



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 3. С. 290–296

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2024, vol. 24, iss. 3, pp. 290–296

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-3-290-296>, EDN: YMZNEU

Научная статья

УДК 539.216.2:53.091



Влияние изгиба на структурные свойства плёнок кристаллизованного кремния на гибких подложках

А. А. Сердобинцев, С. Б. Вениг, А. В. Козловский, Л. Д. Волковойнова[✉]

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Сердобинцев Алексей Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, заведующий лабораторией «Материалы специального назначения», SerdobintsevAA@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3281-8352>, AuthorID: 238828

Вениг Сергей Борисович, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой материаловедения, технологии и управления качеством, директор Института физики, sergey.venig@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4759-5828>, AuthorID: 287170

Козловский Александр Валерьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, kozlovsky@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3612-9776>, AuthorID: 790112

Волковойнова Лариса Дмитриевна, магистрант кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, инженер лаборатории «Материалы специального назначения», loris.volkoff@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6780-9865>, AuthorID: 1221822

Аннотация. В работе представлены результаты по изучению влияния изгиба на структурные свойства пленок кристаллического кремния на гибкой подложке. Кристаллизация аморфных пленок производилась воздействием на них лазерного излучения. Исследуемые образцы состоят из слоя кремния толщиной 1 мкм, нанесенного на полиимид, и слоя олова толщиной 40 нм, нанесенного поверх слоя кремния. Пленки кремния и олова были нанесены методом магнетронного напыления. Напыление кремния производилось в двух режимах: режиме постоянного и импульсного напряжения. Кристаллизация проводилась методом металл-индуцированной лазер-стимулированной кристаллизации. С помощью метода комбинационного рассеяния света (КРС) была изучена структура кремния после воздействия лазера для оценки степени кристаллизации. Измерения проводились для прямой и деформированной под углом 40° полиимидной подложки, что позволило выявить различный механизм распределения механических напряжений в кремниевых пленках с различным содержанием аморфной фазы. Установлено, что при содержании аморфной фазы в кристаллизованной пленке на уровне 46% не происходит сдвига пика КРС при её изгибе, а в случае пониженного до 33% содержания аморфной фазы сдвиг пика КРС при изгибе кристаллизованной пленки наблюдается. Предложено следующее объяснение полученных результатов. При высоком содержании аморфной фазы изгиб приводит к деформации аморфных участков, в то время как кристаллические области остаются практически не деформированными. В пленках с меньшим содержанием аморфной фазы возникающие при изгибе деформации распространяются и на кристаллическую составляющую, приводя к возникновению в ней механических напряжений, которые выражаются в сдвиге пика КРС на изогнутой пленке.

Ключевые слова: гибкая электроника, кристаллизация кремния, металл-индуцированная кристаллизация кремния, индуцированная лазером кристаллизация кремния, инфракрасный лазер

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-22-00047, <https://rscf.ru/project/23-22-00047/>).

Для цитирования: Сердобинцев А. А., Вениг С. Б., Козловский А. В., Волковойнова Л. Д. Влияние изгиба на структурные свойства плёнок кристаллизованного кремния на гибких подложках // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 3. С. 290–296. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-3-290-296>, EDN: YMZNEU

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Influence of bending on the structural properties of crystallized silicon films on flexible substrates

A. A. Serdobintsev, S. B. Venig, A. V. Kozlovsky, L. D. Volkovoinova[✉]

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Alexey A. Serdobintsev, SerdobintsevAA@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3281-8352>, AuthorID: 238828

Sergey B. Venig, sergey.venig@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4759-5828>, AuthorID: 287170

Alexander V. Kozlovsky, kozlovsky@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3612-9776>, AuthorID: 790112

Larisa D. Volkovoinova, loris.volkoff@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6780-9865>, AuthorID: 1221822



Abstract. Background and Objectives: Silicon is the main semiconductor material used in many areas of human life. It is used in the creation of solar cells, various electronic devices, sensors etc. Also of particular interest is such an actively developing area as flexible electronics. It finds its application in the electronic devices. Thus, it becomes important to study ways to create polycrystalline films of semiconductor materials such as silicon on flexible substrates. The biggest problem with silicon crystallization on flexible substrates is that these substrates are low-melting, and traditional methods of silicon crystallization have an intense thermal effect on the crystallized material, which leads to destruction of the substrate. **Materials and Methods:** To create the samples, consecutive magnetron sputtering deposition of a silicon layer and then a tin layer onto a polyimide substrate was used. Silicon was crystallized using an infrared pulsed laser due to high absorption in tin layer. The structure of silicon during its bending deformation was studied using Raman spectroscopy. **Results:** As a result of the study, the sizes of silicon crystallites after crystallization, as well as the stresses in the films during bending, have been determined.

Keywords: flexible electronics, silicon crystallization, metal-induced silicon crystallization, laser-induced silicon crystallization, infrared laser

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-22-00047, <https://rscf.ru/project/23-22-00047/>).

For citation: Serdobintsev A. A., Venig S. B., Kozlovsky A. V., Volkovoinova L. D. Influence of bending on the structural properties of crystallized silicon films on flexible substrates. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2024, vol. 24, iss. 3, pp. 290–296 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-3-290-296>, EDN: YMZNEU

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

На данный момент кремний является основным полупроводниковым материалом, применяемым во многих сферах человеческой жизни. Он используется при создании солнечных батарей [1], различных электронных устройств [2], датчиков и сенсоров [3]. Однако технология монокристаллического кремния сложна и затратна, поэтому идёт активный поиск альтернативных материалов электронной техники. Аморфный кремний находит свое применение при создании электронных приборов [4], однако по ряду параметров уступает кристаллизованному кремнию. Так, например, эффективность опто-электрического преобразования аморфного кремния составляет 14%, в то время как данный параметр для кристаллизованного кремния составляет 22–26% [5].

Особый интерес вызывает такая активно развивающаяся область, как гибкая электроника. Она находит свое применение в создании, например, конденсаторов [6], датчиков [7] и даже электронной кожи [8]. Таким образом, становится важным изучение способов создания поликристаллических плёнок полупроводниковых материалов, таких как кремний, на гибких подложках. Кремний выбран не случайно, поскольку он является одним из самых широко используемых в электронике материалов.

Самой большой проблемой кристаллизации кремния на гибких подложках является то, что данные подложки легкоплавкие, и традиционные способы кристаллизации кремния оказывают интенсивное тепловое воздействие на кристаллизуемый материал, что приводит к разрушению подложки. Для реализации процесса кристаллизации был разработан оригинальный метод

металл-индуцированной лазер-стимулированной (МИЛС) кристаллизации аморфного кремния на легкоплавких подложках [9], применимый и к кремниевым покрытиям, нанесённым на полимерные плёнки [10]. Суть данного процесса заключается в кристаллизации кремниевого аморфного покрытия импульсным инфракрасным лазером с использованием металлического поглощающего слоя. Применение определённых металлов (алюминий, олово, золото [11]) позволяет снизить температуру кристаллизации кремния за счет образования эвтектической фазы. Полимерная подложка практически прозрачна для инфракрасного излучения, как и кремниевое покрытие, что позволяет исключить его прямой нагрев и деградацию в процессе лазерной обработки.

1. Создание образцов

Образцы были созданы путем магнетронного напыления слоя кремния на полиимидную (ПИ) подложку толщиной 0.5 мм, а затем слоя олова. Перед напылением из ПИ плёнки вырезались подложки размером 30×30 мм, которые очищались путём протирания безворсовыми салфетками, смоченными в изопропиловом спирте. Очищенные подложки размещались на столике-держателе образцов и прижимались металлическими масками с отверстиями размером 25×20 мм. Напыление производилось в установке Nexdep (Angstrom Engineering, Канада), оснащённой двумя магнетронными источниками с дисковыми мишенями диаметром 76 мм. Остаточное давление в камере составило $2 \cdot 10^{-5}$ Торр, затем в камеру напускался аргон до достижения рабочего давления $3.4 \cdot 10^{-3}$ Торр. Было сформировано два образца, отличающихся режимом



напыления кремния. В первом случае напыление кремния происходило в режиме постоянного тока (постоянный режим – ПР), во втором – в импульсном с частотой 25 кГц и заполнением импульса 75% (импульсный режим – ИР). Напыление обоих образцов осуществлялось при фиксированной мощности 500 Вт, скорости роста плёнок кремния оказались близки в обоих режимах (0.57 нм/с для ПР и 0.55 нм/с для ИР), что обусловило одинаковое время напыления в обоих случаях (1560 с). Таким образом, было получено два варианта тонкоплёночной структуры на гибкой полимерной подложке, состоящей из слоя кремния толщиной порядка 0.9 мкм, нанесенного непосредственно на ПИ, и слоя олова толщиной 40 нм поверх кремния. Толщина напыляемых слоев контролировалась с помощью установленных в вакуумной камере пьезокварцевых датчиков и цифровой системы контроля скорости напыления (Sysop, США).

Лазерная обработка образцов осуществлялась с помощью установки МиниМаркер 2 (Лазерный центр, Россия), оснащённой импульсным волоконным лазером с длиной волны 1064 нм и гальваническим сканатором. На каждом образце лазером был обработан участок размером 20×25 мм². Энергия импульса составляла 1×10^{-5} Дж, скорость движения лазерного луча – 1200 мм/с, частота следования импульсов – 200 кГц, длительность импульса – 14 нс.

2. Исследование образцов

После лазерной обработки исследовалась кристаллическая структура образцов. Измерения проводились методом спектроскопии комбинационного рассеяния (КРС) с помощью микроскопа InVia (Renishaw, Великобритания). Для исследования использовался лазер с длиной волны 532 нм. Время накопления сигнала составляло 10 с в каждой точке при мощности излучения 0.125 мВт, размер пятна лазера равнялся 1.3 мкм. При данных параметрах измерения получается избежать кристаллизации аморфного кремния в процессе измерения и сохранить хорошее соотношение сигнала к шуму. Было сделано по 16 измерений на каждом образце, данные по ним усреднялись.

3. Результаты и их обсуждение

Когда структура из двух слоев олово-кремний на гибкой полимерной подложке подвергается лазерному воздействию, поглощение излучения инфракрасного лазера происходит в основ-

ном слое олова. Это объясняется более высоким коэффициентом поглощения олова на длине волны 1064 нм (показатель поглощения кремния $9.76 \cdot 10^{-7} \text{ нм}^{-1}$ [12], олова – $8.82 \cdot 10^{-2} \text{ нм}^{-1}$ [13], ПИ – $4.95 \cdot 10^{-7} \text{ нм}^{-1}$ [14]). Поглощённая металлом энергия частично затрачивается на абляцию слоя олова, а оставшаяся часть передаётся слою кремния под оловом посредством теплопередачи [15]. Эта часть энергии, переданная кремниевому слою, и способствует его кристаллизации.

На рис. 1 приведены усредненные КРС спектры образцов для обоих режимов напыления кремния.

Для анализа структуры образцов спектры КРС были разложены на составляющие пики с помощью функций Фойгта, учитывающих лоренцевскую форму КРС-пику и гауссову составляющую, возникающую в результате неидеальности оптических компонент КРС-спектрометра. Коэффициент детерминации для представленных на рис. 1 разложений составил не менее 0.99, что говорит о хорошем соответствии аппроксимации экспериментальным результатам. Для обоих образцов выделяются поперечная оптическая мода (ТО мода [16]) аморфного кремния (обозначена цифрой 1 на рис. 1), мода ТО кристаллического (обозначена цифрой 3 на рис. 1), а также мода промежуточной нанокристаллической фазы (соответствующий пик обозначен цифрой 2 на рис. 1). Параметры пику кристаллической ТО моды кремния приведены в табл. 1.

В табл. 1 сравниваются параметры пику КРС кристаллической фазы кремния для ПР и ИР образцов: положения пику и его ширины на половине высоты (полуширина). Первый параметр указывает на размер кристаллитов кремния [17], второй – на время жизни оптического фонона в кристалле [18]. Для монокристаллического кремния характерно положение пику на 520 см^{-1} [19].

Определим размер кристаллита для образцов ПР и ИР [17, с. 2333, формула (2)]:

$$L = 2\pi(B/\Delta\omega)^{1/2}, \quad (1)$$

где B – полуширина ТО моды пику кристаллического кремния, $\Delta\omega$ – комбинационный сдвиг положения пику кристаллита относительно значения положения пику монокристаллического кремния.

На основе усреднённых спектров КРС была рассчитана объёмная доля кристаллической фазы кремния [20, с. 2, формула (1), (2)]:

$$\rho = I_c / (I_c + yI_a). \quad (2)$$

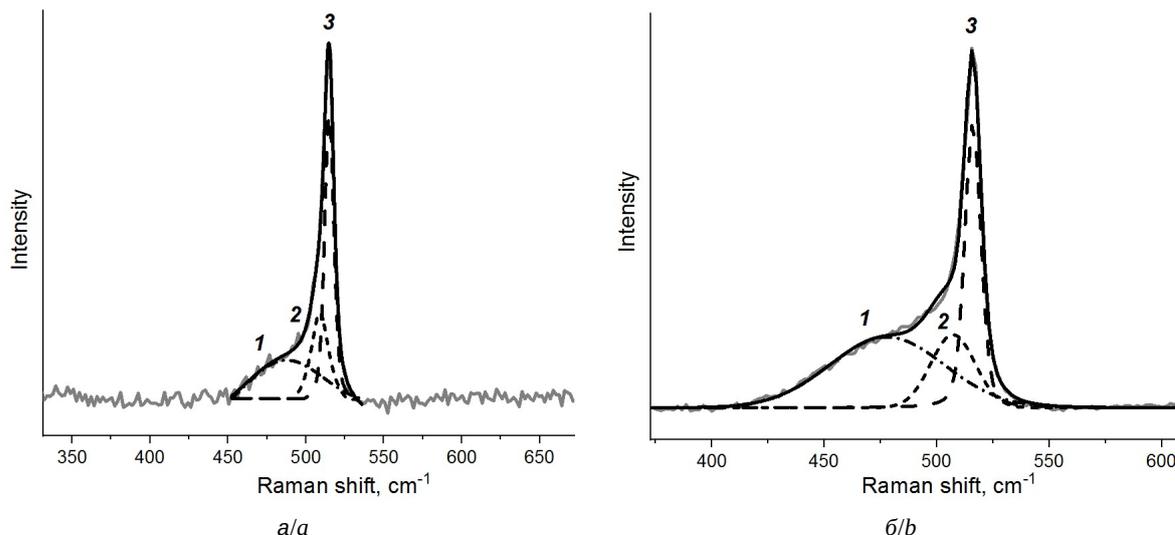


Рис. 1. Характерные спектры КРС: а – образец ПР, б – образец ИР; 1 – ТО мода аморфного кремния, 2 – мода промежуточной нанокристаллической фазы, 3 – мода ТО кристаллического кремния

Fig. 1. Characteristic Raman spectra: а – CM sample, б – PM sample; 1 – TO mode of amorphous silicon, 2 – mode of intermediate nanocrystalline phase, 3 – TO mode of crystalline silicon

Таблица 1 / Table 1

Значения параметров пиков образцов ПР и ИР
Values of peak parameters for CM and PM samples

Режим / Mode	Положение пика (кристаллит), см ⁻¹ / Peak position (crystallite), cm ⁻¹	Полуширина пика (кристаллит), см ⁻¹ / Peak half-width (crystallite), cm ⁻¹	Размер кристаллита, нм / Crystallite size, nm	Доля кристаллической фазы / Fraction of crystalline phase
ПР/CM	515.0 ± 0.8	2.7 ± 1.3	4.64	0.67
ИР/PM	516.1 ± 0.5	2.4 ± 0.4	4.92	0.54

Здесь I_c – интенсивность пика кристаллического кремния, I_a – интенсивность пика аморфного кремния, y – соотношение интегральных сечений комбинационного рассеяния для кристаллической и объёмной фаз,

$$y(L) = 1 + L/50 \cdot \exp(-L/250), \quad (3)$$

где L – размер кристаллита, выраженный в ангстремах.

Рассчитанные значения среднего размера кристаллитов и доли кристаллической фазы в исследуемых образцах представлены в табл. 1. Из полученных данных видно, что размер кристаллита практически одинаков для обоих образцов. Что касается доли кристаллической фазы, то образец ПР заметно превосходит образец ИР по этому параметру.

Вероятно, это можно объяснить в некотором смысле более неравновесной структурой образца ИР. При распылении в импульсном режиме

осаждающиеся атомы имеют большую энергию [21]. Учитывая, что ПИ подложка не подогревается дополнительно в процессе распыления, разность энергий (температур) осаждающегося атома кремния и атомов подложки оказывается больше, чем в ПР. Это способствует резкой потере энергии осаждающимися в ИР атомами и их фиксации на холодной подложке практически без миграции по поверхности. В результате формируется плёнка из «замороженных» в месте падения атомов, что приводит к более неупорядоченной структуре плёнки в целом. При последующей лазерной обработке такая плёнка хуже кристаллизуется по сравнению с плёнкой, полученной в режиме постоянного тока, что и подтверждается результатами измерений методом КРС.

Известно [22], что сдвиг пика КРС ТО-моды кристаллической фазы кремния возможен не только в результате размерного ограничения, но и в случае наличия механических напряже-



ний в изучаемом образце. Так как изучаемые образцы сформированы на гибкой полимерной подложке, существует возможность индуцировать дополнительные напряжения в образцах, изогнув ПИ подложку с кристаллизованной плёнкой. Для этого с помощью фотополимерной трёхмерной печати была создана оснастка, позволяющая проводить измерения методом КРС изогнутого на 40° образца (рис. 2). Как видно из рисунка, изгиб приводил к возникновению дополнительных сжимающих напряжений в образцах.

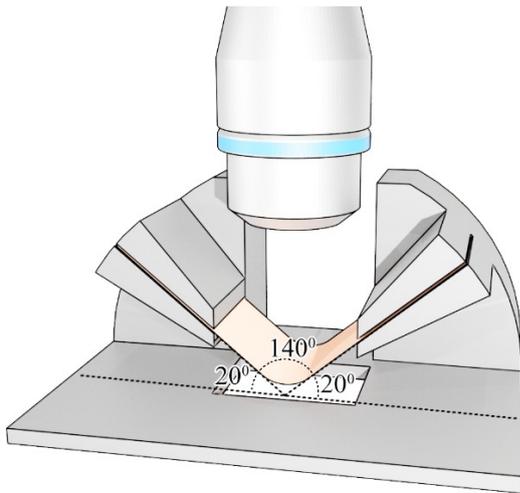


Рис. 2. Иллюстрация измерения методом КРС образца, изогнутого под углом 40°

Fig. 2. Illustration of Raman measurement of a sample bent at an angle of 40°

Заметный сдвиг положения пика ТО моды кристаллического кремния обнаружен только на образце ПР, для образца ИР положение пика осталось неизменным. При этом полуширина пиков для обоих образцов существенно увеличилась при изгибе. Результаты измерений методом КРС при изогнутом и выпрямленном состоянии образцов приведены в табл. 2. Следует отметить, что после извлечения из оснастки образцы были вновь измерены в расправленном состоянии. Результаты измерений показали обратимый характер деформации, так как положение

пика ТО моды не изменилось (в пределах погрешности измерений) относительно измерений до изгиба. Дополнительная иллюстрация сдвига положения ТО моды кристаллического кремния приведена на рис. 3.

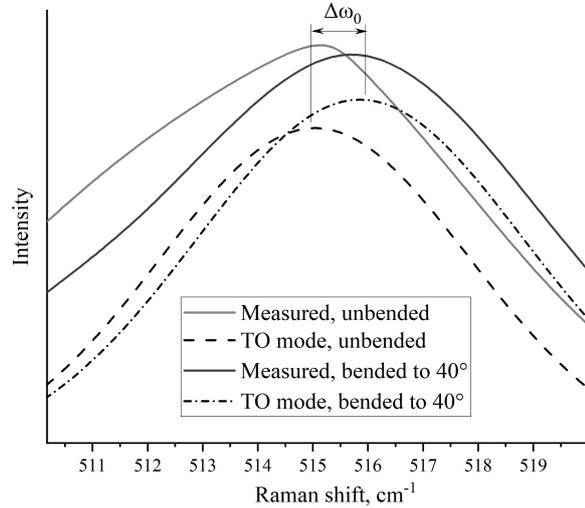


Рис. 3. Сдвиг пика ТО моды кристаллического кремния при изгибе для образца ПР

Fig. 3. Shift of the peak of the TO mode of crystalline silicon during bending for a CM sample

Как видно из приведённых данных, наблюдается сдвиг пика ТО моды кристаллического кремния в сторону больших волновых чисел для образца ПР. Согласно литературным данным [22, 23] такой сдвиг соответствует возникновению сжимающих напряжений в образце или уменьшению растягивающих напряжений. Так как при изгибе ПИ изменения размеров кристаллитов в образце не произошло (не было обнаружено ни трещин, ни отслоений плёнки от ПИ подложки), можно сделать вывод об изменении положения ТО пика только в результате приложения к плёнке кремния сжимающего напряжения.

Оценим изменения напряжения в образце ПР при переходе из прямого и изогнутое состояние [24, с. 9132, формула (2)]:

$$\sigma = -0.27\Delta\omega. \quad (4)$$

Таблица 2 / Table 2

Результаты исследований методом КРС при изгибе образцов
Results of studies using the Raman method during bending of samples

Угол изгиба, ° / Bending angle, °	ПР / CM		ИР / PM	
	Положение, см ⁻¹ / Position, cm ⁻¹	Полуширина, см ⁻¹ / Half-width, cm ⁻¹	Положение, см ⁻¹ / Position, cm ⁻¹	Полуширина, см ⁻¹ / Half-width, cm ⁻¹
0	515.0 ± 0.8	2.7 ± 1.3	516.1 ± 0.5	2.4 ± 0.4
40	516.0 ± 0.2	6.5 ± 0.6	516.1 ± 0.1	5.4 ± 1.8



Расчёт показал, что при изгибе произошло увеличение сжимающего напряжения на 270 МПа. При этом не ясно, почему не наблюдается сдвига пика в спектре изогнутого на 40° образца ИР. Можно предположить, что это объясняется более высоким содержанием аморфной фазы в данном образце. Аморфная фаза сосредоточена на границах кристаллизованных участков и окружает их. Следовательно, ввиду большого предела упругости аморфной фазы по сравнению с кристаллической, она демпфирует прилагаемое к образцу напряжение. В результате кристаллизованные участки практически не испытывают влияния изгиба образца, и положение пика ТО моды остаётся неизменным.

Увеличение полуширины пиков ТО моды кристаллического кремния для обоих образцов при изгибе связано с уменьшением времени жизни оптического фонона в кремниевых кристаллитах. При этом полуширина увеличивается в 2.4 раза для образца ПР и в 2.25 раза для образца ИР. Несколько большее увеличение полуширины для образца ПР можно объяснить возникновением дополнительного сжимающего напряжения в кристаллитах, которое в образце ИР нивелировано большим содержанием аморфной фазы. Уменьшение времени жизни оптического фонона в целом обусловлено искажением границ между кристаллитами и аморфными прослойками при изгибе образца.

Заключение

В настоящей работе были изучены кристаллизованные кремниевые плёнки на гибкой полиимидной подложке. В результате проведённых работ было обнаружено влияние режима магнетронного напыления на результаты кристаллизации плёнки аморфного кремния с применением олова в качестве поглощающего слоя. Кристаллизованная кремниевая плёнка, полученная в импульсном режиме распыления, содержит 46% аморфной фазы, в то время как напылённая в постоянном режиме только 33%. С помощью метода КРС выявлено различное поведение кристаллизованных плёнок при изгибе полимерной подложки. В процессе отжига в плёнке с высоким содержанием аморфной фазы концентрируется возникающее механическое напряжение в аморфных межкристаллитных прослойках. При этом в плёнке с низким содержанием аморфной фазы механические напряжения уже частично распространяются и на кристаллизованные области,

двигая пик ТО моды кристаллического кремния в сторону больших волновых чисел.

Список литературы/References

1. Sabatino M. D., Hendawi R., Garcia A. S. Silicon Solar Cells: Trends, Manufacturing Challenges, and AI Perspectives. *Crystals*, 2024, vol. 14, iss. 2, article no. 167. <https://doi.org/10.3390/cryst14020167>
2. Lovett A. J., Daramalla V., Nayak D., Sayed F. N., Mahadevegowda A., Ducati C., Spencer B. F., Dutton S. E., Grey C. P., MacManus-Driscoll J. L. 3D Nanocomposite Thin Film Cathodes for Micro-Batteries with Enhanced High-Rate Electrochemical Performance over Planar Films. *Advanced Energy Materials*, 2023, vol. 13, iss. 38, article no. 2302053. <https://doi.org/10.1002/aenm.202302053>
3. Feng L., Song S., Li H., He R., Chen S., Wang J., Zhao G., Zhao X. Nano-Biosensors Based on Noble Metal and Semiconductor Materials: Emerging Trends and Future Prospects. *Metals*, 2023, vol. 13, iss. 4, article no. 792. <https://doi.org/10.3390/met13040792>
4. Sreejith S., Ajayan J., Kollem S., Sivasankari B. A Comprehensive Review on Thin Film Amorphous Silicon Solar Cells. *Silicon*, 2022, vol. 14, pp. 8277–8293. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01644-w>
5. Kang H. Crystalline Silicon vs. Amorphous Silicon: The Significance of Structural Differences in Photovoltaic Applications. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2021, vol. 726, article no. 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/726/1/012001>
6. Dong X., Chen L., Su X., Wang Y., Xia Y. Flexible aqueous lithium-ion battery with high safety and large volumetric energy density. *Angew Chem. Int. Ed. Engl.*, 2016, vol. 55, pp. 7474–7477. <https://doi.org/10.1002/anie.201602766>
7. Cao Y., Zhang G., Zhang Y., Yue M., Chen Y., Cai S., Xie T., Feng X. Direct fabrication of stretchable electronics on a polymer substrate with process-integrated programmable rigidity. *Adv. Funct. Mater.*, 2018, vol. 28, pp. 7474–7477. <https://doi.org/10.1002/adfm.201804604>
8. Chortos A., Liu J., Bao Z. Pursuing prosthetic electronic skin. *Nat. Mater.*, 2016, vol. 15, pp. 937–950. <https://doi.org/10.1038/nmat4671>
9. Serdobintsev A. A., Kozhevnikov I. O., Starodubov A. V., Ryabukho P. V., Galushka V. V., Pavlov A. M. Thin amorphous silicon films crystallization upon flexible substrates. *Phys. Status Solidi A*, 2019, vol. 216, iss. 11, pp. 201–207. <https://doi.org/10.1002/pssa.201800964>
10. Serdobintsev A. A., Kartashova A. M., Demina P. A., Volkovojnova L. D., Kozhevnikov I. O., Galushka V. V. Laser-stimulated metal-induced crystallization of silicon coatings on film and nanofiber polymer substrates. *Technical Physics*, 2024, vol. 69, iss. 3, pp. 469–477.
11. Samohvalov F. A., Smirnov N. I., Rodionov A. A., Zamchij A. O., Baranov E. A., Shuhov Ju. G., Fedotov A. S., Starinskij S. V. Au-induced crystallization of non-stoichiometric amorphous silicon oxide initiated by



- nanosecond laser pulses. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2023, no. 2, pp. 381–385 (in Russian).
12. Vogt M. R. *Development of physical models for the simulation of optical properties of solar cell modules*. Hanover, Gottfried Wilhelm Leibniz University of Hanover, 2015. 154 p.
 13. Golovashkin A. I., Motulevich G. P. Optical and electrical properties of tin. *Sov. Phys. JETP*, 1964, vol. 19, pp. 310–317.
 14. French R. H., Rodríguez-Parada J. M., Yang M. K., Derbyberry R. A., Lemon M. F., Brown M. J., Haeger C. R., Samuels S. L., Romano E. C., Richardson R. E. Optical properties of materials for concentrator photovoltaic systems. *34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2009, vol. 34, pp. 000394–000399. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2009.5411657>
 15. Volkovoyanova L. D., Kozhevnikov I. O., Pavlov A. M., Serdobintsev A. A., Starodubov A. V. Heat transfer estimation during laser-assisted metal-induced crystallization of amorphous silicon films. *Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2022)*, 2022, vol. 8, pp. 916–920. <https://doi.org/10.56761/EFRE2022.C3-P-005701>
 16. Terekhov V. A., Terukov E. I., Undalov Y. K., Barkov K. A., Kurilo N. A., Ivkov S. A., Nesterov D. N., Seredin P. V., Goloshchapov D. L., Minakov D. A., Popova E. V., Lukin A. N., Trapeznikova I. N. Effect of Plasma Oxygen Content on the Size and Content of Silicon Nanoclusters in Amorphous SiO_x Films Obtained with Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition. *Symmetry*, 2023, vol. 15, iss. 9, article no. 1800. <https://doi.org/10.3390/sym15091800>
 17. Reindl A., Aldabergenova S., Altin E., Frank G., Peukert W. Dispersing silicon nanoparticles in a stirred media mill – investigating the evolution of morphology, structure and oxide formation. *Phys. Status Solidi A*, 2007, vol. 204, iss. 7, pp. 2329–2338. <https://doi.org/10.1002/pssa.200622557>
 18. Volodin V. A., Sachkov V. A. Improved model of optical phonon confinement in silicon nanocrystals. *Solids and Liquids*, 2013, vol. 116, pp. 87–94. <https://doi.org/10.7868/S0044451013010100>
 19. McCarthy J., Perova T. S., Moore R. A., Bhattacharya S., Gamble H., Armstrong B. M. Composition and stress analysis in Si structures using micro-Raman spectroscopy. *Scanning*, 2004, vol. 26, iss. 5, pp. 235–239. <https://doi.org/10.1002/sca.4950260504>
 20. Zhigunov D. M., Kamaev G. N., Kashkarov P. K., Volodin V. A. On Raman scattering cross section ratio of crystalline and microcrystalline to amorphous. *Appl. Phys. Lett*, 2018, vol. 113, iss. 5, article no. 023101. <https://doi.org/10.1063/1.5037008>
 21. Serdobintsev A. A., Veselov A. G., Kiryasova O. A., Portnov S. A., Bratashov D. N. Low-temperature plasma pulsed deposition of thin films with nanoscale periodicity of properties. *Semiconductors*, 2009, vol. 43, iss. 6, pp. 828–831. <https://doi.org/10.1134/S106378260906027X>
 22. Li X., Jin S., Zhang R., Gao Y., Liu Z., Yao Y., Wang Y., Wang X., Zhang Y., Tao X. The resolution and repeatability of stress measurement by Raman and EBSD in silicon. *Vacuum*, 2022, vol. 203, article no. 111276. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111276>
 23. Pogue V., Melkote S. N., Danyluk S. Residual stresses in multi-crystalline silicon photovoltaic wafers due to casting and wire sawing. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2018, vol. 75, pp. 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2017.11.009>
 24. Lengsfeld P., Nickel N. H., Genzel C., Fuhs W. Stress in undoped and doped laser crystallized poly-Si. *Journal of Applied Physics*, 2022, vol. 91, iss. 11, pp. 9128–9135. <https://doi.org/10.1063/1.476083>

Поступила в редакцию 21.05.2024; одобрена после рецензирования 08.07.2024; принята к публикации 15.07.2024
The article was submitted 21.05.2024; approved after reviewing 08.07.2024; accepted for publication 15.07.2024