

# Влияние фемтосекундного лазерного облучения пленок аморфного гидрогенизированного кремния на их структурные, оптические и фотоэлектрические свойства

© А.В. Емельянов<sup>\*¶</sup>, А.Г. Казанский<sup>\*</sup>, П.К. Кашкаров<sup>\*+</sup>, О.И. Коньков<sup>°</sup>, Е.И. Теруков<sup>°</sup>,  
П.А. Форш<sup>\*+</sup>, М.В. Хенкин<sup>\*</sup>, А.В. Кукин<sup>°</sup>, М. Veresna<sup>×</sup>, P. Kazansky<sup>×</sup>

<sup>\*</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (физический факультет),  
119991 Москва, Россия

<sup>+</sup> Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,  
123182 Москва, Россия

<sup>°</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>×</sup> Optoelectronics Research Centre, University of Southampton, UK

(Получена 1 декабря 2011 г. Принята к печати 6 декабря 2011 г.)

Исследовано влияние фемтосекундного лазерного облучения пленок гидрогенизированного аморфного кремния ( $a\text{-Si:H}$ ) на изменение их структурных, фотоэлектрических и оптических свойств. Используемые в работе условия проведения лазерной обработки различной интенсивности приводили к неоднородному по поверхности изменению структуры пленки. Рост интенсивности облучения приводил к увеличению вклада нанокристаллической фазы в усредненную по поверхности образца структуру, а также к увеличению проводимости и фотопроводимости исследованных образцов. В то же время спектральная зависимость коэффициента поглощения для всех исследованных образцов, полученная методом постоянного фототока, имела форму, характерную для пленок аморфного кремния. Полученные результаты указывают на возможность увеличения фотопроводимости в пленках  $a\text{-Si:H}$  в результате их облучения фемтосекундными лазерными импульсами.

## 1. Введение

Гидрогенизированный аморфный кремний ( $a\text{-Si:H}$ ) успешно используется в тонкопленочной солнечной энергетике. Одной из проблем, связанных с солнечными элементами на основе  $a\text{-Si:H}$ , является наблюдаемый в них эффект Стеблера–Вронского. Данный эффект заключается в увеличении концентрации оборванных связей в щели подвижности  $a\text{-Si:H}$  при длительном освещении пленок межзонным светом и приводит к деградации электрофизических свойств материала [1]. С целью уменьшения эффекта Стеблера–Вронского разработаны тандемные элементы на основе пленок аморфного и нанокристаллического ( $nc\text{-Si}$ ) кремния, эффективность и стабильность которых выше одноэлементных структур на основе  $a\text{-Si:H}$  [2]. При этом отмечается, что для оптимизации технологического процесса при создании подобных структур целесообразно использовать лазерную кристаллизацию  $a\text{-Si:H}$ .

В большинстве работ, посвященных лазерной кристаллизации  $a\text{-Si:H}$ , использовались пикосекундные и наносекундные лазерные импульсы с энергиями квантов излучения, существенно превышающими оптическую ширину запрещенной зоны  $a\text{-Si:H}$ , которая составляет 1.6–1.8 эВ [3,4]. В этом случае кристаллизация возникает в результате возбуждения приповерхностного слоя пленки лазерным излучением, ее плавления и последующей кристаллизации [5]. Неоднородное по толщине возбуждение пленки приводит к неоднородному по толщине изменению структуры [4]. В последние годы внима-

ние исследователей привлекает процесс кристаллизации пленок  $a\text{-Si:H}$  в результате их облучения мощными фемтосекундными лазерными импульсами [6,7]. Малая длительность импульса позволяет при данной энергии в импульсе получить большие значения интенсивностей излучения. В этом случае, согласно [8], кроме термического разогрева, наблюдаемого при небольших интенсивностях, возможно оптическое возбуждение значительного числа валентных электронов в зону проводимости, что приводит к ослаблению межатомных связей и так называемому „холодному“ плавлению материала. При этом, поскольку длительность импульсов меньше времени обмена энергией между электронами и атомной решеткой, во время импульса не происходит возбуждения колебательных мод в атомной структуре [7]. Большие интенсивности излучения при фемтосекундном облучении позволяют осуществлять изменение структуры материала при его объемном возбуждении с энергией квантов, меньшей, чем ширина запрещенной зоны.

В работах, опубликованных в последние годы и посвященных влиянию фемтосекундного лазерного облучения  $a\text{-Si:H}$  на его свойства, исследовалось изменение структуры пленок при данном воздействии. При этом было обнаружено, что облучение пленок  $a\text{-Si:H}$  мощными фемтосекундными лазерными импульсами не только изменяет структуру материала, но и существенно влияет на структуру поверхности пленки, приводя к образованию остроконечных микрошероховатостей (spikes) (см., например, [6,9,10]). Это в свою очередь приводит к уменьшению коэффициента отражения и соответственно к значительному (в 1.5–2 раза [10,11]) увеличению

<sup>¶</sup> E-mail: emelyanov.andrey@mail.ru

коэффициента оптического поглощения в области энергий квантов света, меньших 1.7 эВ. Данный эффект позволяет ожидать увеличения эффективности солнечных элементов, в процессе формирования которых использовалась кристаллизация аморфного материала с помощью фемтосекундного лазерного облучения. Однако, насколько нам известно, в литературе отсутствуют данные об изменении электрических, фотоэлектрических и оптических свойств пленок  $a\text{-Si:H}$  при изменении структуры пленок в результате воздействия на них фемтосекундных лазерных импульсов. В то же время подобные исследования представляют интерес для анализа возможности использования фемтосекундной лазерной кристаллизации для формирования слоев нанокристаллического кремния в tandemных солнечных элементах. Таким образом, цель данной работы состояла в изучении изменений как структурных, так и оптических и фотоэлектрических свойств пленок аморфного гидрогенизированного кремния в результате их облучения фемтосекундными лазерными импульсами и в установлении корреляции этих изменений.

## 2. Исследуемые образцы и методика эксперимента

Пленки  $a\text{-Si:H}$  толщиной  $\sim 0.8$  мкм были получены методом плазмохимического осаждения из газовой фазы при разложении смеси силана ( $\text{SiH}_4$ ) и аргона ( $\text{Ar}$ ) в плазме высокочастотного тлеющего разряда (PECVD) при температуре кварцевой подложки  $250^\circ\text{C}$ . Объемное соотношение газов в реакционной камере составляло  $25\% \text{SiH}_4 + 75\% \text{Ar}$ . Обработка пленки  $a\text{-Si:H}$  фемтосекундными лазерными импульсами осуществлялась излучением  $\text{Yb:KGW}$  лазера с длиной волны излучения 1030 нм и длительностью импульса  $< 280$  фс. Средняя плотность энергии лазерного излучения составляла  $0.4 \text{ Дж/см}^2$ , средняя энергия в одном импульсе —  $50 \text{ нДж}$ . Фокусировка лазерного излучения на образец проводилась с использованием асферической стеклянной линзы с числовой апертурой 0.16. Для изменения (уменьшения) плотности падающего на пленку излучения проводилась „расфокусировка“ падающего пучка при помощи изменения расстояния между поверхностью пленки и фокусирующей линзой.

Распределение плотности энергии лазерного пятна на пленке имело форму кривой Гаусса. При изменении фокусировки диаметр лазерного пучка в сечении пленки изменялся от 4 до 11 мкм. Это позволяло монотонно изменять интенсивность излучения в центре пучка в пределах от  $10^{11}$  до  $10^{12} \text{ Вт/см}^2$  и соответственно получать образцы, обработанные фемтосекундным лазерным излучением различной интенсивности. Номера исследованных образцов и использованная при их освещении интенсивность лазерного фемтосекундного излучения представлены в таблице. Нами использовался сканирующий метод обработки поверхности  $a\text{-Si:H}$ .

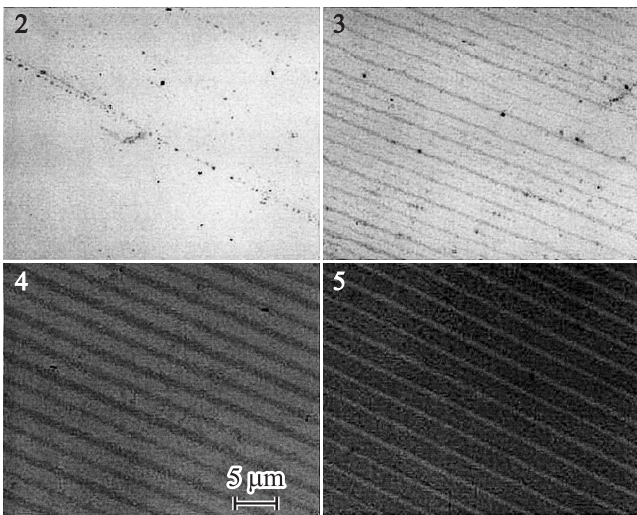
Значения интенсивностей фемтосекундного лазерного излучения, использованных при обработке пленок  $a\text{-Si:H}$

№ образца	Интенсивность, $10^{11} \text{ Вт/см}^2$
1	0
2	2.5
3	5.0
4	7.5
5	10.0

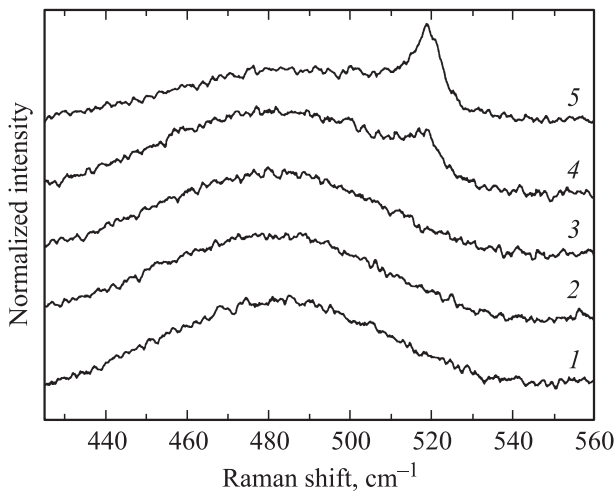
Скорость сканирования составляла  $5 \text{ мм/с}$ . Расстояние между „полосами“ сканирования составляло  $3 \text{ мкм}$ . Для проведения электрических и фотоэлектрических измерений на поверхность пленки параллельно направлению сканирования напылялись контакты из алюминия. Расстояние между контактами и длина контактов составляли соответственно  $0.5$  и  $4 \text{ мм}$ . При измерении проводимости и фотопроводимости на контакты подавалось смещение  $50 \text{ В}$ . Информация о структуре пленок получалась из анализа спектров комбинационного рассеяния света (КРС), измеренных при возбуждении образцов излучением с длиной волны  $488 \text{ нм}$ . Спектральная зависимость коэффициента поглощения ( $\alpha_{\text{CPM}}$ ) в области края поглощения измерялась методом постоянного фототока (constant photocurrent method — CPM) [12]. Данная методика регистрирует оптические переходы, приводящие к возникновению неравновесных носителей заряда в исследуемых пленках. Фотопроводимость измерялась при освещении образцов излучением с энергией кванта  $1.8 \text{ эВ}$  и интенсивностью  $3 \cdot 10^{15} \text{ кв. см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Все измерения проводились в атмосфере при комнатной температуре.

## 3. Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 1 представлены полученные на оптическом микроскопе (в отраженном свете) фотографии поверхности образцов 2–5. Масштаб представленных изображений указан на фотографии образца 4. Как видно, на поверхности образцов 3–5 можно выделить темные и светлые полосы. Это указывает на неоднородное по площади воздействие на пленку лазерного пучка, несмотря на то что диаметр „лазерного пятна“ на поверхности пленки ( $4\text{--}11 \text{ мкм}$ ) превышал „шаг“ сканирования ( $3 \text{ мкм}$ ). По-видимому, изменение „цвета“ образцов связано с изменением в результате лазерного облучения структуры пленки, в том числе и ее поверхности, приводящим к уменьшению коэффициента отражения пленок [6,9,10]. При увеличении интенсивности лазерного пучка (переход от образца 3 к образцу 5) ширина темных полос, середина которых соответствует центру лазерного пучка, возрастает. Можно предположить, что в результате облучения пленок фемтосекундным лазерным излучением происходит частичная кристаллизация



**Рис. 1.** Фотографии образцов 2–5, полученные с помощью оптического микроскопа. Указанные на рисунке номера соответствуют номерам образцов. Масштаб указан на фотографии образца 4.



**Рис. 2.** Нормированные спектры КРС исследованных образцов. Номера кривых соответствуют номерам образцов.

*a*-Si:H, причем с увеличением интенсивности лазерного пучка, имеющего гауссову форму, увеличивается область кристаллизации — ширина темных полос. В то же время при интенсивности падающего на образец излучения ниже порога кристаллизации должна наблюдаться однородная структура поверхности, чему соответствуют данные, показанные на рис. 1 для образца 2. Предположение об изменении структуры пленки подтверждается представленными на рис. 2 спектрами КРС исследуемых образцов. Как видно из рисунка, для всех исследованных образцов наблюдается ярко выраженный максимум вблизи частоты  $\omega_A = 480 \text{ см}^{-1}$ , соответствующий поперечной оптической (ТО) фононной моде в аморфной структуре кремния [13]. В то же время на спектрах

КРС, полученных для образцов 4 и 5, подвергнутых лазерному облучению с максимальной интенсивностью, наблюдается также максимум вблизи  $\omega_C = 520 \text{ см}^{-1}$ , соответствующий поперечным оптическим фононам кристаллического кремния [4].

Диаметр лазерного пучка, рассеяние которого регистрировалось нами в спектрах КРС, составлял 20 мкм и превосходил масштаб неоднородного по площади измерения структуры пленки, вызванного сканирующим фемтосекундным лазерным облучением. Тем не менее можно оценить усредненные по поверхности пленки вклады в спектр КРС от атмосферной и возникающей в результате облучения нанокристаллической фазы кремния. Вклад от аморфного кремния в спектр КРС изучаемых пленок можно описать линией гауссовой формы  $I_A$  [14,15]:

$$I_A(\omega) = B_A \exp \left[ -\frac{(\omega - \omega_A)^2}{2\delta_A^2} \right], \quad \delta_A = \frac{\Gamma_A}{2\sqrt{2 \ln 2}}, \quad (1)$$

где  $B_A$  — константа,  $\omega_A$  и  $\Gamma_A$  — положение максимума спектра и его ширина на полувысоте соответственно.

Вклад в спектр КРС от нанокристаллической фазы  $I_C$  зависит от размеров нанокристаллов кремния и, согласно [14,15], описывается следующим выражением:

$$I_C(\omega) = B_C \int_0^1 \frac{\exp(-q^2 L^2/4) 4\pi q^2 dq}{[\omega - \omega(q)]^2 + (\Gamma_C/2)^2}, \quad (2)$$

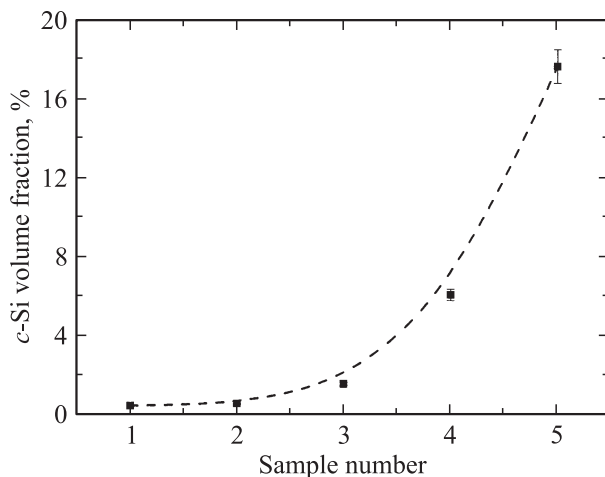
где  $B_C$  — константа;  $L = d/a_0$ ,  $d$  — диаметр нанокристаллов в нм;  $a_0 = 0.357 \text{ нм}$  — постоянная решетки кристаллического кремния (*c*-Si);  $\Gamma_C$  — ширина линии КРС в *c*-Si при температуре  $T = 300 \text{ К}$ ;  $q$  — волновой вектор фонона, выраженный в единицах  $2\pi/a_0$ ;  $\omega(q)$  — закон дисперсии оптических фононов, который определяется зависимостью  $\omega(q) = \omega_C(1 - 0.18q^2)$  [14];  $\omega_C$  — частота оптических фононов *c*-Si.

Таким образом, полный спектр КРС может быть представлен как сумма  $I(\omega) = I_A(\omega) + I_C(\omega)$ . Относительная объемная доля кристаллической фазы  $f_c$  в образце может быть найдена из следующего соотношения [16]:

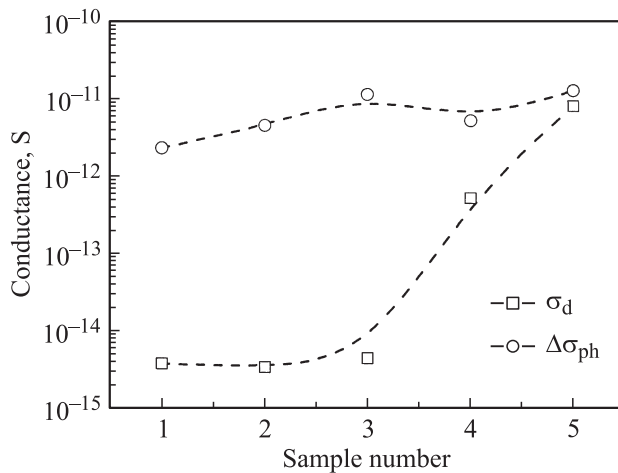
$$f_c = \frac{\bar{I}_C/\bar{I}_A}{\sigma_0 + \bar{I}_C/\bar{I}_A}, \quad (3)$$

где  $\bar{I}_C$ ,  $\bar{I}_A$  — интегральные интенсивности кристаллической и аморфной фазы соответственно,  $\sigma_0 = 0.1 + \exp(-d/25)$  — эмпирическое соотношение для отношения интегральных сечений комбинационного рассеяния в кристаллической и аморфной фазах кремния [16].

Спектры КРС всех исследованных образцов были аппроксимированы формулами (1) и (2) со следующими варьируемыми параметрами:  $d$ ,  $B_A$ ,  $\omega_A$ ,  $\Gamma_A$  и  $B_C$ ,  $\Gamma_C$ ,  $\omega_C$ . Затем по формуле (3) для всех образцов была рассчитана относительная доля кристаллической фазы, усредненная по поверхности пленки. Далее, говоря об



**Рис. 3.** Зависимость эффективной по площади относительной объемной доли кристаллической фазы от номера образца.



**Рис. 4.** Зависимости проводимости  $\sigma_d$  и фотопроводимости  $\Delta\sigma_{ph}$  от номера образца. Штриховые линии проведены для помощи следованию глаза.

относительной объемной доле кристаллической фазы, мы будем понимать ее усредненное по площади значение.

На рис. 3 показана полученная из анализа спектров КРС зависимость относительной доли кристаллической фазы  $f_c$  от номера образца, что отражает зависимость изменения структуры пленки от интенсивности использованного фемтосекундного лазерного облучения. Как видно, с увеличением интенсивности фемтосекундного лазерного излучения от  $10^{11}$  до  $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> возрастает относительная объемная доля кристаллической фазы, причем существенный рост  $f_c$  начинается с образца 4, в спектре КРС которого начинает явно наблюдаться линия, соответствующая кристаллической фазе. Вклад в увеличение наблюдаемой в спектрах КРС доли кристаллической фазы пленки могут вносить два фактора: увеличение ширины полос с измененной структурой, а также

возможное увеличение объемной доли кристаллической фазы в них.

Обратимся к зависимостям изменения темновой проводимости ( $\sigma_d$ ) и фотопроводимости ( $\Delta\sigma_{ph}$ ) от интенсивности фемтосекундного излучения, использованного при облучении пленок. Данные зависимости отражают представленные на рис. 4 значения  $\sigma_d$  и  $\Delta\sigma_{ph}$ , полученные для исследованных пленок. Как видно из рисунка, значения проводимости образцов 2 и 3, облученных фемтосекундным излучением с минимальной интенсивностью, близки к значению  $\sigma_d$  для необлученного образца. В то же время для образцов 4 и 5 наблюдается значительное увеличение проводимости, которое коррелирует с ростом интенсивности лазерного облучения. Данные результаты согласуются с представленной на рис. 3 зависимостью относительной объемной доли кристаллической фазы  $f_c$  от интенсивности фемтосекундного лазерного облучения. Это позволяет связать наблюдаемое изменение проводимости пленок как с изменением их внутренней структуры (кристаллизацией), так и с изменением площади производимого изменения. Значительное, более чем на 2 порядка, увеличение проводимости образцов 4 и 5 указывает на то, что вклад в изменение (увеличение) проводимости дает не только изменение структуры пленки (ее кристаллизация) в области темных полос и их ширины (рис. 1), но и возможное увеличение проводимости в промежутках между ними. Действительно, если предположить, что в области светлых полос структура материала не изменяется и он остается аморфным, то эти области с малой проводимостью должны определять межконтактное сопротивление образца (напомним, что контакты на поверхности пленок параллельны полосам, сформированным в результате лазерного сканирования). В этом случае сопоставление ширины светлых и темных полос для образца 5 (рис. 1) показывает, что сопротивление образца 5, определяемое долей светлых полос в межконтактном расстоянии, не может быть более чем на порядок меньше сопротивления аморфного образца 1, что противоречит результатам измерений. Можно предположить, что увеличение проводимости через межконтактные области (светлые полосы), сформированные аморфным кремнием, вызвано увеличением напряженности приложенного к ним электрического поля вследствие уменьшения их ширины.

Как видно из рис. 4, изменение фотопроводимости в результате облучения пленок *a*-Si:H фемтосекундным лазерным излучением существенно меньше, чем изменение темновой проводимости. Для пленок 2 и 3, в которых, согласно спектрам КРС, не происходит существенного изменения структуры, наблюдается некоторое увеличение фотопроводимости по сравнению с необлученной пленкой (образец 1). Это может быть связано с уменьшением концентрации основных центров рекомбинации в *a*-Si:H — оборванных связей. Для образцов 4 и 5 наблюдаемое изменение фотопроводимости в результате лазерного освещения может быть связано как с изменением концентрации рекомбинационных центров,

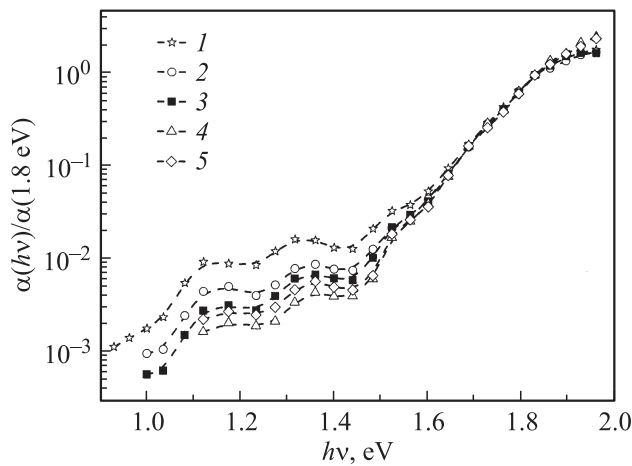


Рис. 5. Спектральная зависимость коэффициента поглощения в относительных единицах  $\alpha_{\text{СРМ}}(h\nu)/\alpha_{\text{СРМ}}(1.8 \text{ эВ})$  для образцов 1–5. Номера на рисунке соответствуют номерам образцов.

так и с изменением механизма переноса неравновесных носителей заряда в результате некоторого изменения структуры материала (рис. 2).

На рис. 5 представлены спектральные зависимости  $\alpha_{\text{СРМ}}$ , полученные для исследованных образцов и нормированные на значение  $\alpha_{\text{СРМ}}$  при энергии квантов  $h\nu = 1.8 \text{ эВ}$ . Как видно из рисунка, зависимости  $\alpha_{\text{СРМ}}(h\nu)$  для всех исследованных образцов имеют форму, характерную для  $a\text{-Si:H}$ , а именно „плечо“ поглощения при  $h\nu < 1.5 \text{ эВ}$ , связанное с переходами носителей заряда в зону из состояний дефектов типа оборванных связей [17], и экспоненциальный рост при  $1.5 < h\nu < 1.8 \text{ эВ}$ , обусловленный переходами из хвостов зон. Этот результат представляется неожиданным, поскольку, согласно рис. 2, нанокристаллическая фаза должна давать некоторый вклад в усредненную по поверхности образцов 4 и 5 структуру и соответственно в спектральную зависимость их поглощения. Подобие спектральных зависимостей  $\alpha_{\text{СРМ}}$  исследованных образцов можно объяснить тем, что метод СРМ регистрирует оптические переходы, приводящие к фотопроводимости. Поэтому схожий характер зависимостей  $\alpha_{\text{СРМ}}(h\nu)$ , полученных для образцов 1–3 и образцов 4 и 5, указывает на то, что спектр фотопроводимости в данных образцах определяется „аморфной“ областью пленки. Заметим также, что в наших экспериментах облучение пленки фемтосекундным лазерным излучением с энергией кванта  $1.2 \text{ эВ}$  не приводило к увеличению относительного поглощения в „дефектной“ области спектра  $\alpha_{\text{СРМ}}$  при  $h\nu < 1.5 \text{ эВ}$  и соответственно к увеличению концентрации дефектов. В то же время, согласно [18], освещение пленок  $a\text{-Si:H}$  фемтосекундным лазерным излучением с интенсивностью  $4 \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2$  и энергией квантов  $1.9 \text{ эВ}$ , превышающей ширину щели подвижности  $a\text{-Si:H}$ , вызывает уменьшение их фотопроводимости, что связано с фотоиндуцированным увеличением концентрации дефектов типа оборванных связей.

Целесообразно отметить, что использованная для лазерной обработки в настоящей работе энергия квантов фемтосекундного излучения ( $h\nu = 1.20 \text{ эВ}$ ) была существенно меньше оптической ширины щели подвижности  $a\text{-Si:H}$  ( $1.6\text{--}1.8 \text{ эВ}$ ) и совпадала с энергией возбуждения дефектных состояний типа оборванных связей в данном материале. Поэтому можно предположить, что оптическое возбуждение исследованных пленок при лазерном освещении происходило либо в результате двухфотонной межзонной генерации свободных электронов, либо в результате генерации свободных электронов с состояний дефектов в щели подвижности.

#### 4. Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что фемтосекундное лазерное облучение пленок аморфного гидрогенизированного кремния позволяет контролируемым образом изменять структуру материала и его фотоэлектрические и оптические свойства. Особый интерес представляют полученные данные, указывающие на возможность увеличения фотопроводимости в пленках  $a\text{-Si:H}$  в результате их облучения фемтосекундными лазерными импульсами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственных контрактов № 16.513.11.3084, № 16.526.12.6017 и № 16.516.11.6053.

#### Список литературы

- [1] D.L. Staebler, C.R. Wronski. *J. Appl. Phys.*, **51**, 3262 (1980).
- [2] Kenji Yamamoto, Akihiko Nakajima, Masashi Yoshimi, Toru Sawada, Susumu Fukuda, Takashi Suezaki, Mitsuru Ichikawa, Yohei Koi, Masahiro Goto, Tomomi Meguro, Takahiro Matsuda, Masataka Kondo, Toshiaki Sasaki, Yuko Tawada. *Sol. Energy*, **77**, 939 (2004).
- [3] S. Chen, I.C. Hsieh. *Sol. St. Technol.*, **1**, 113 (1996).
- [4] A.A.D.T. Adikaan, S.P.R. Silva, *J. Appl. Phys.*, **97**, 114 305 (2005).
- [5] T.Y. Choi, D.J. Hwang, C.P. Grigoropoulos. *Opt. Eng.*, **42**, 3383 (2003).
- [6] J. Shieh, Z. Chen, B. Dai, Y. Wang, A. Zaitsev, C. Pan. *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 1232 (2004).
- [7] В.А. Володин, А.С. Качко. *ФТП*, **45**, 268 (2011).
- [8] S.D. Sundaram, E. Masur. *Nature Mater.* **1**, 217 (2002).
- [9] X.C. Wang, H.Y. Zheng, C.W. Tan, F. Wang, H.Y. Yu, K.L. Pey. *Opt. Express*, **18**, 19 379 (2010).
- [10] В.К. Nayak, М.С. Gupta. *Appl. Phys. A*, **89**, 663.
- [11] H.Wang, P. Kongsuwan, G. Satoh, Y.L. Yao. *Proc. MSEC2010*, 34 271 (2010).
- [12] J. Kocka, M. Vanecek, A. Traska. *Adv. Amorphous Semicond.*, **11**, 298 (1988).
- [13] N.M. Liao, W. Li, Y.D. Jiang, Y.J. Kuang, K.C. Qi, Z.M. Wu, S.B. Li. *Appl. Phys. A*, **91**, 349 (2008).
- [14] С.В. Гайслер, Л.И. Семенова, Р.Г. Шарафутдинов, Б.А. Колесов. *ФТТ*, **46**, 1484 (2004).

- [15] Н.Е. Маслова, А.А. Антоновский, Д.М. Жигунов, В.Ю. Тимошенко, В.Н. Глебов, В.Н. Семиногов. ФТП, **44**, 1074 (2010).
- [16] В.Г. Голубев, В.Ю. Давыдов, А.В. Медведев, Н.А. Феоктистов. ФТТ, **39**, 1348 (1997).
- [17] D. Han, G. Yue, J.D. Lorentzen, J. Lin, H. Nabuchi, Qi. Wang. J. Appl. Phys., **87**, 1882 (2000).
- [18] M. Stutzmann, J. Nunnenkamp, M.S. Brandt, A. Asano. Phys. Rev. Lett., **67**, 2347 (1991).

Редактор Л.В. Беляков

### The effect of femtosecond laser treatment on structural, optical and photoelectrical properties of hydrogenated amorphous silicon films

A.V. Emelyanov\*, A.G. Kazanskii\*, P.K. Kashkarov\*<sup>+</sup>,  
O.I. Konkov<sup>o</sup>, E.I. Terukov<sup>o</sup>, P.A. Forsh\*<sup>+</sup>,  
A.V. Kukin<sup>o</sup>, M.V. Khenkin\*, M. Beresna<sup>x</sup>,  
P. Kazansy<sup>x</sup>

\* M.V. Lomonosov Moscow State University,  
Faculty of Physics,  
199991 Moscow, Russia

+ National Research Centre „Kurchatov Institute“,  
123182 Moscow, Russia

<sup>o</sup> Ioffe Physical Technical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

+ Optoelectronics Research Centre,  
University of Southampton, UK

**Abstract** The effect of femtosecond laser treatment with different laser intensity on modification of structural, photoelectrical and optical properties of hydrogenated amorphous silicon films has been studied. Used in the work laser treatment conditions with different intensity led to a heterogeneous over the film surface restructuring. The increase of the crystalline volume fraction of the averaged over the sample surface structure and also of the conductance and photoconductance of the samples with the raising of the radiation intensity was observed. At the same time, the spectral dependences of the absorption coefficient obtained by the constant photocurrent method for all the sample have the trend appropriated for those of amorphous silicon films. Obtained results indicate the possibility of *a*-Si:H films photoconductance increase by femtosecond laser pulse treatment.