

Моделирование процессов порообразования на подложках кремния с текстурированной поверхностью

Н.В. Латухина¹, Г.А. Рогожина¹, И.А. Шишкин¹, Д.А. Лизункова¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. В работе представлено исследование механизма порообразования на кремниевых пластинах (100) с текстурированной поверхностью р-типа проводимости и удельным сопротивлением 5 Ом см при электролитическом травлении в гальваностатическом режиме в растворах плавиковой кислоты в соотношении HF:C₂H₅OH (1:1). Учтено влияние электрического поля на процесс формирования пористых структур. Получено экспериментальное согласование модели распределения поля в электролите и распределения удельного сопротивления по поверхности кремниевой пластины. Подтверждено, что формирование пор начинается и продолжается между стыками пирамид, т.е. в областях на поверхности с максимальной напряженностью поля.

1. Введение

При создании высокоэффективных приборов на базе пористого нанокристаллического кремния [1], крайне важно уметь предсказывать конечный результат в виде параметров пористого слоя, исходя из начальных условий процесса травления. В любой электрической ячейке от характера электрического поля зависят омическое сопротивление системы, напряжение на электродах, сила тока, глубина залегания пористого слоя и как следствие удельное сопротивление исследуемых образцов. Вопросу описания механизма порообразования в пластинах кремния посвящено множество работ [2,3], но до сих пор нет единой модели, объясняющей все механизмы, задействованные при этом.

В данном исследовании рассмотрено влияние электрического поля на процесс порообразования, построена физико-математическая модель, описывающая распределение поля в электролите и на границе раздела «кремний-электролит».

2. Экспериментальная часть

Пористый слой на поверхности пластин создавался методом электрохимического травления в спиртовых растворах плавиковой кислоты в электролитических ячейках вертикального типа (рис.1). Емкостью для травления служила химически нейтральная фторопластовая ванночка, с одной стороны которой находилась кремниевая пластина, плотно прижатая к графитовому контакту, выполняющая роль анода, с другой стороны помещался графитовый электрод, выполняющий роль катода.

В качестве исходных пластин использовались кремниевые монокристаллические подложки марки КДБ-5 с кристаллографической ориентацией (100). Исходная поверхность пластин была текстурирована, т.е. покрыта четырехгранными правильными пирамидкам.

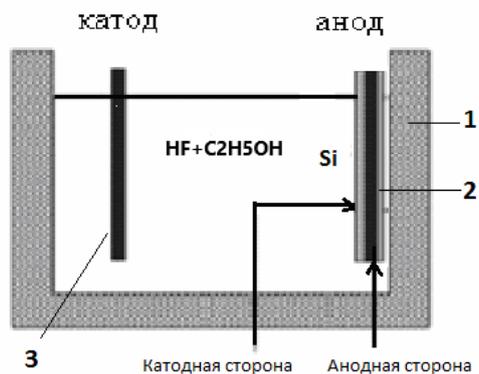


Рисунок 1. Схема электролитической ячейки вертикального типа для формирования слоев пористого кремния: 1-фторопластовая ванночка, 2 –кремниевая пластина, 3 –графитовый катод.

Порообразование на таких поверхностях происходит преимущественно в углублениях микрорельефа [4], т.е. на стыках пирамид. Таким образом было изготовлено 50 образцов кремниевых пластин с пористым слоем величиной от 10 до 50 мкм. Характер распространения электрического поля в электролите и на границе с поверхностью пластин напрямую связан с распределением удельного сопротивления по поверхности исследуемых образцов. Поэтому были проведены измерения поверхностного сопротивления 4х-зондовым методом. Результаты измерений УЭС представлены на рисунке 2(а-г). Время травления составляло от 5 до 20 минут соответственно.

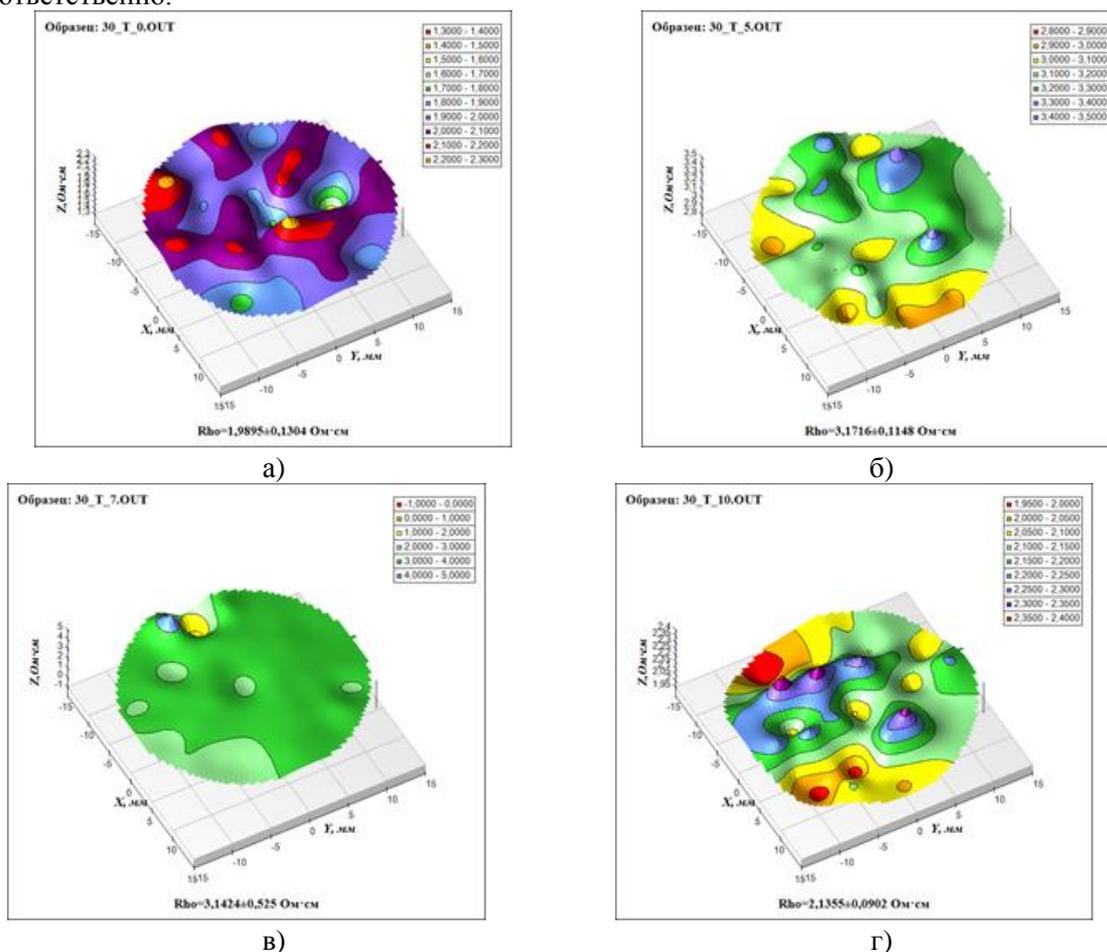


Рисунок 2.(а-г). Карты распределения УЭС по поверхности образцов с пористым слоем, сформированном на текстурированной поверхности.

3. Моделирование распределения поля в системе кремний-электролит

Моделирование распределения напряженности поля в электролите и на границе раздела кремний-электролит выполнялось в программе COMSOL Multiphysics для электрохимической ячейки. Перенос заряда в электролите описывался законом Ома. Постулировалось два предположения: во-первых, электролит является электронейтральным, во-вторых, изменение состава электролита пренебрежимо мало (однородный). Также учитывалось, что при контакте полупроводникового электрода с раствором электролита в полупроводнике формируется область пространственного заряда (ОПЗ), аналогичная области, образующейся при контакте полупроводника с металлом, приводящая к искривлению энергетических зон полупроводника. Потенциал, приложенный к полупроводниковому электроду, перераспределяется между обедненной областью полупроводника и слоем Гельмгольца. (Рис.3)

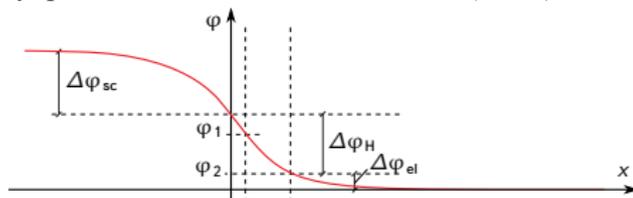


Рисунок 3. Распределение потенциала в структуре электролит-полупроводник.

Электрическое поле внутри любого проводника, в том числе и внутри электролита, характеризуется системой следующих дифференциальных уравнений:

$$\text{div} \bar{D} = 0 \tag{1}$$

$$\bar{D} = \frac{\bar{E}}{\rho} \tag{2}$$

$$\text{rot} \bar{E} = 0 \tag{3}$$

где D – плотность тока, A/m^2 ; E – напряженность электрического поля, V/m ; ρ – удельное сопротивление электролита, $Om \cdot cm$.

Начальными условиями были размеры электродов и особенности рельефа поверхности анода. Интерфейс первичного тока в COMSOL Multiphysics определяет две зависимые переменные: одну для электрического потенциала в электролите (ϕ_1), а другую для электрического потенциала на электродах ϕ_s . Решаются следующие уравнения для электрода и электролита соответственно:

$$i_s = -\delta_s \Delta \phi_s c \Delta i_s = Q_s \tag{4}$$

$$i_l = -\delta_l \Delta \phi_l c \Delta i_l = Q_l \tag{5}$$

Электрод-электролит:

$$\phi_s - \phi_l = E_{eq,m} \tag{6}$$

$E_{eq,m}$ – равновесный потенциал реакции m .

На рисунке 4 представлена смоделированное поле в электролите и на границе с текстурированной поверхностью кремниевой пластины.

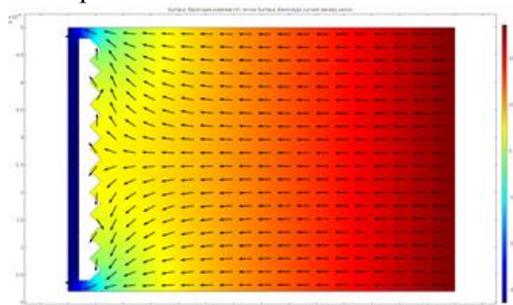


Рисунок 4. Распределение поля в электролите.

На рис. 4 показаны результаты моделирования распределения электрического поля в электролите при травлении в ячейке вертикального типа образца с текстурированной поверхностью с учетом действия силы тяжести. Учет силы тяжести (на рисунках направлена от верхней границ рисунка к нижней) приводит к нарушению симметрии в распределении поля.

4. Заключение

Моделирование распределения потенциала и поля в электролите показало, что у образца с текстурированной поверхностью это распределение неравномерное. Вблизи поверхности потенциал ниже и поле неравномерно. Это объясняется особенностями геометрии поверхности.

5. Литература

- [1] Латухина, Н.В. Многослойные наноструктуры на базе пористого кремния для оптоэлектроники / Н.В. Латухина, Д.А. Лизункова, Г.А. Рогожина, И.М. Жильцов, М.В. Степихова, В.И. Чепурнов // Фотоника. – 2018. – № 5. – С. 70-74. DOI: 10.22184/1993-7296.2018.12.5.508.513.
- [2] Кирсанов, Н.Ю. Многослойные структуры на основе пористого кремния и соединений редкоземельных элементов: исследование спектральных характеристик / Н.Ю. Кирсанов, Н.В. Латухина, Д.А. Лизункова, Г.А. Рогожина, М.В. Степихова // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51, № 3. – С. 367-371.
- [3] Дрондин, А.В. Фотоэлектрические свойства структур на базе пористого кремния с одно- и двухслойными покрытиями / А.В. Дрондин, Н.В. Латухина, Д.А. Лизункова, В.Д. Паранин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 50-54.
- [4] Латухина, Н.В. Фотоэлектрические свойства структур с микро- и нано- пористым кремнием / Н.В. Латухина // Известия СНЦ РАН. – 2009. – Т. 11, № 3. – С.66-70.

Simulation of the Pore Formation Process on Silicon Wafers with a Textured Surface

N.V. Latukhina¹, G.A. Rogozhina¹, I.A. Shishkin¹, D.A. Lizunkova¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. In this work, we received a map of the distribution of the potential field of the surface layer during the electrochemical etching of silicon. A comparison was made of the field distribution in cells with different types: horizontal and vertical. The rate and direction of electrolyte, flowing through the pores of different forms, is shown.