

А.С. Леньшин^{1,2}, Я.А. Пешков¹, О.В. Черноусова²,
С.В. Канныкин¹, М.В. Гречкина¹, Б.Л. Агапов¹

¹Воронежский государственный университет (г. Воронеж, Россия);

²Воронежский государственный университет инженерных технологий
(г. Воронеж, Россия)

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТРАВЛЕНИЯ НА МОРФОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТИ МНОГОСЛОЙНОГО ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

Применение пористого кремния (PSi) хорошо зарекомендовало себя в устройствах фотоники, биосенсорах и наномедицине. Тем не менее, в последнее время, особое внимание привлекло использование PSi в качестве буферного слоя для роста тонких пленок различных материалов, от металлов до полупроводников $A^{III}B^V$. Основным преимуществом PSi является возможность управления морфологии его поверхности. Тонкая настройка пористости (P), шероховатости, размера пор и т.д. позволяет использовать PSi в качестве подложки, уменьшающей механические напряжения и улучшающей адгезию. Более того, буферный слой из PSi позволяет выращивать на кремнии эпитаксиальные тонкие пленки материалов с высоким несоответствием постоянных решетки. Одним из видов дизайна регулируемой пористой подложки является многослойная наноструктура, имеющая несколько чередующихся пористых слоев с различной P в каждом слое. В данной работе представлено влияние технологических режимов на морфологию поверхности многослойного PSi.

Образцы PSi были получены электрохимическим травлением (ЭХТ) пластин монокристаллического кремния. Многослойный PSi с разными значениями P получался изменением плотности тока (j) электрохимического анодирования. Время травления (t) для всех образцов было одинаково (таблица 1). Режим травления подбирался таким образом, чтобы средняя плотность тока ЭХТ была равна 35 mA/cm^2 . Для оценки показателя P поверхности была использована рентгеновская рефлектометрия (XRR). XRR основана на зависимости положения критического угла полного внешнего отражения от электронной плотности среды [1]. Знание критического угла PSi (θ_{c-PS}) и кристаллической кремниевой подложки (θ_{c-Si}) позволяет вычислить пористость из соотношения: $P(\%) = [1 - (\theta_{c-PS}/\theta_{c-Si})^2] \cdot 100$. Морфология поверхности изучалась атомной силовой (AFM) и сканирующей электронной (SEM) микроскопиями. Обработка изображений и анализ данных проводился в программах Gwyddion и ImageJ.

Таблица 1 – Параметры режимов получения многослойного PSi и результаты исследований морфологии поверхности

№	Тип Si, $\Omega \cdot \text{cm}$	J , mA/cm^2	t , min	P , %	z , nm	σ , nm	d , nm
261	КЭФ, 0.2	35	4	25	9	3.2	210
262	КЭФ, 0.2	20/50	2/2	65/23	17	3.5	210
264	КЭФ, 0.2	20/30/40/50	1/1/1/1	55/27	19	3.2	245

Анализ XRR-профилей PSi показал, что пористость однослойного образца №261 равна 25%. Замена режима травления на двухстадийный с ростом плотности тока от 20 до 50 mA/cm^2 в образце №262 привела к образованию дополнительного поверхностного пористого слоя с P около 65%. В то же время P глубинного слоя близка к P однослойного образца и равна 23%. Увеличение количества стадий травления до четырех у №263 также привело к образованию двухслойной структуры.

Поверхностный слой имеет пористость 55%, что значительно меньше, чем у двухстадийного образца, а пористость глубинного слоя оказалась около 27% и почти не отличается от пористости глубинных слоёв предыдущих образцов. AFM изображения PSi демонстрируют, что у однослойного образца образуются частицы кремния со средним размером (z) около 9 nm. При этом, смена на многостадийный режим травления приводит к существенному увеличению размера частиц до 17-19 nm. Однако среднеквадратичная шероховатость (σ) почти не меняется. Средний диаметр пор (d) на поверхности PSi оценивался из анализа данных SEM изображений. Однослойный и двухстадийный образцы имеют одинаковый средний диаметр пор около 210 nm. Увеличение количества стадий травления у №264 приводит к росту d до 245 nm.

Результаты нашей работы показывают, как изменяя режимы травления можно тонко настраивать морфологию поверхностного слоя многослойного PSi, сохраняя параметры глубинного пористого слоя.

*Работа выполнена при поддержке гранта
Российского научного фонда 19-72-10007*

ЛИТЕРАТУРА

1. Buttard D. X-ray reflectivity investigation of thin p-type porous silicon layers / D. Buttard, G. Dolino, D. Bellet, T. Baumbach, F. Rieutord // Solid State Commun. – 1998. – 1, 10. – P. 1–5.