

06:09

## Кристаллизация пленок аморфного гидрогенизированного кремния ( $a\text{-Si:H}$ ) при облучении фемтосекундными лазерными импульсами

© В.П. Белик<sup>1</sup>, О.С. Васютинский<sup>1</sup>, А.В. Кукин<sup>1</sup>, М.А. Петров<sup>1,2</sup>,  
Р.С. Попов<sup>1,2</sup>, Е.И. Теруков<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

<sup>3</sup> ООО „НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе“, Санкт-Петербург

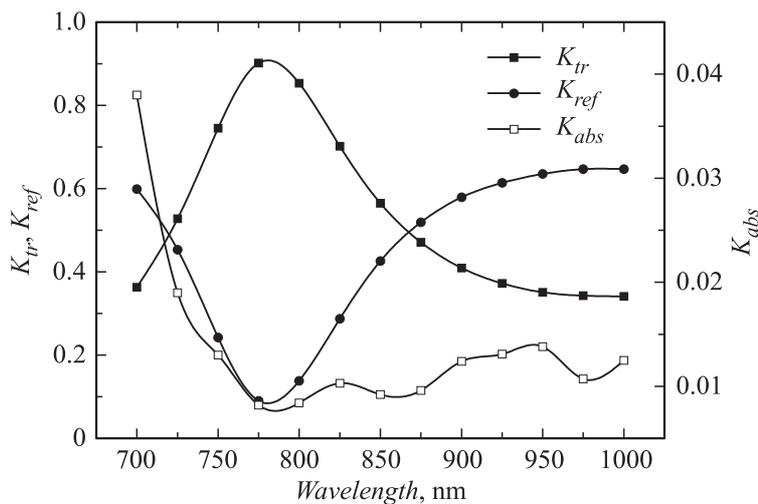
E-mail: v.belik@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 23 марта 2016 г.

Исследована кристаллизация тонких пленок аморфного гидрогенизированного кремния под действием импульсов фемтосекундного лазера. Обнаружено, что наблюдаемый эффект кристаллизации носит ярко выраженный пороговый характер и зависит от длины волны лазерного излучения. Показано, что наилучшие результаты кристаллизации достигаются при использовании длин волн лазерного излучения в диапазоне 740–760 nm.

Кристаллизация аморфного гидрогенизированного кремния, широко используемого в тонкопленочной солнечной энергетике, позволяет существенно улучшить стабильность и КПД солнечных элементов. Одним из методов кристаллизации, который продолжает исследоваться и совершенствоваться, является облучение аморфного кремния импульсными лазерами [1–3]. В настоящей работе исследовалась кристаллизация пленок  $a\text{-Si:H}$  при облучении импульсами фемтосекундного лазера.

В исследованиях использовался перестраиваемый лазер Mai Tai HP (Spectra Physics) на ионах титана в сапфире, имевший следующие характеристики: спектральный диапазон 690–1040 nm, длительность импульсов излучения 80 fs, частота повторения импульсов излучения 80 MHz, максимальная мощность лазерного пучка 2.3 W. Этим лазером, входящим в состав экспериментального стенда, облучались образцы пленок  $a\text{-Si:H}$  толщиной около 100 nm, нанесенных на стеклянную пластину толщиной 3 mm.



**Рис. 1.** Коэффициенты пропускания  $K_{tr}$ , отражения  $K_{ref}$  и поглощения  $K_{abs}$  образца с пленкой  $a$ -Si:H.

На первом этапе работы были проведены измерения оптических характеристик исследуемых образцов пленок  $a$ -Si:H: коэффициенты пропускания ( $K_{tr}$ ), отражения ( $K_{ref}$ ) и поглощения ( $K_{abs}$ ) несфокусированного лазерного пучка образцом в области спектра генерации лазера. Эти коэффициенты определялись как отношение интенсивности падающего на образец лазерного излучения ( $P_{fal}$ ) к интенсивности прошедшего ( $P_{tr}$ ), отраженного ( $P_{ref}$ ) и поглощенного ( $P_{abs}$ ) излучения соответственно. Коэффициенты пропускания и отражения определялись прямыми измерениями мощности падающего, прошедшего и отраженного пучков, а коэффициент поглощения оценивался косвенным путем по формуле

$$K_{abs} = (P_{fal} - P_{tr} - P_{ref})/P_{fal}. \quad (1)$$

Измерения мощности лазерного пучка осуществлялись измерителем мощности лазерного излучения NOVA (OPHIR), оснащенного термоэлектрическим датчиком ЗА-Р. Точность измерений была не хуже 1%.

При регистрации интенсивности отраженного излучения образец был повернут на угол  $7^\circ$  относительно положения нормального падения

луча на образец, соответствовавшего положению пучка в опытах по кристаллизации кремния. В этом случае ориентация луча была близка к нормальному падению на образец и коэффициент отражения с хорошим приближением не зависел от поляризации излучения и мог быть выражен через показатели преломления  $n_1$  и  $n_2$  граничащих прозрачных сред следующим образом [4]:

$$K_{ref} = [(n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)]^2. \quad (2)$$

Результаты измерений коэффициентов  $K_{tr}$ ,  $K_{ref}$  и  $K_{abs}$  приведены на рис. 1. Точность измерений коэффициентов  $K_{tr}$  и  $K_{ref}$  была не хуже 2%. Для оценки вклада стеклянной подложки в результаты измерений был измерен коэффициент пропускания лазерного пучка для такой же стеклянной пластины без пленки кремния. Этот коэффициент оказался постоянен во всем спектральном диапазоне лазерного излучения и равен  $0.91 \pm 0.005$ . Определенный из эксперимента коэффициент отражения при угле отражения  $7^\circ$  для длин волн 750 и 800 nm составил  $K_{ref} = 0.076 \pm 0.006$ . Полученные результаты свидетельствуют о том, что вклад стекла в результаты измерений составляет постоянную малую добавку и ход кривых на графиках  $K_{tr}$ ,  $K_{ref}$  и  $K_{abs}$  на рис. 1 в основном определяется свойствами пленки  $a$ -Si:H. Однако получить точную величину наиболее важного для данного исследования коэффициента поглощения  $K_{abs}$  пленки  $a$ -Si:H оказалось затруднительным, поскольку величина поглощенной мощности  $P_{abs}$ , определяемая как  $P_{abs} = P_{fal} - P_{tr} - P_{ref}$ , оказалась очень мала из-за малости толщины пленки, вследствие чего относительная погрешность измерения величины  $\Delta K_{abs}/K_{abs}$ , определенная согласно известным выражениям [5], получилась весьма значительной и имела величину от 30 до 170%. В результате в настоящей работе была определена только верхняя граница оценки коэффициента поглощения  $K_{abs}$  для пленки  $a$ -Si:H, которая оказалась приблизительно равной  $K_{abs} = 0.01-0.02$  в области длин волн 775–1000 nm и возрастала до 0.04–0.05 при уменьшении длины волны от 775 до 700 nm.

В опытах по получению кристаллического кремния излучение лазера фокусировалось на образец сферической линзой с фокусным расстоянием 70 mm, что позволяло получать фокальное пятно размером 21  $\mu\text{m}$ . Распределение плотности энергии в фокальном пятне с учетом сферической аберрации линзы имело примерно гауссову форму, соответствующую пространственной моде  $TEM_{00}$ -лазера. В процессе

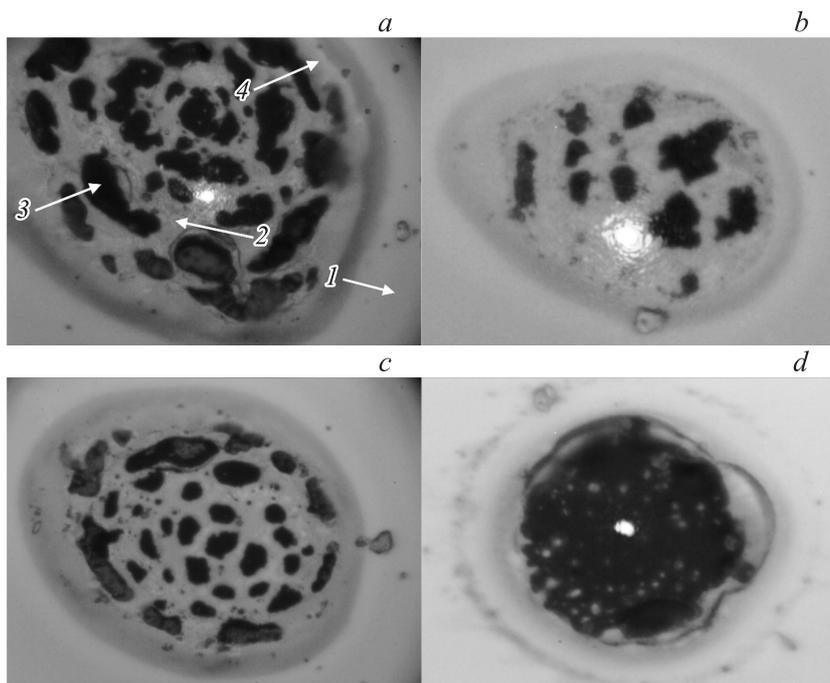
исследования варьировались следующие характеристики облучения образца: длина волны лазерного излучения, мощность лазерного пучка, размер фокального пятна, время экспозиции.

На выходе из лазера излучение проходило через аттенюатор, состоящий из призменного поляризатора Глана и полуволновой фазовой пластинки, что позволяло плавно изменять мощность лазерного пучка и соответственно плотность энергии на облученной поверхности образца при неизменном размере фокального пятна.

Время облучения (экспозиция) образца устанавливалось с помощью механизма установки выдержки фотоаппарата, в задней стенке которого было сделано отверстие для выхода лазерного пучка. Механизм позволял устанавливать экспозицию 1/30, 1/60, 1/125, 1/250 и 1/500 с, а также произвольную экспозицию в ручном режиме. Облученные образцы исследовались с помощью оптической микроскопии, дававшей информацию о структуре поверхности пленки, а также посредством спектроскопии комбинационного рассеяния с использованием рамановского спектрометра LabRam HR800. При этом появление пика в рамановском спектре на частоте  $520\text{ см}^{-1}$  свидетельствовало об образовании кристаллического кремния.

Результаты проведенных исследований продемонстрировали возможность кристаллизации тонких пленок аморфного кремния под действием фемтосекундных импульсов лазера. На рис. 2 приведены изображения областей пленки  $a\text{-Si:H}$ , облученных лазерным пучком с различными параметрами излучения: длины волны излучения  $\lambda$ , мощности пучка  $P$ , экспозиции  $t$  и расфокусировки  $\Delta$ . На рис. 2, а стрелками с цифрами 1–4 отмечены области, из которых осуществлялась регистрация сигнала рамановского спектрометра: 1 — область аморфного кремния ( $a\text{-Si:H}$ ); 2, 4 — зоны образовавшегося кристаллического кремния ( $c\text{-Si:H}$ ); 3 — зона полного удаления материала пленки (до поверхности стекла). Эти рамановские спектры представлены на рис. 3.

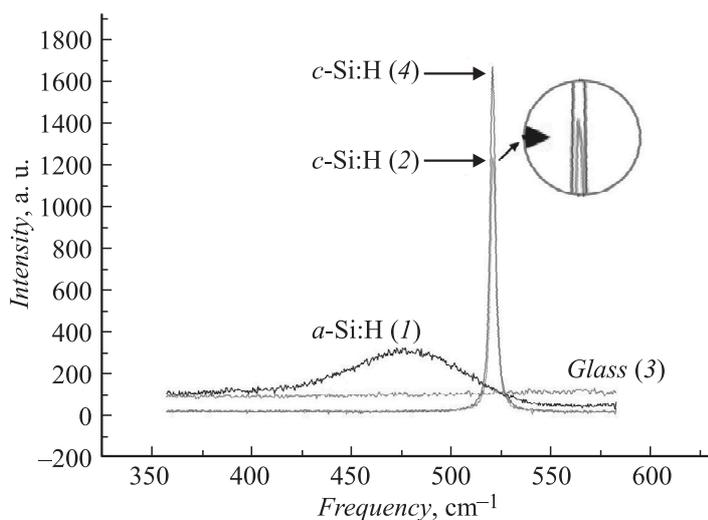
Как видно из рис. 2, во всех случаях область облучения ограничена относительно широким кольцом, представляющим собой область сплошного, достаточно равномерного образования кристаллического кремния. Внутри этой области видны отдельные очаги кристаллического кремния, перемежающиеся участками, из которых материал пленки частично или полностью удален. Эти результаты соответствуют гауссовой форме распределения плотности энергии по сечению пучка в плоскости облучения. Граничная кольцевая зона сплошного образования кристаллического кремния соответствует очень узкому диапазону плотностей



**Рис. 2.** Изображения облученных областей пленки  $a\text{-Si:H}$  при различных параметрах лазерного пучка:  $a$  —  $\lambda = 750 \text{ nm}$ ,  $P = 2 \text{ W}$ ,  $t = 1/30 \text{ s}$ ,  $\Delta = 1 \text{ mm}$ ;  $b$  —  $\lambda = 750 \text{ nm}$ ,  $P = 2 \text{ W}$ ,  $t = 1/500 \text{ s}$ ,  $\Delta = 2 \text{ mm}$ ;  $c$  —  $\lambda = 725 \text{ nm}$ ,  $P = 1.6 \text{ W}$ ,  $t = 1/30 \text{ s}$ ,  $\Delta = 2 \text{ mm}$ ;  $d$  —  $\lambda = 800 \text{ nm}$ ,  $P = 2.5 \text{ W}$ ,  $t = 1/30 \text{ s}$ ,  $\Delta = 0.5 \text{ mm}$ .

энергии излучения, отвечающему получению сплошного равномерного слоя кристаллического кремния. Чтобы получить такой результат для всей облученной зоны, необходимо осуществить гомогенизацию лазерного пучка, сформировав П-образное распределение интенсивности излучения по сечению пучка.

Показано, что эффект кристаллизации аморфного кремния носит ярко выраженный пороговый характер, зависящий от величины плотности энергии в импульсе. При установлении плотности энергии в импульсе на 1–2% меньше порога образование кристаллического кремния не наблюдалось независимо от величины времени облучения. Однако если



**Рис. 3.** Рамановский спектр образца с пленкой  $a\text{-Si:H}$  при лазерном облучении на длине волны 750 nm. Плотность энергии в импульсе  $1.6 \text{ mJ/cm}^2$ . Цифры 1–4 указывают на соответствующие области на рис. 2, а, из которых регистрировался рамановский спектр.

деструкция поверхности пленки и кристаллизация кремния произошли, то величина экспозиции влияет на вынос материала пленки, поэтому наиболее качественные результаты кристаллизации получаются при минимальных экспозициях при прочих равных условиях.

Также установлено, что величина пороговой плотности энергии в импульсе зависит от длины волны излучения лазера. Так, на длине волны 800 nm пороговая плотность энергии составляла  $1.6 \text{ mJ/cm}^2$ , а на 750 nm —  $1 \text{ mJ/cm}^2$ . На длине волны 900 nm пороговой плотности энергии достичь не удалось несмотря на то, что была использована плотность энергии в импульсе вплоть до  $3.7 \text{ mJ/cm}^2$ . Было определено ориентировочное значение плотности энергии поглощенного в пленке лазерного излучения, которая приводила к эффекту кристаллизации. На длинах волн 800 и 750 nm эта пороговая плотность энергии составила примерно одинаковую величину — около  $30 \mu\text{J/cm}^2$ . Это наводит на мысль, что пороговая плотность поглощенной энергии, приводящая к

эффекту кристаллизации пленки аморфного кремния, приблизительно постоянна в большей части (коротковолновой) исследованного спектрального диапазона лазерного излучения, а обнаруженную зависимость пороговой плотности энергии пучка от длины волны можно объяснить зависящей от длины волны величиной коэффициента отражения от пленки аморфного кремния.

Показано, что область длин волн 740–760 nm предпочтительна для получения наиболее качественных результатов кристаллизации аморфного кремния. В этой области длин волн, посредством варьирования мощности пучка в пределах 1.5–2 W и величины расфокусировки, были получены оптимальные параметры излучения лазера и продемонстрированы зоны облучения с достаточно равномерной кристаллизацией кремния. Этот эффект достигался при величине плотности энергии в импульсе лазера около 1.5–1.6 mJ/cm<sup>2</sup>.

### Список литературы

- [1] Navak V.K., Gupta M.C. // Appl. Phys. A. 2007. V. 89. P. 663–666.
- [2] Емельянов А.В., Казанский А.Г., Кашикарров П.К., Коньков О.И., Теруков Е.И., Фориш П.А., Хенкин М.В., Кукин А.В., Beresna M., Kazansky P. // ФТП. 2012. Т. 46. В. 6. С. 769–773.
- [3] Hong L., Wang X.C., Zheng H.Y. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. V. 46. P. 195 109 (6 p).
- [4] Калитеевский Н.И. Волновая оптика. М.: Наука, 1971. 376 с.
- [5] Зайдель А.Н. Погрешности измерений физических величин. Л.: Наука, 1985. 112 с.