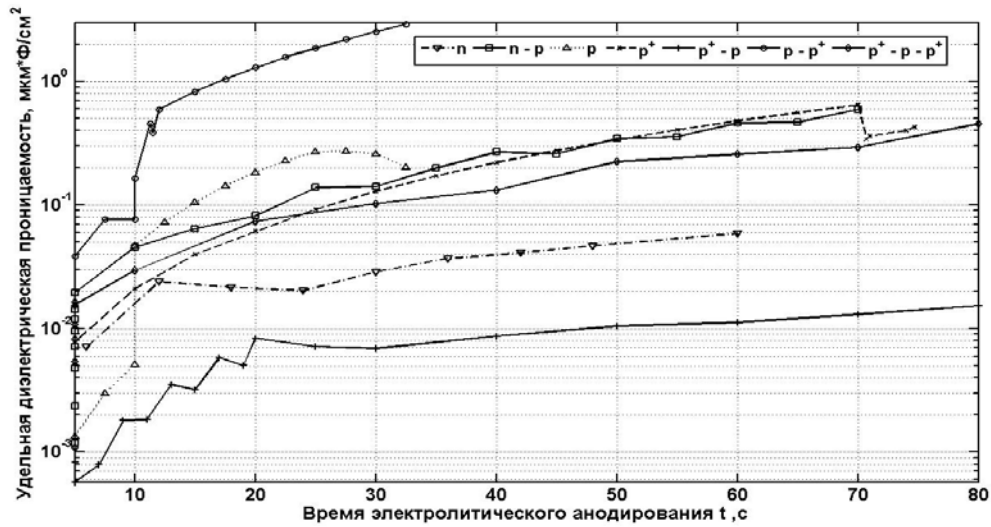


Рисунок 5 - Зависимость абсолютной диэлектрической проницаемости от времени ЭА для образцов 4, 7, 2, 1, 3, 5, 6 соответственно n-, n-p-, p-, p<sup>+</sup>-, p<sup>+</sup>-p-, p-p<sup>+</sup>-, p<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup>-типа проводимости

Абсолютная магнитная проницаемость определена по формуле  $\mu_0 = \frac{1}{\epsilon_0 c^2}$  [7] с учетом влияния ТП при ЭА МК (рис. 6):

$$\mu_0 = \frac{U}{h \cdot J \cdot t \cdot c^2}, \quad (6)$$

где  $t$  - время ЭА пластины МК, с;  
 $J$  - плотность тока, мкА/см<sup>2</sup>;  
 $h$  - толщина слоя формирования ПК, мкм;  
 $U$  - напряжение, В.

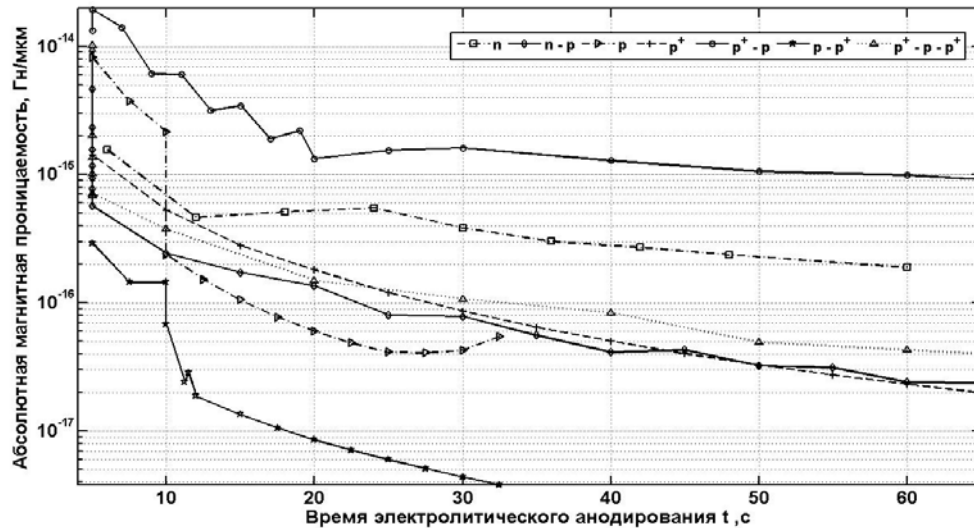


Рисунок 6 - Зависимость абсолютной магнитной проницаемости от времени ЭА для образцов 4, 7, 2, 1, 3, 5, 6 соответственно n-, n-p-, p-, p<sup>+</sup>, p<sup>+</sup>-p-, p-p<sup>+</sup>, p<sup>+</sup>-p<sup>+</sup>-типа проводимости

На рис. 6 приведены зависимости абсолютной магнитной проницаемости от времени ЭА для образцов 4, 7, 2, 1, 3, 5, 6 соответственно n-, n-p-, p-, p<sup>+</sup>, p<sup>+</sup>-p-, p-p<sup>+</sup>, p<sup>+</sup>-p<sup>+</sup>-типа проводимости.

Анализируя рис. 6 можно сделать вывод, что наибольшую абсолютную магнитную проницаемость имеет структура p<sup>+</sup>-p типа проводимости.

**Выводы.** В ходе проведения работы получены математические модели в среде Matlab для определения влияния глубины ПК на электрические свойства структуры: удельное электрическое сопротивление, поверхностную плотность заряда, удельную электрическую проводимость, удельную электрическую емкость, абсолютную диэлектрическую проницаемость, абсолютную магнитную проницаемость. Данные модели учитывают, что в силу неоднородности процессов ЭА возможно появление в ПК локальных областей с различными электрическими свойствами по толщине полученного ПК на пластинах МК. Результаты данной программы адекватно описывают литературные и экспериментальные данные.

## Список литературы

1. Можаяев А. В., Проказников А. В., Тимофеев В. В. Динамическая дискретная трехмерная модель порообразования в кремнии // Электронный научный журнал «Исследовано в России». – 2006. - <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/069.pdf>. - С. 687 – 694.
2. Головкин Н. Ф., Хрипко С. Л. Компьютерное моделирование кластерного роста пористых структур // Технологія, обладнання та виробництво електронної техніки. – 2009. – 1. – № 23. – С. 69 – 72.
3. Александров Л. Н., Новиков П. Л. Моделирование образования структур пористого кремния // Письма в ЖЭТФ. – 1997. – 65. – № 9. – С. 685 – 690.
4. Каргузов В. В., Крикля А. А. Компьютерная имитация и анализ структуры нанопористого углерода // Математичні методи та обчислювальний експеримент в матеріалознавстві. Праці Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України. – 2008. – вип. 10. – С. 113 – 119.
5. Городецкий А. Е., Тарасов И. Л. Компьютерное моделирование процесса формирования пористого кремния // Математическое моделирование. – 2008. – 20. – № 2. – С. 105 – 112.
6. Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г. Справочник по элементарной физике. Изд. 6, стереотипное. – 1975. - «Наука». – Москва. – С. 254.
7. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. Изд. 7. - испр. – 1977. - «Наука». – Москва. – С. 942.
8. Зимин С.П., Комаров Е.П. Емкость структур с толстым слоем пористого кремния // Письма в ЖЭТФ.- 1996.- 22. - № 19.- С.69 - 73.

*Є.Зубко*

**Моделювання електричних властивостей процесу виготовлення пористого кремнію методом електролітичного анодування**

Розроблено комплекс математичного імітаційного моделювання, що описує динамічні зміни електричних властивостей кремнієвих підкладок з різною структурою й рівнем легування при виготовленні пористого кремнію методом електролітичного анодування.

*E.Zubko*

**Design of electric properties of process of making of porous silicon the method of electrolytic anodization**

The complex of mathematical imitating modelling which describes dynamic changes of electric properties of silicon substrates with different structure and level doping at manufacturing of porous silicon by a method electrolytic anodizing is developed.

Получено 28.10.11

**УДК 621.316.1**

**В. В. Зінзура, асист.**

*Кіровоградський національний технічний університет*

## **Методи розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах**

В статті проведено аналіз існуючих методів розв'язків задач багатокритеріальної оптимізації, здійснено вибір методу розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах, який найбільш повно враховує вимоги ГОСТ 13109-97 стосовно нормально допустимих значень показників якості електричної енергії. Даний метод розв'язку може бути покладений в основу законів регулювання автоматичних систем управління силовим трансформатором з безконтактним пристроєм РПН, що працює в мережі з ізольованою нейтраллю або зі схемою з'єднання обмоток  $\Delta/Z$  («трикутник»/«зустрічний зигзаг»)

**відхилення напруги, несиметрія напруги, багатокритеріальна оптимізація, парето-оптимальна множина, утопічна точка**

В сучасних системах електропостачання нерідко спостерігаються перевищення допустимих показників якості електричної енергії. Це призводить до ряду негативних наслідків: збільшення втрат електричної енергії в електричних мережах, передчасне зношення електричної ізоляції електроприймачів та вихід їх з ладу, поява похибок в системах обліку електричної енергії та ін.

Найбільш дієвим та поширеним способом зниження рівнів показників якості електричної енергії до допустимих меж є застосування спеціальних технічних засобів.

Для зниження рівнів несиметрії напруги зазвичай застосовують різноманітні симетрувальні установки (несиметричні батареї конденсаторів, симетрувальні трансформатори, компенсатори струму нейтралі тощо). Основним недоліком, притаманним всім симетрувальним установкам, що стримує їх широке