Анизотропное микро- и наноструктурирование пленок аморфного кремния фемтосекундными лазерными импульсами

С.В. Заботнов¹, А.Г. Казанский², П.К. Кашкаров¹, А.В.

Павликов¹, Д.Е. Преснов^{3,4}, И.А. Романов⁵, Д.В. Шулейко¹*

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет

кафедра общей физики и молекулярной электроники

кафедра физики полупроводников ^Злаборатория криоэлектроники

⁴ Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

⁵Белорусский государственный университет

Республика Беларусь, 220030,

Минск, пр. Независимости, д.4

(Статья поступила 28.06.2017; Подписана в печать 30.06.2017)

Показано, что облучение пленок аморфного гидрогенизированного кремния фемтосекундными лазерными импульсами (1.25 мкм) приводит к формированию поверхностного рельефа в виде одномерных решеток с периодом 1.20±0.02 мкм, ориентация которых определяется направлением вектора поляризации использованного излучения и совокупной дозой экспозиции. В облученных областях пленок зарегистрировано присутствие нанокристаллической фазы кремния, объемная доля которой составляет от 40 до 67% согласно анализу спектров комбинационного рассеяния света. Наблюдаемые процессы микро- и наноструктурирования обусловлены возбуждением поверхностных плазмон-поляритонов и нанокристаллизацией в приповерхностной области соответственно в поле мощных фемтосекундных лазерных импульсов. Также в результате лазерной обработки с большой совокупной дозой экспозиции происходит формирование полиморфных модификаций кремния Si-III и Si-XII. В результате фемтосекундной лазерной нанокристаллизации иленки зарегистрированы рост проводимости на 3 порядка по сравнению с необлученной аморфной поверхностью и анизотропия данной величины, объясняемая неравномерным распределением интенсивности в поперечном сечении лазерного луча и анизотропией формы сформированного микрорельефа.

РАСS: 79.20.Еb, 68.35.bj, 73.61.-г УДК: 539.213.2, 538.958, 537.31 Ключевые слова: аморфный кремний, кремниевые нанокристаллы, фемтосекундная лазерная модификация, поверхностные периодические структуры.

введение

Аморфный гидрогенизированный кремний (a-Si:H), модифицированный фемтосекундными лазерными импульсами, представляет интерес для тонкопленочной солнечной энергетики. Обработка пленок a-Si:Н сверхкороткими лазерными импульсами позволяет получить однородно распределенные по объему пленки нанокристаллы кремния [1-4], что приводит к росту проводимости, а также уменьшает наблюдаемый в таких системах эффект Стеблера-Вронского. Кроме того, при фемтосекундной лазерной обработке пленок a-Si:Н происходит структурирование их поверхности, что позволяет повысить эффективность солнечных элементов на основе данного материала за счет увеличения поглощающей способности [5-7]. При этом может быть также достигнута анизотропия структурных, оптических и электрофизических свойств облученной поверхности. В частности, под действием мощных сверхкоротких лазерных импульсов на пленках a-Si:Н могут быть получены поверхностные периодические структуры (ППС)

за счет эффективной генерации электрон-дырочной плазмы в полупроводнике с последующим возбуждением плазмон-поляритонов [8, 9]. Такие пленки а-Si:Н могут быть использованы для создания двулучепреломляющих элементов оптики, когда при обработке возникают ППС, в которых проявляется анизотропия формы в виде периодической модуляции комплексного показателя преломления обработанного материала [10]. При этом, как показано в работе [8], вид и ориентация поверхностного рельефа может контролироваться за счет изменения режима фемтосекундной лазерной обработки, что позволяет создавать на основе a-Si:Н оптические элементы субмикронной толщины на поверхности пленки.

Тем не менее, универсального подхода, позволяющего связать режимы обработки поверхности a-Si:H фемтосекундными лазерными импульсами, структурные особенности формируемого рельефа и электрофизические свойства облученной поверхности в настоящее время не существует. Для решения данной задачи, в частности, требуется выявление закономерностей, возникающих между формируемым на поверхности a-Si:H рельефом, изменением степени кристалличности, образованием полиморфных модификаций кремния, а также наблюдаемой при этом анизотропией

^{*}E-mail: shuleyko.dmitriy@physics.msu.ru

электрофизических свойств в результате фемтосекундной лазерной обработки. В настоящей работе выполнены эксперименты по установлению и описанию таких закономерностей применительно к пленкам a-Si:H, модифицированным фемтосекундным лазерным излучением при варьировании совокупной дозы облучения (времени экспозиции).

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ

Для проведения исследований, пленки a-Si:Н толщиной 600 нм, полученные методом плазмохимического осаждения из газовой фазы на стеклянных подложках [2, 8], были облучены фемтосекундными лазерными импульсами. В качестве источника излучения была использована фемтосекундная лазерная система «Авеста» на основе кристалла хром-форстерита (длина волны излучения — 1250 нм, длительность, энергия и частота следования импульсов - 125 фс, 130 мкДж и 10 Гц соответственно). В ходе эксперимента была получена серия из 7 образцов в режиме сканирования лазерным пучком в одном направлении со скоростью от 3 до 150 мкм/с (табл. 1), когда на пленках формируются модифицированные области в виде одиночных полос длиной 0.4 мм. Режим сканирования реализовывался путем перемещения образца с помощью системы из двух автоматизированных механических трансляторов «Standa», управляемых с помощью персонального компьютера, по двум координатам в горизонтальной плоскости. Диаметр пятна лазерного излучения составлял от 200 до 300 мкм, чтобы обеспечить плотность энергии в импульсе 0.15 Дж/см². Для каждого из образцов было проведено сканирование как в направлении, совпадающем с ориентацией вектора поляризации лазерного излучения, так и перпендикулярно ему, чтобы определить влияние анизотропии обработки на наблюдаемые свойства модифицированных пленок. За счет изменения скорости сканирования варьировалась степень наложения облученных областей от двух последовательных импульсов, что определяло общее число перекрытий N_{имп} в пределах диаметра сфокусированного пятна лазерного излучения. Величина N_{имп} определяет количество импульсов лазерного излучения, прошедших за время смещения пучка на расстояние, равное диаметру пятна:

$$N_{\rm MMI} = \nu D/V \tag{1}$$

где ν — частота следования импульсов, D — размер пятна лазерного излучения, V — скорость сканирования. В ходе эксперимента скорость перемещения пучка менялась таким образом, чтобы число перекрытий пятен лазерного излучения составляло от 20 до 1000 (табл. 1).

Для исследования электрофизических свойств пленок a-Si:H, модифицированных фемтосекундными лазерными импульсами был сформирован образец 8, об-

УЗФФ 2017

работка которого проводилась в растровом режиме: образец перемещался перпендикулярно пучку излучения по одной координате непрерывно, а по другой — дискретно с шагом 150 мкм. Фокусировка пучка и плотность энергии в импульсе оставались такими же, как и для образцов 1-7. Скорость сканирования равнялась 50 мкм/с. Подобный метод обработки позволил сформировать на поверхности пленки квадратную область размером 5 мм×5 мм, на которой можно было наблюдать так называемые полосы сканирования с шириной, равной шагу дискретного перемещения ~ 150 мкм, как показано на рис. 1. Данные полосы сканирования также представляют собой ППС, но большего масштаба по сравнению со структурами, формируемыми за счет генерации плазмон-поляритонов и также наблюдаемыми при этом в пределах каждой полосы сканирования. Оба типа ППС были ориентированы в одном направлении. Для образца 8 указанная скорость сканирования была выбрана, исходя из того, что в данном режиме обработки согласно данным растровой электронной микроскопии формируемые маломасштабные ППС имеют максимально выраженный рельеф, что позволяет наилучшим образом выявить основные особенности анизотропии электрофизических свойств модифицированных пленок a-Si:H.



Рис. 1: Схема обработки образца 8 в растровом режиме

Изображения модифицированной поверхности пленок a-Si:Н были получены с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) «Carl Zeiss Supra 40».

Определение структурных изменений обработанных лазерным излучением пленок a-Si:Н проводилось методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) с использованием рамановского микроскопа «Horiba Jobin Yvon HR800», длина волны возбуждающего излучения составляла 633 нм. Спектры измерялись при нормальном падении и различном направлении вектора поляризации возбуждающего излучения с использованием полуволновой пластины.

Для измерения электрофизических свойств пленок a-Si:H до и после облучения фемтосекундными лазерными импульсами использовался пикоамперметр «Keithley 6487». Определение проводимости пленки

Образец	Режим обработки	Скорость сканирования, мкм/с	Число перекрытий лазерных импульсов
	Сканирование		
1	в одном направлении	150	20
2		100	30
3		45	70
4		30	100
5		15	200
6		6	500
7		3	1000
8	Растровое сканирование	50	40

Таблица I: Параметры скорости сканирования и числа перекрытий пятен от импульсов лазерного излучения при фемтосекундной лазерной модификации пленки a-Si:H

производилось в плоскости подложки в двух перпендикулярных направлениях: на образец 8 были напылены две пары алюминиевых контактов, расположенных вдоль и перпендикулярно полосам сканирования, соответственно; алюминиевые контакты были напылены также на немодифицированную пленку a-Si:H.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методом РЭМ было показано, что на обработанной поверхности a-Si:Н формируются микроструктуры (рис. 2), представляющие собой одномерные ППС с периодом, близким к длине волны используемого лазерного излучения, что значительно меньше диаметра лазерного пятна. Данные структуры ориентированы перпендикулярно или параллельно вектору поляризации фемтосекундного лазерного излучения в зависимости от эффективной дозы облучения, которая задавалась числом перекрывающихся при сканирующей обработке пятен от импульсов лазерного излучения N_{имп} (согласно формуле (1)). При числе перекрытий от 30 до 100 формируются ППС, ориентированные перпендикулярно вектору поляризации, и имеющие период 1.20±0.02 мкм (рис. 2,а). При уменьшении скорости сканирования и, соответственно, увеличении числа перекрытий импульсов лазерного излучения более 100 вместо данных решеток формируются кластерные образования длиной ~ 400 и шириной ~ 100 нм, ориентированные вдоль вектора поляризации лазерного излучения (рис. 2,б). При дальнейшем увеличении числа перекрытий импульсов до 500 и более, снова образуются одномерные решетки с тем же, что при малом числе перекрытий, периодом, но уже ориентированные вдоль вектора поляризации лазерного излучения (рис. 2, в). При этом ориентация всех типов структур определяется только направлением вектора поляризации использованного лазерного излучения и не зависит от направления сканирования пленки пучком.

Стоит отметить, что во всех случаях обработка пле-

нок происходила в режиме выше порога абляции, который составляет, по данным из работ [11, 12], не более 0.09 Дж/см² для пленок a-Si:H. В таком режиме формирование ППС на поверхности полупроводника, вероятнее всего, происходит из-за генерации электрон-дырочной плазмы в пленке при интенсивном фотовозбуждении фемтосекундными лазерными импульсами, когда происходит переход поверхности пленки в металлоподобное состояние и создаются условия для возбуждения поверхностных плазмонполяритонов [9, 13]. Интерференция падающего излучения и плазмон-поляритона приводит к периодической модуляции интенсивности поглощения и, следовательно, модулированной абляции облучаемого вещества. При этом ориентация формируемых ППС зависит от знака диэлектрической проницаемости є в приповерхностной области, который определяет тип возбуждаемого плазмон-поляритона [9, 13]. Эволюция формы ППС, наблюдаемая при увеличении совокупной дозы облучения, связана с возникновением обратной связи [14] между формируемым поверхностным рельефом и электронными процессами, протекающими в пленке a-Si:Н при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов. За счет формирования поверхностного рельефа под действием импульсов лазерного излучения фемтосекундной длительности увеличивается поглощающая способность пленки [5-7]. В результате под воздействием каждого следующего импульса происходит более сильный нагрев пленки а-Si:H, что обуславливает увеличение эмиссии электронов с поверхности полупроводника и приводит к изменению с положительного на отрицательный знака диэлектрической проницаемости в приповерхностной области и, как следствие, изменению моды возбуждаемых плазмон-поляритонов с ТМ на ТЕ тип и ориентации формируемых ППС [9, 13].

Исследования спектров КРС показали, что во всех случаях происходила нанокристаллизация пленок. Во всех спектрах для облученных областей наблюдается широкая линия, соответствующая аморфному кремнию $\omega_A - 480$ см⁻¹, а также узкая линия, соответствую-



Рис. 2: Изображения поверхности пленки a-Si:H, обработанной фемтосекундными лазерными импульсами с плотностью потока энергии 0.14 Дж/см² и числом перекрытий лазерных импульсов 70 (*a*), 200 (*б*) и 1000 (*в*), полученные методом РЭМ

щая кристаллическому (нанокристаллическому) кремнию $\omega_C - 520 \text{ см}^{-1}$ (рис. 3).

Для оценки объемной доли кристаллической фазы f_C в образце 8, предназначенном для исследования электрофизических свойств, вычислялись интегральные интенсивности I_A и I_C TO фононных мод, соответствующих линиям вблизи частот ω_A и ω_C , а также интегральная интенсивность так называемой «промежуточной» линии I_I , соответствующей частоте ω_I около 500 см⁻¹ (рис. 3). Интерпретация последней связана с наличием кремниевых кластеров размерами менее 10 нм [15] или с возникновением промежуточной фазы на границе раздела аморфного и кристаллического вещества [16].

Значение f_C определяется с помощью следующего выражения [17, 18]:

$$f_C = \frac{I_C + I_I}{\sigma_0 I_A + I_C + I_I},\tag{2}$$

где $\sigma_0 = 0.1 + \exp(-d_{nc-Si}/25)$ — эмпирическое соотношение для отношения интегральных сечений комбинационного рассеяния света в кристаллической и аморфной фазах кремния [19], а d_{nc-Si} — средний диаметр нанокристаллов кремния в нм, который в наших расчетах брался равным 10 нм по данным РЭМ.

Из-за неоднородного распределения интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка степень кристаллизации образца 8 в пределах каждой полосы сканирования была неравномерной: объемная доля кристаллической фазы составляет 40% на краях полос сканирования и 67% в центре данных полос (рис. 1).

Кроме линий аморфного и кристаллического кремния, в спектре КРС образцов, обработанных при числе перекрытий импульсов $N_{\rm имп} > 500$, наблюдается группа линий с положениями 160, 353, 386, 390 и 440 см⁻¹. (рис. 4,*a*). Известно [20], что полиморфная модификация кремния Si-XII (ромбоэдрическая) характеризуется линиями КРС, расположенными при 166, 182, 352,

396, 440 и 491 см⁻¹, а Si-III (кубическая объёмноцентрированная) — линиями КРС с положениями 166 и 385 см⁻¹. Образование данных полиморфных модификаций происходит, как правило, при возникновении областей с высоким давлением [20]. Формирование полиморфных модификаций при облучении кремния фемтосекундными лазерными импульсами наблюдалось и изучалось в работах [21-25]. Условия для формирования полиморфных модификаций кремния могут возникать как во время обработки за счет сверхбыстрого увеличения и последующего уменьшения давления из-за реактивной отдачи аблированного материала при воздействии мощных фемтосекундных лазерных импульсов [21, 24], так и за счет механических напряжений, возникающих при повторном затвердевании расплава после окончания действия лазерного излучения [25].

При исследовании поляризационной зависимости спектров КРС обнаружено также, что интенсивность линий, соответствующих полиморфным модификациям нанокристаллов кремния, зависит от поляризации используемого в измерениях КРС возбуждения. Наибольшая интенсивность линии КРС 353 см⁻¹ наблюдается, если направление векторов поляризации возбуждающего излучения и фемтосекундных лазерных импульсов, использованных при обработке, совпадает. При ориентации вектора поляризации возбуждающего излучения в перпендикулярном направлении интенсивность данной линии спадает в ~ 5 раз (рис. 4, ϕ). Зависимость интенсивности пика от поляризации возбуждающего излучения может быть связана с образованием периодических структур на поверхности пленки. Однако в проведенных нами экспериментах данная зависимость наблюдается и при отсутствии ППС. Поэтому, по нашему мнению, такая зависимость может быть обусловлена тем, что нанокристаллы полиморфных модификаций кремния, которые образуются при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов



Рис. 3: Спектры КРС образца 8, соответствующие границе (а) и центру (б) полос сканирования

с линейной поляризацией, имеют форму, отличную от сферической. Анизотропия сигнала КРС в данном случае может быть связана с тем, что несферические наночастицы полиморфных модификаций кремния, а также оси их кристаллических решеток, ориентированы преимущественно в одном направлении относительно вектора поляризации используемого при обработке лазерного излучения [26–28].

Исследования электрофизических свойств пленок а-Si:H показали, что после обработки фемтосекундным лазерным излучением величина удельной проводимости a-Si:H выросла на 3 порядка (табл. 2), с ~ 10^{-9} до ~ 10^{-6} (Ом·см)⁻¹, что объясняется нанокристаллизацией пленки: под действием сверхкоротких импульсов высокой мощности происходит образование кремниевых нанокристаллов с более высокой удельной проводимостью [1]. Кроме того, обнаружена анизотропия проводимости облученной поверхности: вдоль направления сканирования пленки лазерным лучом значение удельной проводимости почти в 3 раза превышает величину удельной проводимости для перпендикулярного сканированию направления (табл. 2).

Наблюдаемые особенности могут быть объяснены как неравномерной кристаллизацией a-Si:H в полосе сканирования (рис. 3) за счет неоднородного распределения энергии в поперечном сечении пучка лазерного излучения, так и анизотропией формы [29] сформированных маломасштабных поверхностных решёток.

Неравномерная кристаллизация полосы сканирования от центра к краю обеспечивает высокую проводимость вдоль полосы сканирования за счет наличия в данном направлении явно выраженных нанокристаллических каналов. В то время как в ортогональном направлении наблюдается чередование областей с высокой и низкой степенью кристалличности.

Анизотропия проводимости маломасштабных ППС может быть описана в электростатическом приближении с помощью модели эффективной среды в приближении Бруггемана [30, 31], которое позволяет также рассчитать среднюю объемную долю f_C нанокристал-

лической фазы в пленке. Значение данной величины в случае измерения проводимости в плоскости модифицированной пленки, как в перпендикулярном, так и в параллельном ППС направлении, определяется из выражения [30, 31]:

$$f \frac{\sigma_{\perp,\parallel} - \sigma_c}{\sigma_{\perp,\parallel} + g_{\perp,\parallel} \left(\sigma_c - \sigma_{\perp,\parallel}\right)} + \left(1 - f_c\right) \frac{\sigma_{\perp,\parallel} - \sigma_a}{\sigma_{\perp,\parallel} + g_{\perp,\parallel} \left(\sigma_a - \sigma_{\perp,\parallel}\right)} = 0, \quad (3)$$

где $\sigma_{\perp,\parallel}$ — значение эффективной проводимости в направлении, перпендикулярном (⊥) или параллельном (||) ППС, σ_c и σ_a — проводимости, соответственно, кристаллической и аморфной фазы; $g_{\perp,\parallel}$ — фактор деполяризации поверхностного рельефа. В нашем случае ППС можно рассматривать в виде цилиндрических массивов кремниевых нанокристаллов [32], разделенных аморфной фазой (рис. 5), так как толщина пленки в 600 нм сравнима с их периодом. Поэтому в случае, когда внешнее электрическое поле приложено перпендикулярно ППС, $g_{\perp} = 1/2$, а в случае параллельной геометрии $g_{\parallel} = 0$. При расчетах предполагалось, что проводимость аморфной фазы σ_a равна значению проводимости a-Si:H, представленному в табл. 2. Значения f_c и σ_c рассчитывались по формуле (3), позволяющей составить систему уравнений для параллельной и перпендикулярной геометрии измерений.

Таким образом были рассчитаны значения неизвестных параметров: $f_c = 0.60 \pm 0.02$, что согласуется с данными спектроскопии КРС для центра полосы сканирования. Значение удельной проводимости для нанокристаллической фазы оказалось равным $\sigma_c = (7.4 \pm 0.1) \times 10^{-6} \text{ (Ом} \cdot \text{см})^{-1}$, что близко к величине проводимости нелегированного поликристаллического кремния [33].



Рис. 4: Спектр КРС пленки a-Si:H, модифицированной фемтосекундными лазерными импульсами с плотностью потока 0.14 Дж/см² и числом перекрытий лазерных импульсов 500 (*a*); поляризационная зависимость интенсивности пиков КРС, соответствующих монокристаллическому кремнию и полиморфной модификации Si-III (*б*), сплошные линии — аппроксимация. Нулевой угол соответствует направлению вектора поляризации возбуждающего КРС излучения, когда он совпадает с ориентацией вектора поляризации структурирующего фемтосекундного излучени

Таблица II: Удельная проводимость пленки аморфного кремния до и после облучения фемтосекундными лазерными импульсами

Образец	Удельная проводимость σ , (Ом·см) $^{-1}$
Облученная область, контакты параллельны полосам сканирования и ППС	1.58×10^{-6}
Облученная область, контакты перпендикулярны полосам сканирования и ППС	4.48×10^{-6}
Аморфный кремний	6.73×10^{-9}



Рис. 5: Приближение массива цилиндров для формы ППС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что увеличение совокупной дозы экспозиции фемтосекундным лазерным излучением пленок a-Si:Н приводит к изменению ориентации ППС, формирующихся при данном способе модификации пленок. Наблюдаемый эффект, по-видимому, связан с возникновением обратной связи между формируемым поверхностным рельефом и электронными процессами в пленке, когда в процессе формирования ППС увеличивается поглощающая способность пленки a-Si:H и происходит более сильный ее нагрев, сопровождающийся эффективной эмиссией электронов с поверхности полупроводника и изменением знака диэлектрической проницаемости в приповерхностном слое. В результате этого вместо ТМ моды плазмонполяритонов происходит возбуждение ТЕ моды и ориентация формируемых ППС меняется на ортогональную по сравнению с наблюдаемой при структурировании фемтосекундными лазерными импульсами меньшей интенсивности.

Также обнаружено, что при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов в пленке a-Si:H происходит образование полиморфных модификаций кристаллического кремния (Si-III и Si-XII) в результате фазовых переходов, которые могут быть вызваны как высоким давлением, возникающим из-за реактивной отдачи аблированного материала при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов, так и механическими напряжениями, возникающими при повторном затвердевании пленки. Обнаружена анизотропия сигнала КРС, соответствующего данным полиморфным модификациям кремния, связанная, по нашему мнению, с упорядоченной ориентацией кристаллографических осей нанокристаллов кремния в одном из направлений относительно вектора поляризации фемтосекундных лазерных импульсов, использованных при обработке. Электрофизические измерения показали, что проводимость пленки a-Si:Н после фемтосекундной лазерной обработки выросла на 3 порядка в результате нанокристаллизации пленки. Обнаружена также анизотропия проводимости модифицированных пленок, объясняемая анизотропной кристаллизацией пленок при их сканировании лазерным лучом с неравномерным распределением интенсивности по его профилю и анизотропией формы, присущей маломасштабным ППС, согласующейся с расчетами в рамках модели эффективной среды.

Связь анизотропии структурных и электрофизиче-

 Emelyanov A. V., Khenkin M. V., Kazanskii A. G., Forsh P. A., Kashkarov P. K., Gecevicius M., Beresna M., Kazansky P. G. Thin Solid Films. 2014. 556. P. 410.

- [2] Емельянов А.В., Казанский А.Г., Кашкаров П.К., Коньков О.И., Теруков Е.И., Форш П.А., Хенкин М.В., Кукин А.В., Beresna M., Kazansky P. ФТП. 2012. 46, вып. 6. С.769.
- [3] Емельянов А. В., Перминов П. А., Форш П. А., Заботнов С. В., Казанский А. Г., Хенкин М. В., Кашкаров П. К. Наноматериалы и нанотехнологии. 2012. 1. С. 40.
- [4] Khenkin M., Kazanskii A., Emelyanov A., Forsh P., Beresna M., Gecevicius M., Kazansky P. Can. J. Phys. 2014. 92, N 7/8. P. 883.
- [5] Sarnet T., Halbwax M., Torres R., Delaporte P., Sentis M., Martinuzzi S., Vervisch V., Torregrosa F., Etienne H., Roux L. et al. Proc. of SPIE. 2008. 6881. Art. 688119,
- [6] Wang H., Kongsuwan P., Satoh G., Yao Y.L. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2013. 65. P. 1691.
- [7] Wang H., Kongsuwan P., Satoh G., Yao Y.L. J. Manuf. Sci. Eng. 2012. **134**, N 3. Art. 031006.
- [8] Drevinskas R., Beresna M., Geceviuius M., Khenkin M., Kazanskii A.G., Matulaitiene I., Niaura G., Konkov O.I., Terukov E. I., Svirko Y. P. et al. Appl. Phys. Letters. 2015. 106. Art. 171106.
- [9] Марциновский Г.А., Шандыбина Г.Д., Дементьева Ю.С., Дюкин Р.В., Заботнов С.В., Головань Л.А., Кашкаров П.К. ФТП. 2009. 43, № 10. С. 1339.
- [10] Yariv A., Yhe P. Optical Waves in Crystals. Wiley. New York, 1984.
- Soleymanzadeh B., Beyer W., Luekermann F., Differt D., Pfeiffer W., Stiebig H. Energy Procedia. V. 2014. 60.
 P. 90.
- [12] Denisova K. N., Fantina N. P., Ilin A. S., Martyshov M. N., Vorontsov A. S. Biosci., Biotech. Res. Asia. 2016. 13, N 4. P. 2359.
- [13] Марциновский Г.А., Шандыбина Г.Д., Смирнов Д.С., Заботнов С.В., Головань Л.А., Тимошенко В.Ю., Кашкаров П.К. Оптика и спектроскопия. 2008. 105, № 1. С. 55.
- [14] Varlamova O., Bounhalli M., Reif J. Appl. Surf. Sci. 2013.
 278. P. 62.

ских свойств модифицированного фемтосекундным лазерным излучением a-Si:H, показанная в нашей работе, открывает перспективы для создания новых поляризационно-чувствительных элементов оптоэлектроники и фотовольтаики на основе тонких пленок из данного материала.

Модификация пленок a-Si:H фемтосекундным лазерным излучением, измерения спектров КРС и удельной проводимости выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-52-04062 Бел_мол_а)

- [15] Kaneko T., Wagashi M., Onisawa K., Minemura T. Appl. Phys. Lett. 1994. 64. P. 1865.
- [16] Gogoi P., Dixit P.N., Agarwal P. Sol. Energy Mater. Solar Cells. 2007. 91. P. 1253.
- [17] Zhang L., Gao J.H., Xiao J.Q., Wen L. S., Gong J., Sun C. Appl. Surf. Sci. 2012. 258. P. 3221.
- [18] Elarbi N., Jeman R., Outzourhit A., Khirouni K. Appl. Phys. A. 2016. **122**. Art. 566.
- [19] Голубев В.Г., Давыдов В.Ю., Медведев А.В., Певцов А.Б., Феоктистов Н.А. ФТТ. 1997. **39**. С. 1348.
- [20] Chavoshi S. Z., Gallo S. C., Dong H., Luo X. Mater. Sci. Eng. A. 2017. 684. P. 385.
- [21] Reif J., Costache F., Kouteva-Arguirova S. Proc. of SPIE. 2004. 5448, N 2. P. 756.
- [22] Costache F., Kouteva-Arguirova S., Reif J. Appl. Phys. A. 2004. 79. P. 1429.
- [23] Costache F., Kouteva-Arguirova S., Reif J. Solid State Phenomena. 2004. 95. P. 635.
- [24] Smith M. J., Lin Y.-T., Sher M.-J., Winkler M. T., Mazur E., Gradeuak S. J. Appl. Phys. 2011. 110, N 5. Art. 053524.
- [25] Smith M.J., Sher M.-J., Frant, B., Lin, Y.-T., Mazur E., Gradeuak S. J. Appl. Phys. 2012. 112, N8. Art. 083518.
- [26] Ефремов М.Д., Болотов В.В., Володин В.А., Кочубей С.А., Кретинин А.В. ФТП. 2002. **36** вып. 1 С. 109.
- [27] Kuzmin P. G., Shafeev G. A., Bukin V. V., Garnov S. V., Farcau C., Carles R., Watot-Fontrose B., Guieu V., Viau G. J. Phys. Chem. C. 2010. 114. P. 15266.
- [28] Yu P. Y., Cardona M. Fundamentals of semiconductors. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [29] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973.
- [30] Dmitruk N.L., Goncharenko A. V., Venger E. F. Optics of small particles and composite media.. Kiev: SPE Publishing House Naukova Dumka, 2009.
- [31] Кашкаров П.К., Тимошенко В.Ю. Оптика твердого тела и систем пониженной размерности. М.: Физический факультет МГУ, 2009.
- [32] Emelyanov A. V., Kazanskii A. G., Kashkarov P. K., Konkov O. I., Kutuzov N. P., Lyaskovskii V. L., Forsh P. A., Khenkin M. V. Technical Physics Letters. 2014. 40, N 2. P. 141.
- [33] Saito Y., Aomori M. J. Appl. Phys. 1997. 81. P. 754.

УЗФФ 2017

1740601 - 7

Anisotropic micro- and nanostructuring of amorphous silicon films by femtosecond laser pulses

S. V. Zabotnov¹, A. G. Kazansky², P. K. Kashkarov¹, A. V. Pavlikov¹, D. E. Presnov^{3,4}, I. A. Romanov⁵, D. V. Shuleiko^{1,a}

Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University ¹Department of General Physics and Molecular Electronics ²Department of Semiconductors Physics ³Laboratory of Cryoelectronics ⁴Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Moscow, 119991, Russia ⁵Belarusian State University. Minsk, 220030, Republic of Belarus E-mail: ^ashuleyko.dmitriy@physics.msu.ru

In this paper it was shown that irradiation of amorphous hydrogenated silicon films by femtosecond laser pulses $(1.25\mu m)$ leads to formation of a one-dimensional surface relief with $1.20 \pm 0.02 \mu m$ period. Orientation of the formed structures is determined by polarization vector of the radiation used and the total exposure dose. Nanocrystalline silicon phase with volume fraction from 40 to 67% is detected in the irradiated films, according to the analysis of Raman spectra. Observed micro- and nanostructuring processes are due to surface plasmon-polariton excitation and near-surface region nanocrystallisation, respectively, caused by high-power femtosecond laser pulses. Also, after the laser treatment with a large exposure dose, the formation of Si-III and Si-XII silicon polymorphous modifications was observed. The conductivity of the film increased by 3 orders of magnitude after femtosecond laser nanocrystallization compared to the untreated amorphous surface. The conductivity anisotropy of the irradiated regions was also observed due to the non-uniform intensity distribution in the laser beam cross-section and depolarizing effect of the surface structure.

PACS: 79.20.Eb, 68.35.bj, 73.61.-r.

Keywords: amorphous silicon, silicon nanocrystals, femtosecond laser modification, surface periodic structures. *Received 28 June 2017*.

Сведения об авторах

- 1. Заботнов Станислав Васильевич канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-46-57, e-mail: zabotnov@physics.msu.ru.
- 2. Казанский Андрей Георгиевич доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник, профессор; e-mail: kazanski@phys.msu.ru.
- 3. Кашкаров Павел Константинович доктор физ.-мат. наук, зав. кафедрой, профессор; тел.: (495) 939-21-93, e-mail: Kashkarov_PK@nrcki.ru.
- 4. Павликов Александр Владимирович канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель; тел.: (495) 939-18-75, e-mail: pavlikov@physics.msu.ru.
- 5. Преснов Денис Евгеньевич канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-39-87, e-mail: denispresnov@yandex.ru.
- 6. Романов Иван Александрович аспирант; тел: +3 7529-210-26-19, e-mail: u235rv@gmail.com.
- 7. Шулейко Дмитрий Валерьевич аспирант; e-mail: shuleyko.dmitriy@physics.msu.ru.