

Процесс образования пор на текстурированной подложке кремния при электрохимическом травлении: 3D-модель

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

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

Аннотация. В работе представлены результаты моделирования механизма образования пор на текстурированной поверхности кремниевой подложки в виде 3D карт распределения потенциала электрического поля и токов травления. На 3D картах можно увидеть, что вектора тока огибают пирамидки и травление происходит точно лишь в определенных участках поверхности. Экспериментальное подтверждение наблюдается на изображениях травленной текстурированной поверхности, полученных с помощью растрового электронного и сканирующего зондового микроскопа.

1. Введение

Процесс порообразования на плоской поверхности монокристаллического кремния во время электрохимического травления описывается во многих моделях, которые в некоторой степени объясняют физические законы этого явления [1-3]. Большинство разработанных моделей порообразования не учитывают влияние микрорельефа на поверхность кремниевой пластины, где граница раздела анод-электролит обычно считается плоской. В данной работе рассматривается процесс порообразования на текстурированной поверхности кремния и решается задача построения физико-математической модели, описывающей распределение поля в системе электролите – непланарный анод. Структуры с пористым слоем, образованным на текстурированной поверхности, представляют определенный интерес для практических приложений в оптоэлектронике, а образование пор на такой поверхности имеет свои особенности, которые не учитываются в существующих моделях порообразования [4,5].

2. Эксперимент

Пористый слой на поверхности пластин создавался путем электрохимического травления в спиртовых растворах плавиковой кислоты в электрохимических ячейках вертикального типа [4,5]. На одной стороне протравленной ячейки была кремниевая пластина, плотно прижатая к графитовому контакту, действующему в качестве анода, с другой стороны, к графитовому электроду, действующему в качестве катода (рис. 1). Начальная поверхность пластин была текстурированной, то есть покрыта тетраэдрическими правильными пирамидами с кристаллографической ориентацией (100).

3. Моделирование

Моделирование распределения напряженности поля в электролите и на границе раздела кремний-электролит проводилось с использованием программного обеспечения COMSOL

Multiphysics, а именно модуля «Вторичное распределение тока» для электрохимической ячейки. Перенос заряда в электролите описывался законом Ома. Были предложены два предположения: во-первых, электролит электрически нейтрален, а во-вторых, изменение состава электролита незначительно (однородно). Также было принято во внимание, что, когда электрод контактирует с раствором электролита, то в полупроводнике образуется область пространственного заряда, аналогичная области, образующейся, когда полупроводник контактирует с металлом, что приводит к искривлению энергетических зон полупроводника. Потенциал, приложенный к электроду, перераспределяется между обедненной полупроводниковой областью и слоем Гельмгольца. Основное уравнение, которое использовалось при построении компьютерной модели являлось уравнение Нернста — Планка для транспорта ионов в электролите.

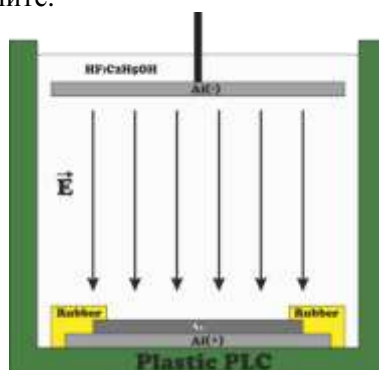


Рисунок 1. Схема электролитической ячейки горизонтального типа для формирования слоев пористого кремния.

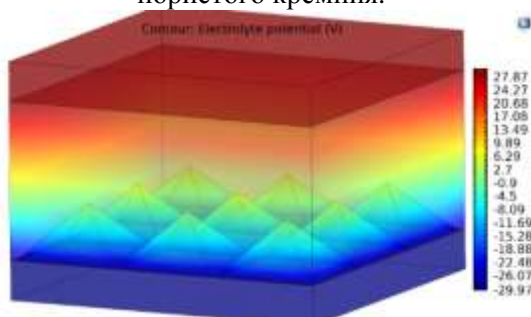


Рисунок 2. Распределение потенциала (цвет) в электролите при травлении образца с текстурированной поверхностью в электролитические ячейки горизонтального типа.

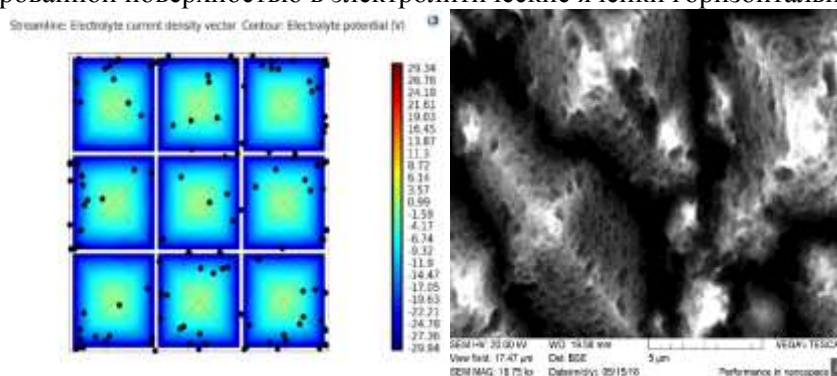


Рисунок 3. Сопоставление контурной карты распределения потенциала (цвет) и векторов плотности тока (точки), направленных по оси Z с морфологией протравленной текстурированной подложки в электрохимической ячейке горизонтального типа.

4. Результаты моделирования

Результаты расчетов представлены в виде карт распределения потенциала и векторов плотности тока в объеме ячейки. На рисунке 2 показан контур распределения потенциала

(X,Y,Z) в электролите при травлении образца с текстурированной поверхностью в электролитической ячейке горизонтального типа.

На карте векторного поля плотностей тока (рис. 3) видно, что по краям пирамидок максимальна составляющая вектора плотности тока, направленная нормально к плоскости пластины. Разность потенциалов между центральной и краевыми областями составляет более 20 В. Все это приводит к тому, что в промежутках между гранями текстурированной поверхности области образования пор разных форм идет интенсивнее, нежели в центральных частях пирамидок.

5. Заключение

Моделирование поля при электрохимическом травлении показало, что его распределение вблизи границы раздела кремний – электролит определяется микрорельефом исходной поверхности между кремниевым анодом и электролитом определяется микрорельефом исходной поверхности и определяет особенности образующегося пористого слоя.

6. Благодарности

Данная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №16-48-630688 «Исследование физических процессов в многослойных фоточувствительных кремниевых структурах с наноразмерными элементами».

7. Литература

- [1] Горячев, Д.Н. О механизме образования пористого кремния / Д.Н. Горячев, Л.В. Беляков, О.М. Сресели // Физика и техника полупроводников. – 2000. – Т. 34, № 9. – С. 66-70.
- [2] Можаяев, А.В. Динамическая дискретная трехмерная модель порообразования в кремнии / А.В. Можаяев, А.В. Проказников, В.В. Тимофеев // Электронный научный журнал «Исследовано в России» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/069>.
- [3] Городецкий, А.Е. Компьютерное моделирование процесса формирования пористого кремния / А.Е. Городецкий, И.Л. Тарасова // Математическое моделирование. – 2008. – Т. 20, № 2. – С. 105-112.
- [4] Латухина, Н.В. Фотоэлектрические свойства структур с микро- и нано-пористым кремнием // Известия СНЦ РАН. – 2009. – Т. 11, № 3. – С. 66-70.
- [5] 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. – Т. 12, № 5(73). – С. 421-425.

The process of pore formation on a textured silicon substrate during electrochemical etching: 3D model

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

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

Abstract. The paper presents the results of modeling the mechanism of pore formation on the textured surface of a silicon substrate in the form of 3D maps of the electric field potential distribution and etching currents. On 3D maps, you can see that the current vectors bend around the pyramids and etching occurs pointwise in certain areas of the surface. Experimental confirmation is observed in images of etched textured surface obtained by scanning electron and scanning probe microscope.