

Изучение электронных свойств пленок гидрогенизированного аморфного кремния методами фемтосекундной спектроскопии

© М.Г. Севастьянов⁺, В.С. Лобков^{*}, А.Г. Шмелев^{*}, А.В. Леонтьев^{*}, В.Л. Матухин⁺,
А.В. Бобыль[‡], Е.И. Теруков^{‡*}, А.В. Кукин^{‡*}

⁺ Казанский государственный энергетический университет,
420066 Казань, Россия

^{*} Казанский физико-технический институт Казанского научного центра Российской академии наук,
420029 Казань, Россия

[‡] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[•] ООО НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при
Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194064 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 25 февраля 2013 г. Принята к печати 11 марта 2013 г.)

Представлены результаты экспериментов по измерению методом наведенной дифракционной решетки времени релаксации и коэффициента диффузии электронов в пленках аморфного гидрогенизированного кремния с собственным и электронным типами проводимости при комнатной температуре. Получены значения времени релаксации электронов для этих пленок, равные 1 нс и 465 пс, и коэффициента диффузии 0.54 и 0.83 см²/с. Обнаружено, что при увеличении энергии импульсов время спада сигнала наведенной решетки сокращается.

1. Введение

Пленки гидрогенизированного аморфного кремния (*a*-Si:H) успешно используются в тонкопленочной солнечной энергетике и при создании различных тонкопленочных оптоэлектронных и электронных приборов. Основной метод получения таких пленок — разложение в тлеющем разряде смеси моносилана с инертными газами. В частности, при формировании нанокристаллических пленок *nc*-Si:H используется смесь моносилана с водородом с различным процентным соотношением [1], в результате чего получаются пленки с двухфазной структурой, состоящей из аморфной и нанокристаллической фаз. Это подтверждается исследованиями с использованием техники просвечивающей электронной микроскопии [2] и рамановской спектроскопии [3,4]. Варьируя соотношение газов, можно изменять процентное содержание той или иной фазы [5].

Важнейшими параметрами тонкопленочных материалов являются коэффициент амбиполярной диффузии и время релаксации неравновесных носителей заряда, информацию о которых можно получить из исследований методами фемтосекундной спектроскопии [6]. Цель данной работы состояла в изучении диффузии неравновесных носителей по методике наведенной решетки, способной селективно создать и затем исследовать флуктуации зарядовой плотности [7]. Предварительные результаты исследований были приведены ранее [8].

2. Исследуемые образцы и методика эксперимента

Пленки аморфного гидрогенизированного кремния (*a*-Si:H) толщиной 200–400 нм были получены в

Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (Санкт-Петербург, Россия) методом плазмохимического осаждения из газовой фазы при разложении смеси моносилана с водородом в плазме высокочастотного тлеющего разряда (PECVD) при температуре стеклянной подложки 250°С. Исследуемые пленки различались типом проводимости: одна из пленок имела собственную проводимость (*i*-*a*-Si:H), другая — электронную проводимость (*n*-*a*-Si:H). Для получения структурных сведений о размере кристаллической фазы в образцах использовались методы сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Информация о коэффициенте диффузии получалась из экспериментов, проводимых по методике дифракции пробного луча на наведенной в образце дифракционной решетке [9–11]. Два лазерных импульса, падая одновременно на образец, формируют интерференционную картину, описываемую уравнением

$$I(x, t) = I_0(t) \left[1 + V \cos\left(\frac{2\pi x}{\Lambda}\right) \right], \quad (1)$$

где $I(x, t)$ — интенсивность света, t — время, x — расстояние вдоль направления, перпендикулярного биссектрисе угла между лучами накачки; V — глубина модуляции; Λ — период решетки. При этом возникает пространственная модуляция плотности частиц в возбужденном состоянии (рис. 1). Период такой наведенной „решетки“ Λ зависит от длины волны возбуждающего света λ и угла θ через соотношение $\Lambda = \lambda/2 \sin(\theta/2)$. Третий импульс, задержанный относительно первых двух на время Δt , дифрагирует на этой наведенной дифракционной решетке. Регистрируя интенсивность продифрагировавшего зондирующего луча в зависимости от времени его задержки Δt , можно отслеживать процесс „затухания“ наведенной решетки [11].

[†] E-mail: Eug.Terukov@mail.ioffe.ru

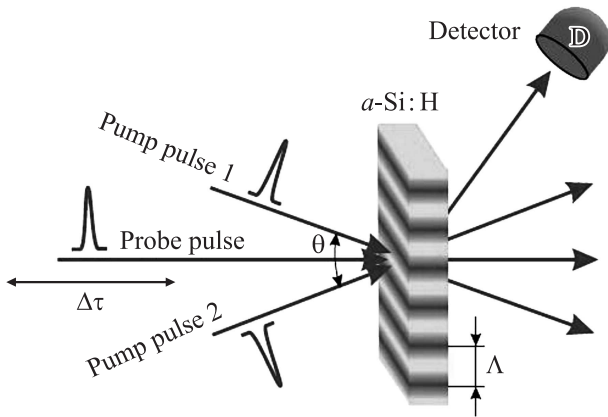


Рис. 1. Схема наблюдения дифракции лазерного импульса на наведенной решетке населенностей.

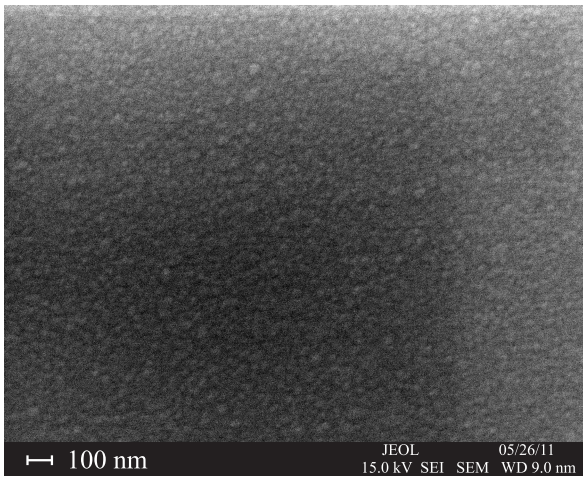


Рис. 2. СЭМ-изображение пленки *n-a-Si:H*.

В проведенном эксперименте в качестве источников фемтосекундных лазерных импульсов использовался титан-сапфировый лазер Ti:Sp (ООО „Avesta“). Импульсы длительностью ~ 60 фс имели спектр шириной ~ 20 нм с максимумом интенсивности на длине волны 790 нм, интегральная интенсивность импульса варьировалась в пределах 260–700 ГВт/см². Все измерения проводились в атмосфере при комнатной температуре.

3. Результаты и обсуждение

Согласно результатам сканирующей электронной микроскопии, исследованные пленки (*a-Si:H*), полученные при оптимальных условиях осаждения, структурно однородны по толщине и не имеют столбчатой структуры. На рис. 2 представлены СЭМ-изображения пленок гидроденированного аморфного кремния. Согласно этому изображению, размеры неоднородностей составляют ~ 50 нм.

При исследовании дифракции на наведенной решетке было обнаружено, что зависимость интенсивности дифрагирующего луча от времени задержки пробного импульса имеет два характерных времени спада (рис. 3). В качестве примера на рис. 4 приведена зависимость

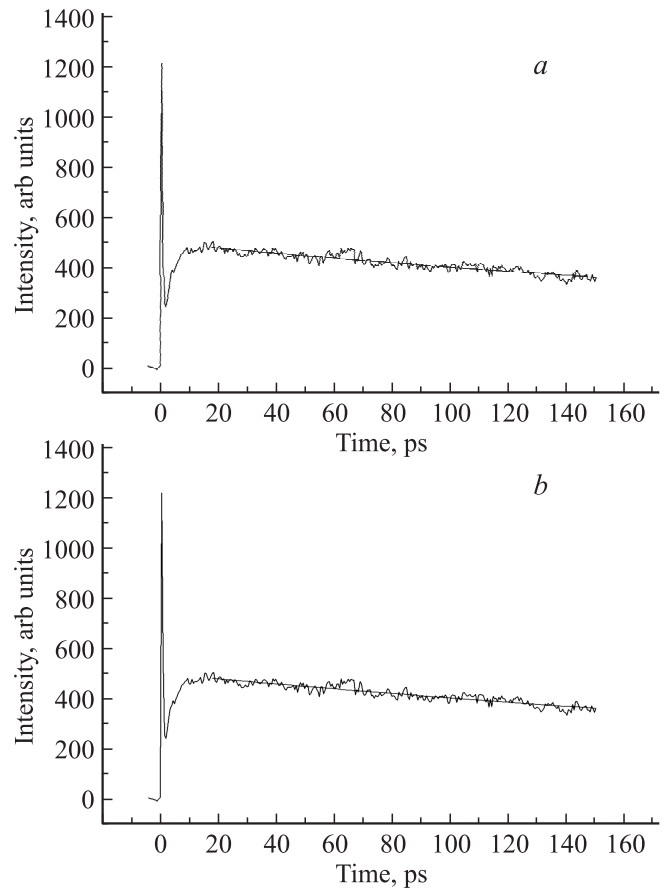


Рис. 3. Сигнал наведенной решетки для пленок *i-a-Si:H* (a) и *n-a-Si:H* (b).

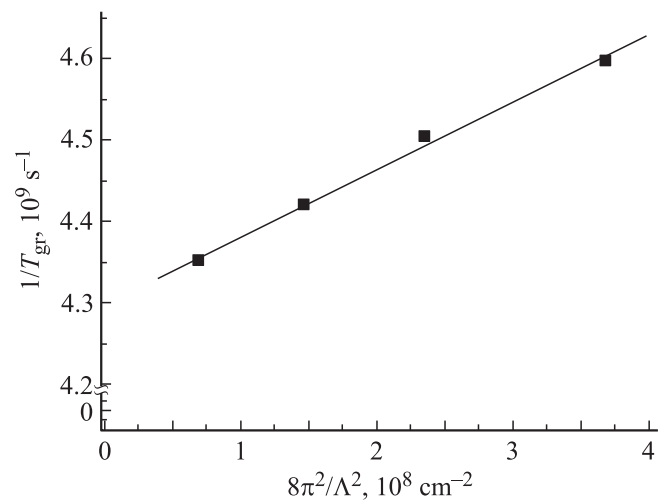


Рис. 4. Зависимость скорости распада наведенной решетки от периода решетки для пленки *i-a-Si:H*.

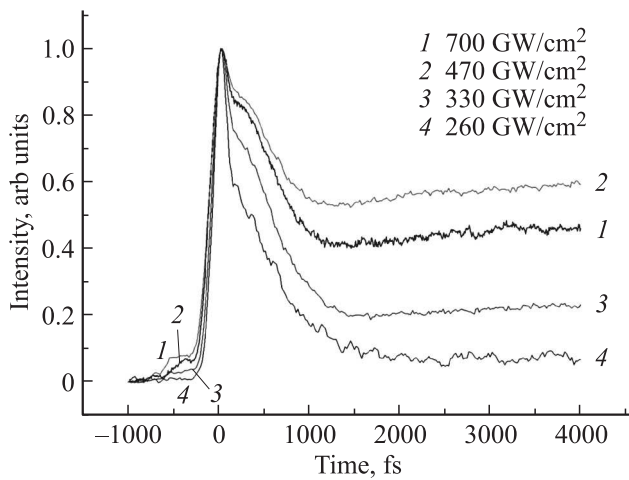


Рис. 5. Зависимость скорости распада наведенной решетки от интенсивности интерферирующих лучей для пленки *i-a-Si : H*.

скорости распада решетки T_{gr}^{-1} от величины $8\pi^2\Lambda^{-2}$ для пленки *i-a-Si : H*. В предположении, что процесс „затухания“ обусловлен в основном процессами релаксации и диффузии носителей заряда, скорость разрушения решетки выражается через Λ следующим образом:

$$\frac{1}{T_{gr}} = \frac{8\pi^2}{\Lambda^2} D + \frac{2}{T_r}, \quad (2)$$

где T_r — время жизни носителей заряда в возбужденном состоянии (время жизни уровня), D — коэффициент диффузии носителей, T_{gr} — время спада сигнала дифрагирующего пучка [11]. Таким образом, построив зависимость скорости распада решетки T_{gr}^{-1} от величины $8\pi^2\Lambda^{-2}$, по тангенсу угла наклона можно определить коэффициент диффузии, а экстраполировав эту зависимость до нулевого значения по оси абсцисс, можно определить T_r . Для построения такой зависимости необходимо изменять период дифракционной решетки Λ . Для этого надо изменять угол между падающими лучами θ , что можно осуществить выбором линзы с необходимым фокусным расстоянием.

Согласно (2), тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой к оси абсцисс равен коэффициенту диффузии, а длина отрезка, отсекаемого этой прямой на оси ординат, определяет скорость релаксации T_r^{-1} . Вычисленные таким способом характеристики пленок представлены в таблице. Используя полученные значения коэффициента диффузии, можно оценить подвижности носителей заряда: $\mu(i-a-Si : H) = 22 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$,

Электронные характеристики пленок

Тип пленки	<i>i-a-Si : H</i>	<i>n-a-Si : H</i>
Время релаксации T_r , пс	1040 ± 75	465 ± 20
Коэффициент диффузии D , $\text{см}^2/\text{с}$	0.54 ± 0.04	0.083 ± 0.01

$\mu(n-a-Si : H) = 33 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Полученное значение подвижности носителей заряда для образца с собственной проводимостью (*i-a-Si : H*) оказалось близким к верхней границе диапазона, указанного в литературе ($10\text{--}20 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) [12]. Для пленки аморфного гидрогенизированного кремния с электронным типом проводимости значение подвижности получилось выше, чем у образца с собственной проводимостью, что также соответствует литературным данным. При возрастании интенсивности возбуждающих лучей наблюдается увеличение скорости распада наведенной решетки. Экспериментальные зависимости для образца пленки с собственной проводимостью (*i-a-Si : H*) приведены на рис. 5. Можно предположить, что такое поведение распада решетки происходит в результате частичного изменения структуры исследуемой пленки при ее зондировании [13].

4. Заключение

Таким образом, в данной работе по методике дифракции пробного луча на наведенной в образце решетке проведены измерения времени релаксации и коэффициента диффузии электронов в пленках гидрогенизированного аморфного кремния с собственным (*i-a-Si : H*) и электронным (*n-a-Si : H*) типами проводимости в атмосфере при комнатной температуре. Значения времени релаксации электронов, полученные для образцов этих пленок, составили соответственно 1 нс и 465 пс. Кроме этого, определен коэффициент диффузии (0.54 и $0.83 \text{ см}^2/\text{с}$). Обнаружено, что при увеличении энергии импульсов время спада сигнала наведенной решетки сокращается.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ.

Список литературы

- [1] А.Г. Казанский, Е.И. Теруков, П.А. Форш, М.В. Хенкин. ФТП, **45**, 518 (2011).
- [2] D.V. Tsu, B.S. Chao, S.R. Ovshinsky, S.J. Jones, J. Yang, S. Guha, R. Tsu. Phys. Rev. B, **63**, 125 338 (2001).
- [3] S. Muthamann, F. Kohler, R. Carius, A. Gordijn. Phys. Status Solidi A, **207**, 544 (2010).
- [4] M. Ledinsky, L. Fekete, J. Stuchlik, T. Mates, A. Fejfar, J. Kocka. J. Non-Cryst. Sol., **352**, 1209 (2006).
- [5] A.G. Kazanskii, G. Kong, X. Zeng, H. Hao, F. Liu. J. Non-Cryst. Sol., **354**, 2282 (2008).
- [6] С.Ф. Галяутдинов, В.С. Лобков, С.А. Моисеев, И.В. Неграшов. ФТП, **35**, 1428 (2001).
- [7] N. Gedik, J. Orenstein. Optics Lett., **29** (18), (2004).
- [8] М.Г. Севастьянов, В.С. Лобков, А.Г. Шмелев, А.В. Леонтьев, В.Л. Матухин, А.В. Бобыль, Е.И. Теруков. Сб. тр. VIII Междунар. конф. „Аморфные и микрокристаллические полупроводники“ (СПб., 2012) с 34.
- [9] J.P. Woerdman. Optics Commun., **2** (5), 212 (1970).
- [10] В.С. Лобков, С.А. Моисеев, Е.А. Штырков. Опт. и спектр., **64** (1), 79 (1988).

- [11] S.C. Moss, J.R. Lindle, H.J. Mackey, A.L. Smirl. Appl. Phys. Lett., **39**, 227 (1981).
- [12] *Thin film solar cells fabrication, characterization and applications*, ed. by J. Poortmans, V. Arkhipov (Chichester, John Wiley & Sons Ltd, 2006) p. 184.
- [13] А.В. Емельянов, А.Г. Казанский, П.К. Кашкаров, О.И. Коньков, Е.И. Теруков, П.А. Форш, М.В. Хенкин, А.В. Кукин, М. Veresna, P. Kazansky. ФТП, **46** (6), 769 (2012).

Редактор Л.В. Шаронова

Study of electronic properties of hydrogenated amorphous silicon films by femtosecond spectroscopy

M.G. Sevastyanov⁺, V.S. Lobkov*, A.G. Shmelev*, A.V. Leontev*, V.L. Matuhin⁺, A.V. Bobyl[‡], E.I. Terukov^{‡•}, A.V. Kukin^{‡•}

⁺ Kazan State Power Engineering University,
420066 Kazan, Russia

* Kazan Physico-Technical Institute,
Kazan Scientific Center,
Russian Academy of Sciences,
420029 Kazan, Russia

[‡] Ioffe Physicotechnical Institute
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

• TFTE Ioffe R & D Center,
194064 St. Petersburg, Russia

Abstract The results of energy relaxation time and electron mobility measurements in amorphous hydrogenated silicon (intrinsic and *n*-type) are presented. The investigation were made by femtosecond spectroscopy technique using the method of induced diffracting screen at the room temperature. The values obtained sufficiently agree with the data in other papers. Also the time of decay of induced diffracting screen signal by the growth of pulse intensity was observed.