

УДК 539.211

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК КРЕМНИЯ

А. Ю. Судакова, магистрант РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-5232-335X, e-mail: anna.sudakova1996@mail.ru

Н. В. Рыбина, к.ф.-м.н., доцент кафедры МНЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-0377-5605, e-mail: pgnv@mail.ru

*Проведены исследования РЭМ-изображений поверхности пленок нанокристаллического кремния методами двухмерного флуктуационного анализа с исключенным трендом и средней взаимной информации. Получены значения информационно-корреляционных характеристик рельефа поверхности исследованных пленок. **Целью работы** является выявление зависимости значений информационно-корреляционных характеристик рельефа поверхности пленок нанокристаллического кремния, подвергавшихся лазерному отжигу, от мощности лазерного излучения.*

Ключевые слова: поверхность, двухмерный флуктуационный анализ, метод средней взаимной информации, нанокристаллический кремний, отжиг, текстурирование, РЭМ-изображения.

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-76-126-130

Введение

В начале 20 века человечество столкнулось с проблемами, связанными с истощением ресурсов традиционных источников энергии и загрязнением окружающей среды в связи с постоянным увеличением их использования. Началось стремительное развитие отраслей возобновляемой энергетики, в том числе энергии Солнца. Наиболее распространенный материал для создания солнечных элементов (СЭ) – кремний. Особенно перспективно применение многослойных кремниевых структур. Например, сочетание слоев аморфного гидрогенизированного кремния (a-Si:H) и гидрогенизированного микрокристаллического кремния (μ c-Si:H) расширяет область поглощаемого спектра солнечного излучения и увеличивает КПД солнечного элемента [1]. Для подавления эффекта деградации фотоэлектрических свойств солнечных элементов пленки a-Si:H подвергают частичной кристаллизации. Солнечные элементы, содержащие слои a-Si:H с нанокристаллами кремния (nc-Si/a-Si:H), обладают высоко стабильной эффективностью преобразования [2].

Для увеличения эффективности фотоэлектрического преобразователя необходимо уменьшать коэффициент отражения света во всей области спектральной чувствительности СЭ. Для этого проводится ряд технологических операций по созданию на поверхности кремния текстур, шероховатость которых соизмерима с длинами волн видимого спектра излучения света. В настоящее время для текстурирования поверхности широко применяются лазерный отжиг, плазменное травление, анизотропное жидкостное травление, фотолитография [3]. Эффективность солнечного элемента непосредственно зависит от качества текстур, созданных на поверхности кремния. Оценить качество текстур можно с помощью методов исследования характеристик рельефа поверхности.

Экспериментальные образцы

В работе используются изображения поверхности пленок нанокристаллического кремния, полученные с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ). Сканы поверхности получены от авторов работы [4]. Данные образцы осаждались на стеклянную подложку центрифугированием суспензии на основе наночастиц кремния (средний размер частиц 20 нм). Далее проводился процесс отжига на универсальной лазерной установке «LIMO 100-532/1064» при

изменении мощности лазерного излучения отжига в диапазоне от 34 до 86 Вт с шагом 13 Вт. Подробно режимы получения пленок указаны в [4]. На рисунке 1 представлены РЭМ-изображения поверхности экспериментальных образцов, а в таблице 1 – режимы отжига.

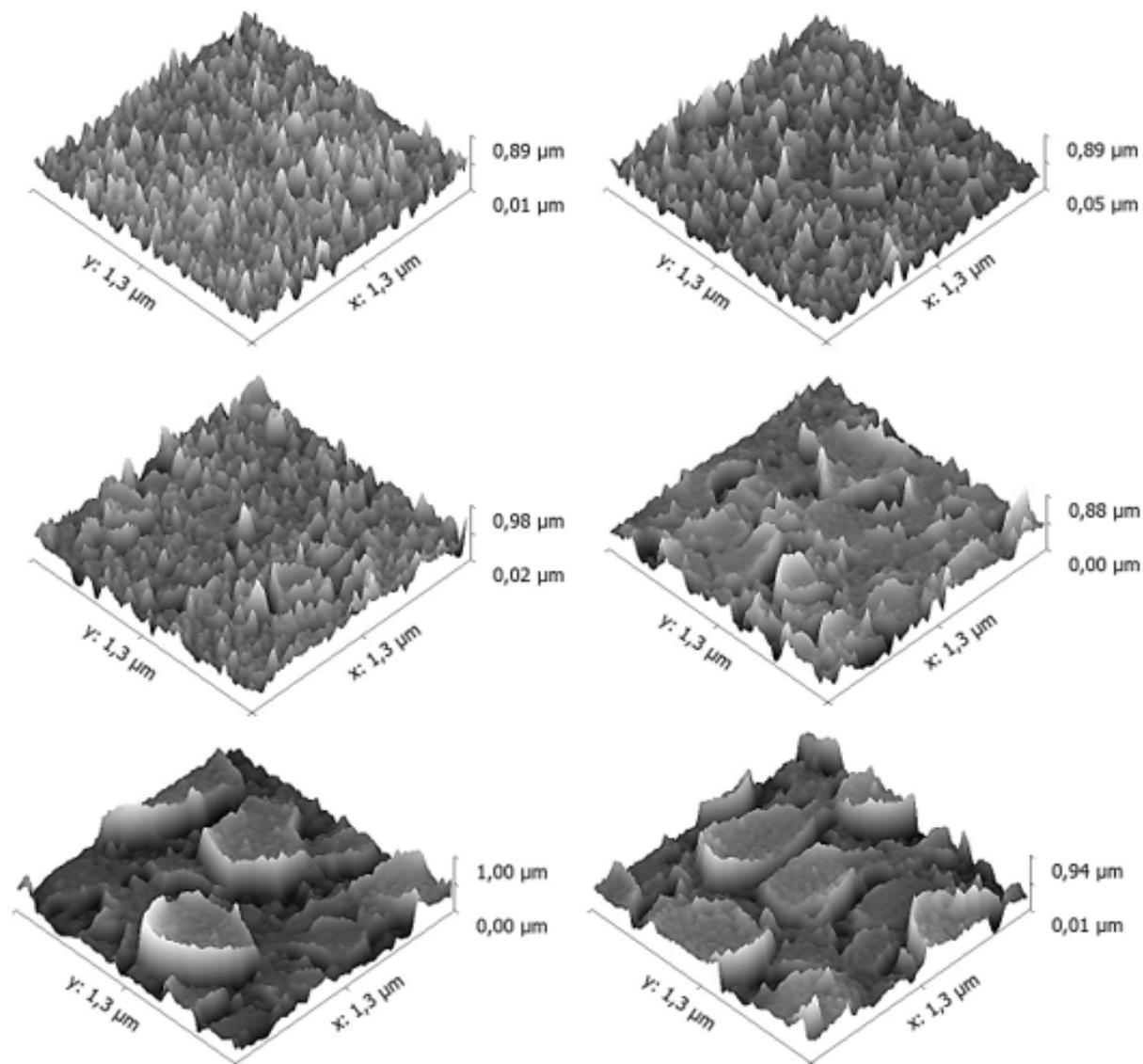


Рисунок 1 – РЭМ-изображения морфологии поверхности пленок кремния при различных мощностях лазера [4]

Figure 1 – SEM images of the surface morphology of silicon films at different laser powers [4]

Таблица 1 – Режимы отжига на лазерной установке [4]

Table 1 – Annealing modes on the laser system [4]

Образец	Мощность лазерного излучения, Вт	Длина волны Nd:YAG лазера, нм	Длительность импульса, нс	Частота следования импульса, кГц	Скорость перемещения предметного столика, мм/с
а	-	-	-	-	-
б	34	532	55	10	5
в	47	532	55	10	5
г	60	532	55	10	5
д	73	532	55	10	5
е	86	532	55	10	5

Методика исследования

РЭМ-изображения поверхности пленок кремния исследовались методами двухмерного флуктуационного анализа с исключенным трендом (two-dimensional detrended fluctuation analysis – 2D DFA) и средней взаимной информации (СВИ) [5].

Применение метода 2D DFA дает возможность получить зависимость флуктуационной функции F от пространственного масштаба s , представленную в двойном логарифмическом масштабе. Из графика можно определить пространственный масштаб, на котором наблюдается перегиб функции $F(s)$ (корреляционный вектор), соответствующий периоду гармонических составляющих в структуре.

Применяя метод СВИ, можно получить распределение показателей взаимной информации, рассчитанной для каждой пары точек, соответствующей высотам поверхности. Из этого распределения определялось непосредственно значение СВИ – показатель степени упорядоченности структуры (Ψ_{OR}) и значение максимальной взаимной информации (МВИ) – показатель информационной емкости структуры Ψ_{IC} .

На рисунке 2 представлен график зависимости флуктуационной функции F от пространственного масштаба s в двойном логарифмическом масштабе, полученный для одного из экспериментальных образцов.

Из этой зависимости рассчитывался тангенс угла наклона до первого перегиба флуктуационной функции $\text{tg}(a/b)$, характеризующий тип корреляций в структуре, а масштабы, на которых наблюдались перегибы, пересчитывались в значения корреляционных векторов d .

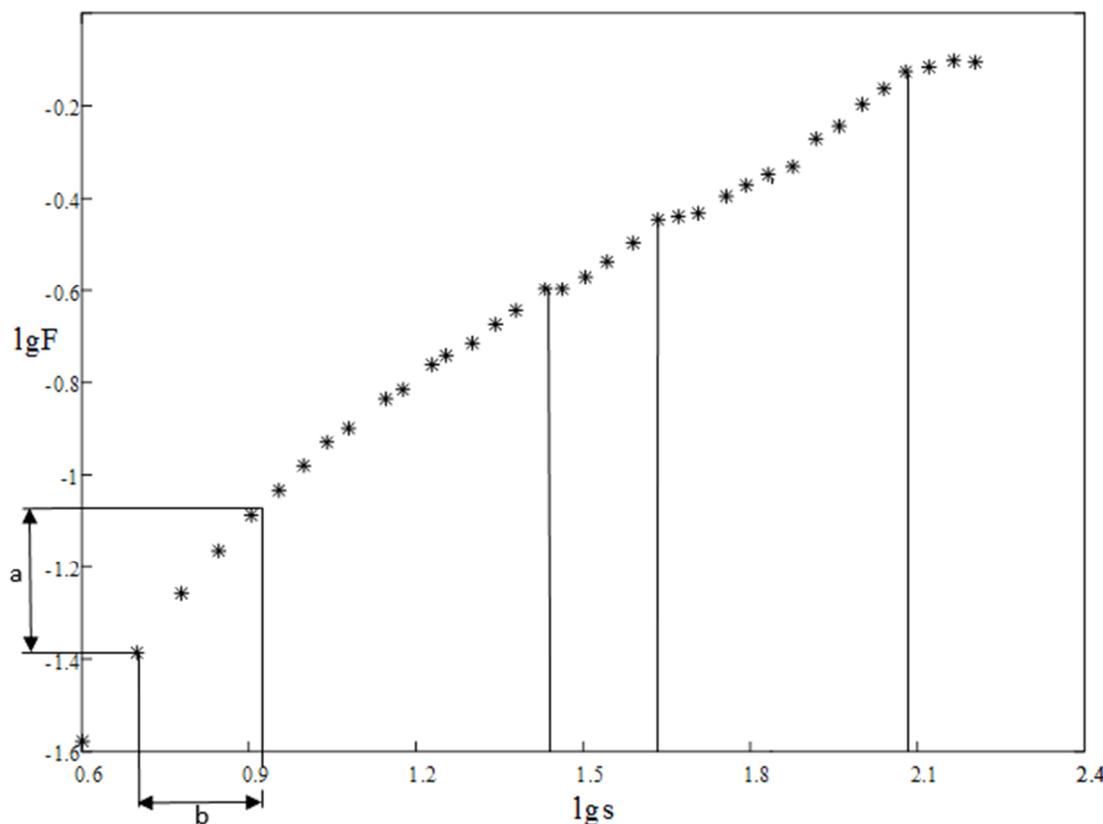


Рисунок 2 – Зависимости флуктуационной функции F от пространственного масштаба s
Figure 2 – Dependence of the fluctuation function F on the spatial scale s

Результаты исследования

В таблице 2 представлены рассчитанные информационно-корреляционные характеристики поверхности исследованных образцов.

Таблица 2 – Информационно-корреляционные характеристики образцов
Table 2 – Information and correlation characteristics of samples

Образец	Корреляционные векторы и их размеры, $d \pm 0,01$ мкм							tg(a/b)	Ψ_{OR} , отн. ед.	Ψ_{IC} , отн. ед.
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7			
а	0,071				0,229	0,371		1,478	0,539	0,008
б	0,078				0,209	0,339		1,357	0,529	0,007
в	0,079		0,166		0,204	0,339		1,321	0,553	0,011
г	0,079	0,123	0,144	0,190				1,556	0,586	0,018
д	0,081		0,162		0,214	0,355		1,655	0,583	0,038
е	0,081	0,107	0,144	0,186	0,257	0,331	0,549	1,621	0,601	0,032

Для исследованных образцов было обнаружено 7 различных значений корреляционного вектора d . Наименьшее значение d составило порядка 70-80 нм. Учитывая морфологию поверхности исследованных образцов (рисунок 1) и величину исходных кремниевых нанокристаллов (20 нм [4]), можно сделать вывод, что это среднее расстояние между центрами нанокристаллов. Корреляции на этом расстоянии сохраняются, несмотря на модификацию поверхности с помощью лазерного отжига. Еще два типичных корреляционных вектора наблюдаются на масштабах в среднем 220 нм (d_5) и 350 нм (d_6) практически для всех образцов. Это означает, что на данных расстояниях в структуре исследованных пленок наблюдаются дальнедействующие корреляции.

По результатам расчета значений d наблюдается тенденция увеличения их количества в зависимости от увеличения мощности лазерного излучения. Это подтверждается тем, что при увеличении мощности лазерного излучения исходные наночастицы спекаются все в более крупные кластеры, морфология поверхности становится более развитой.

Для значения тангенса угла наклона флуктуационной функции также наблюдается тенденция роста при увеличении мощности лазерного излучения. Это говорит о том, что структура поверхности нанокристаллического кремния становится более упорядоченной, хаотичская составляющая рельефа уменьшается.

Значения Ψ_{OR} для образцов а-г соответствуют категории структур с низкой упорядоченностью, для д и е – со средней упорядоченностью [6]. Значения Ψ_{IC} для всех образцов соответствуют категории структур со средней информационной емкостью. С ростом мощности лазерного излучения значения Ψ_{OR} и Ψ_{IC} увеличиваются, что говорит об упорядочении структуры нанокристаллических пленок кремния.

Заключение

Проведены исследования РЭМ-изображений поверхности пленок нанокристаллического кремния методами двумерного флуктуационного анализа с исключенным трендом и средней взаимной информации. Получены значения информационно-корреляционных характеристик рельефа поверхности исследованных пленок. Выявлено, что значения тангенса угла наклона флуктуационной функции и средней взаимной информации увеличивались по мере увеличения мощности лазерного излучения, воздействовавшего на поверхность пленок нанокристаллического кремния, что соответствует повышению упорядоченности их структуры. Значения информационной емкости и количество корреляционных векторов также увеличивались по мере роста мощности лазерного излучения, что говорит об увеличении степени развитости рельефа поверхности исследованных пленок.

Работа выполнена с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета им. В. Ф. Уткина (РГПТУ).

Библиографический список

1. Picosecond and nanosecond laser annealing and simulation of amorphous silicon thin films for solar cell applications. **I. Theodorakos, I. Zergioti, V. Vamvakas, D. Tsoukalas, Y. S. Raptis.** *Journal of Applied Physics*. 2014, vol. 115, no. 4. 043108.
2. Study of Large Area a-Si:H and nc-Si:H Based Multijunction Solar Cells and Materials / **X. Xu, B. Yan, D. Beglau, etc.** *MRS Proceedings*. 2008. 1066.
3. Vliyanie teksturirovaniya poverhnosti plastin kremniya dlya solnechnykh fotopreobra-zovatelej na ih prochnostnye svoystva. **V. V. SHpejzman, V. I. Nikolaev, A. O. Pozdnyakov i dr.** *ZHurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2020, vol. 7, no. 7, pp. 1168-1174.
4. Issledovanie morfologii poverhnosti i elektroprovodnosti plenok kremniya posle lazernogo otzhiga / **A. V. Saenko, A. V. Kovalev, V. V. Bespoludin, A. A. Prilipko.** *Engineering Journal of Don*. 2016, no. 1(40). 9 p.
5. Kompleksnyj metod issledovaniya korrelyacionnykh parametrov samoorganizovannykh struktur. **A. V. Alpatov, S. P. Vihrov, N. V. Vishnyakov i dr.** *FTP*, vol. 50, no. 1. 2016, pp. 23-29.
6. Samoorganizuyushchiesya struktury v elektronike: monografiya / **Vihrov S. P., Rybina N. V., Bodayagin N. V., Rybin N. B., Alpatov A. V.;** Ryazan': IP ZHukov V.YU., 2017. 168 p.

UDC: 539.211

STUDY OF SURFACE RELIEF FEATURES
OF SILICON NANOCRYSTALLINE FILMS

A. Y. Sudakova, master student, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0002-5232-335X, e-mail: anna.sudakova1996@mail.ru

N. V. Rybina, Ph.D. (in physics and mathematics), associate professor, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0003-0377-5605, e-mail: pgnv@mail.ru

SEM images of nanocrystalline silicon films surface were studied using two-dimensional detrended fluctuation analysis and average mutual information. The values of information-correlation characteristics of surface relief of the films studied are obtained. The aim of the work is to identify the dependence of the values in information-correlation characteristics of surface relief received from nanocrystalline silicon films subjected to laser annealing from laser radiation power.

Key words: surface, two-dimensional detrended fluctuation analysis, average mutual information method, nanocrystalline silicon, annealing, texturing, SEM images.

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-76-126-130

References

1. Picosecond and nanosecond laser annealing and simulation of amorphous silicon thin films for solar cell applications. **I. Theodorakos, I. Zergioti, V. Vamvakas, D. Tsoukalas, Y. S. Raptis.** *Journal of Applied Physics*. 2014, vol. 115, no. 4. 043108.
2. Study of Large Area a-Si:H and nc-Si:H Based Multijunction Solar Cells and Materials / **X. Xu, B. Yan, D. Beglau, etc.** *MRS Proceedings*. 2008. 1066.
3. Vliyanie teksturirovaniya poverhnosti plastin kremniya dlya solnechnykh fotopreobra-zovatelej na ih prochnostnye svoystva. **V. V. SHpejzman, V. I. Nikolaev, A. O. Pozdnyakov i dr.** *ZHurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2020, vol. 7, no. 7, pp. 1168-1174.
4. Issledovanie morfologii poverhnosti i elektroprovodnosti plenok kremniya posle lazernogo otzhiga / **A. V. Saenko, A. V. Kovalev, V. V. Bespoludin, A. A. Prilipko.** *Engineering Journal of Don*. 2016, no. 1(40). 9 p.
5. Kompleksnyj metod issledovaniya korrelyacionnykh parametrov samoorganizovannykh struktur. **A. V. Alpatov, S. P. Vihrov, N. V. Vishnyakov i dr.** *FTP*, vol. 50, no. 1. 2016, pp. 23-29.
6. Samoorganizuyushchiesya struktury v elektronike: monografiya / **Vihrov S. P., Rybina N. V., Bodayagin N. V., Rybin N. B., Alpatov A. V.;** Ryazan': IP ZHukov V.YU., 2017. 168 p.