

# Влияние освещения на темновую проводимость и фотопроводимость слоистых пленок аморфного гидрированного кремния

И. А. Курова, Н. Н. Ормонт<sup>a</sup>

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,  
кафедра физики полупроводников. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

*E-mail:* <sup>a</sup>ormont@phys.msu.ru

Статья поступила 10.04.2009, подписана в печать 04.06.2009.

Установлено, что в высокочувствительных слоистых пленках аморфного гидрированного кремния (a-Si:H), полученных методом циклического осаждения с послойным отжигом в водородной плазме, величины и температурные зависимости темновой проводимости и фотопроводимости предварительно освещенных пленок зависят от температуры освещения. Получено, что кинетика релаксации темновой проводимости этих пленок после выключения освещения немонотонна. Наблюдаемые эффекты могут быть объяснены быстрым и медленным процессами изменения распределения плотности энергетических состояний в нижней половине запрещенной зоны во время освещения пленок и после его выключения.

**Ключевые слова:** аморфный гидрированный кремний, фотопроводимость, фотоиндуцированные метастабильные дефекты, термическая релаксация.

УДК: 621.315.592. PACS: 61.43.Dq, 71.23.Cq, 71.55.Jv.

## Введение

В последние годы появилось большое количество публикаций, посвященных созданию и исследованию модифицированного аморфного гидрированного кремния и структур на его основе - аморфного кремния с нанокристаллическими включениями, слабо легированного бором аморфного кремния, микрокристаллического кремния, а также протокристаллического и слоистого аморфного гидрированного кремния [1–8]. Модификация аморфного гидрированного кремния (a-Si:H) проводилась с целью повышения стабильности материала к освещению при сохранении высокой фоточувствительности.

Влияние освещения на параметры a-Si:H является важнейшим фактором, ограничивающим его широкое практическое применение. Однако, несмотря на большое количество работ по исследованию модифицированных материалов, пока нет достаточно полного представления об их свойствах и стабильности при освещении.

К числу модифицированных пленок a-Si:H можно отнести и слоистые пленки a-Si:H, выращенные в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете (СПбГЭТУ) методом циклического осаждения с отжигом каждого слоя в плазме водорода. Проведенные исследования таких пленок [9] показали, что эти пленки имели малую темновую проводимость (ТП) и большую фотопроводимость (ФП), что определяло их высокую фоточувствительность. Однако необходимы детальные исследования воздействия освещения на электрические и фотоэлектрические свойства этих пленок, определяющие их стабильность к освещению.

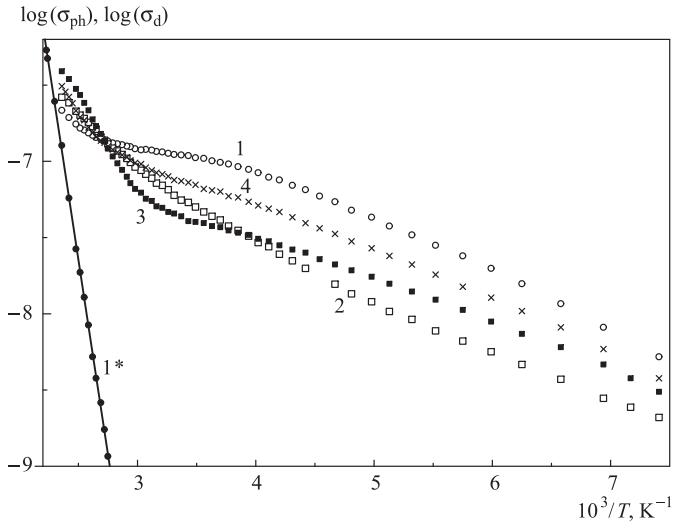
В настоящей работе исследовалось влияние температуры, при которой проводилось предварительное освещение слоистых пленок, на их ТП и ФП в интервале температур 130–460 К. Такие исследования дают информацию о влиянии освещения на электри-

ческие и фотоэлектрические свойства пленок, а также об особенностях образования и релаксации фотоиндуцированных метастабильных дефектов при разных температурах.

## Результаты эксперимента

На рис. 1 приведены температурные зависимости ФП слоистой пленки a-Si:H, отожженной при температуре 480 К, до и после ее предварительного изохронного освещения при разных температурах. Толщина пленки составляла 1 мкм, а толщины чередующихся слоев в ней — 2 и 14 нм [10]. Освещение пленок осуществлялось с помощью кварцевой галогенной лампы с ИК фильтром. Интенсивность света при предварительном освещении пленки составляла  $60 \text{ мВт}\cdot\text{см}^{-2}$ , а при измерении ФП —  $0.5 \text{ мВт}\cdot\text{см}^{-2}$ . Измерения ФП пленки проводились при повышении температуры, начиная со 130 К, путем кратковременного освещения при фиксированной температуре. Время освещения составляло менее 1 с. На рис. 1 приведена и температурная зависимость ТП отожженной пленки, измеренная также при повышении температуры после медленного охлаждения пленки от температуры отжига. Видно, что ТП отожженной пленки экспоненциально зависела от температуры с энергией активации около 0.95 эВ.

На рис. 1 также видно, что температурный ход ФП зависел от температуры предварительного освещения отожженной пленки. Так, после предварительного освещения пленки при температуре  $T_{\text{ill}} = 130$  К наблюдалось значительное уменьшение величины ФП в области низких температур и непрерывное ее увеличение при дальнейшем росте температуры. При температуре около 380 К величина ФП освещенной пленки сравнивалась с величиной ФП отожженной пленки, а при  $T > 380$  К превышала ее величину. После предварительного освещения отожженной пленки при  $T_{\text{ill}} = 300$  К ее ФП при низких температурах также уменьшилась, но слабее, чем после освещения при  $T_{\text{ill}} = 130$  К, а быстрый рост



*Rис. 1.* Температурные зависимости темновой проводимости  $\sigma_d$  (1\*) и фотопроводимости  $\sigma_{ph}$  слоистой пленки а-Si:H после ее отжига (1), а также температурные зависимости фотопроводимости после предварительного изохронного освещения пленки в течение 60 мин при  $T_{ill} = 130$  К (2), 300 К (3) и 410 К (4). Интенсивность света при предварительном освещении составляла 60 мВт·см $^{-2}$ , а при измерении фотопроводимости — 0.5 мВт·см $^{-2}$

ФП с температурой наблюдался лишь выше 300 К. При температуре вблизи 380 К величина ФП этой пленки также достигала значения ФП отожженной пленки и с ростом температуры становилась больше ее. После предварительного освещения отожженной пленки при  $T_{ill} = 410$  К величина ФП при низких температурах была лишь немного меньше ФП отожженной пленки. При температуре вблизи 380 К она, как и в предыдущих случаях, достигала значения ФП отожженной пленки, а выше 400 К — превышала ее.

В работе было проведено исследование гистерезиса ФП при нагреве пленок до температур  $T_h < T_{ill}$  и  $T_h > T_{ill}$  и последующем охлаждении их до 130 К. На рис. 2 приведены данные этих исследований.

На рис. 2, а представлены температурные зависимости ФП пленки, предварительно освещенной в течение 60 мин при  $T_{ill} = 130$  К, измеренные при нагреве пленки до  $T_{h1} > T_{ill}$  (кривая 1), последующем ее охлаждении от  $T_{h1}$  до  $T_{ill}$  (кривая 2), повторном нагреве от  $T_{ill}$  до  $T_{h2} > T_{h1}$  (кривая 3) и охлаждении до  $T_{ill}$  (кривая 4). Направления изменения температуры при измерениях указаны на рисунке стрелками. На этом же рисунке показана температурная зависимость ФП этой пленки, также предварительно освещенной при 130 К в течение 60 мин, но измеренная во всем температурном интервале при непрерывном повышении температуры (кривая 5).

На рис. 2, б представлены температурные зависимости ФП пленки, предварительно освещенной в течение 60 мин при  $T_{ill} = 300$  К, полученные при нагреве пленки от 130 К до  $T_{h1} < T_{ill}$  (кривая 1), при последующем ее охлаждении до 130 К (кривая 2), при повторном ее нагреве до  $T_{h2} > T_{ill}$  (кривая 3) и последующем охлаждении до 130 К (кривая 4). Здесь же показана температурная зависимость ФП этой пленки, также предварительно освещенной при  $T_{ill} = 300$  К в течение

60 мин, но измеренная при непрерывном повышении температуры во всем температурном интервале (кривая 5). На вставке рис. 2, б приведены температурные зависимости ТП исследуемой пленки после отжига (кривая 1) и после ее предварительного освещения при  $T_{ill} = 300$  К в течение 60 мин (кривая 2). Видно, что приведенные температурные зависимости ТП различны для отожженной и предварительно освещенной пленки.

На рис. 2, в представлены температурные зависимости ФП пленки, предварительно освещенной в течение 60 мин при  $T_{ill} = 400$  К, полученные при нагреве пленки от 130 К до  $T_h < T_{ill}$  (кривая 1) с последующим охлаждением до 130 К (кривая 2). Здесь же показана температурная зависимость ФП пленки, также предварительно освещенной при температуре  $T_{ill} = 400$  К в течение 60 мин, но измеренная при непрерывном повышении температуры во всем температурном интервале (кривая 3).

Из рис. 2 видно, что при нагреве пленки от 130 К до температуры  $T_h < T_{ill}$  гистерезис ФП отсутствовал: величины и температурные зависимости ФП не изменялись при дальнейшем понижении и повышении температуры в области  $T < T_{ill}$ . При нагреве же предварительно освещенной пленки до температур  $T_h > T_{ill}$  наблюдался гистерезис: величина ФП пленки увеличивалась и температурная зависимость ФП изменялась во всей области температур  $T < T_h$ .

На вставке рис. 2, б видно, что величина ТП предварительно освещенной при  $T_{ill} = 300$  К пленки больше величины ТП отожженной пленки и ее температурная зависимость не экспоненциальна. В области более низких температур ТП освещенной пленки возрастала с температурой быстрее, чем ТП отожженной пленки, а затем с увеличением температуры ее рост замедлялся, и при  $T > 450$  К величина ТП освещенной пленки приближалась к величине ТП отожженной пленки. Аналогичные температурные зависимости ТП были получены для этой же пленки, предварительно освещенной в течение 60 мин при  $T_{ill} = 130$  К и при  $T_{ill} = 400$  К.

На рис. 3 приведена кинетика изменения величины ТП пленки при  $T_{ill} = 400$  К после выключения предварительного освещения. Видно, что ТП со временем изменялась немонотонно: сначала происходил быстрый рост ТП, а затем медленное уменьшение ТП к своему равновесному значению. Это указывает на наличие независимых быстрого и медленного процессов релаксации ТП освещенной пленки. Отметим, что при комнатной температуре измерение кинетики ТП было невозможно из-за ее малой величины ТП. На вставке рис. 3 приведена кинетика изменения ФП во время предварительного освещения пленки при  $T_{ill} = 300$  К. Видно, что при комнатной температуре происходил процесс уменьшения ФП (эффект Стеблера–Вронского), обычно наблюдаемый при освещении в нелегированных пленках а-Si:H. Этот эффект объясняется образованием фотоиндуцированных метастабильных оборванных связей кремния, энергетические уровни которых находятся в нижней половине запрещенной зоны.

## Обсуждение результатов

Полученные экспериментальные данные можно объяснить наличием быстрых и медленных процессов из-

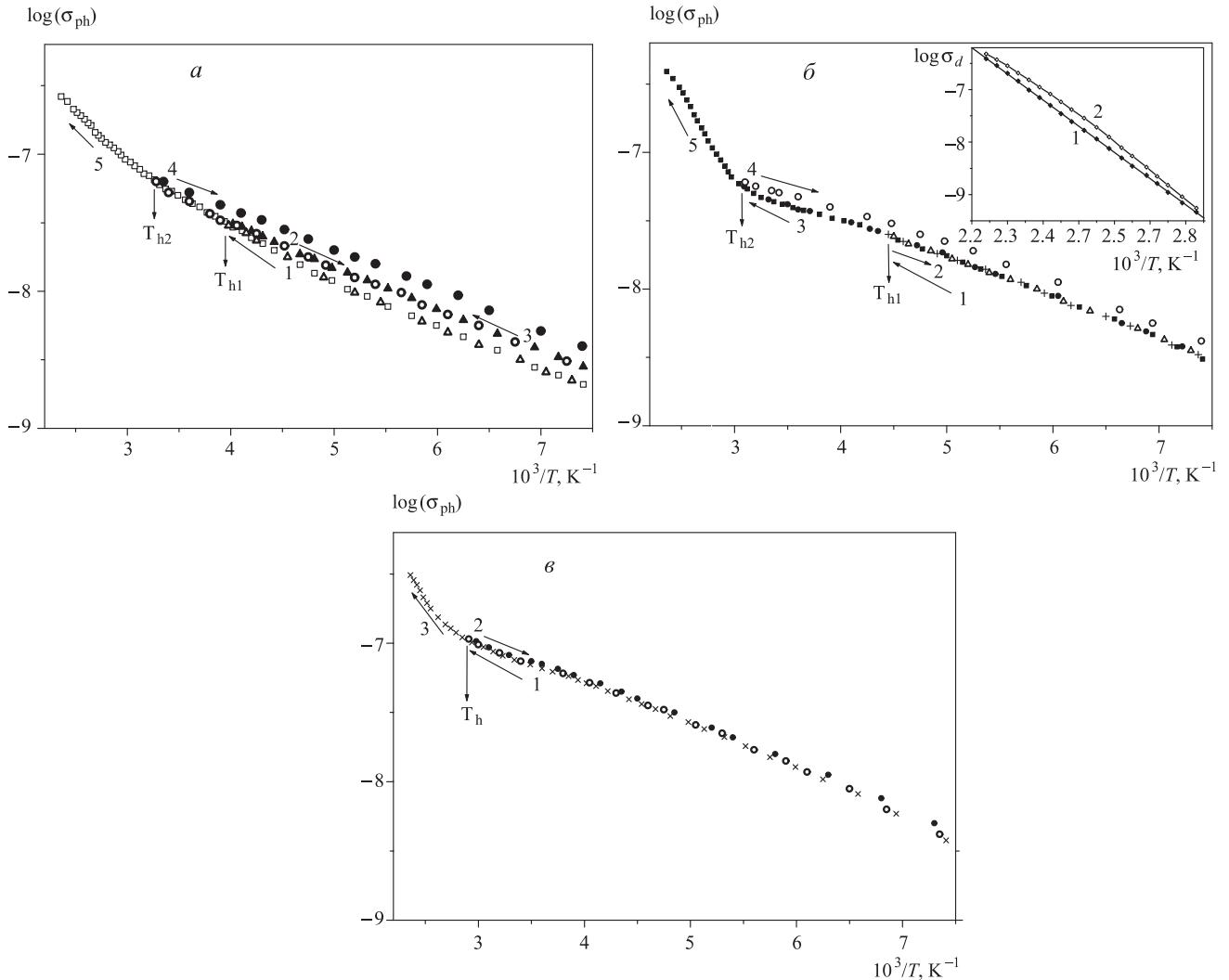
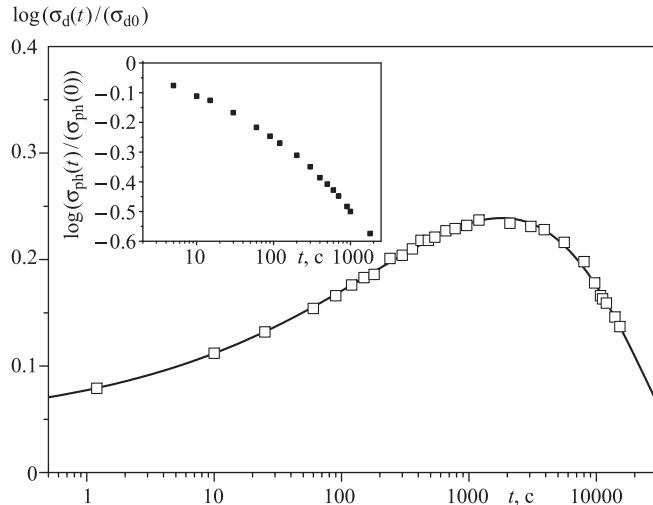


Рис. 2. Температурные зависимости фотопроводимости  $\sigma_{ph}$  предварительно освещенной в течение 1 ч при  $T_{\text{ill}} = 130$  К слоистой пленки а-Si:H: *a* — при циклических измерениях (1–4) и при непрерывном повышении температуры (5):  $\triangle$  —  $\sigma_{ph}(T)$  при нагреве от 130 до  $T_{h1} = 250$  К (1),  $\blacktriangle$  — при последующем охлаждении от 250 до 130 К (2),  $\circ$  — при повторном нагреве от 130 до  $T_{h2} = 300$  К (3),  $\bullet$  — далее при охлаждении от 300 до 130 К (4);  $\square$  —  $\sigma_{ph}(T)$  при непрерывном повышении температуры в интервале 130–450 К (5); *b* — при циклических измерениях  $\sigma_{ph}(T)$  (1–4) и при непрерывном повышении температуры (5):  $+$  —  $\sigma_{ph}(T)$  при нагреве от 130 до  $T_{h1} = 225$  К (1),  $\triangle$  — при последующем охлаждении от 225 до 130 К (2),  $\bullet$  — при повторном нагреве от 130 до  $T_{h2} = 330$  К (3),  $\circ$  — далее при охлаждении от 330 до 130 К (4);  $\blacksquare$  —  $\sigma_{ph}(T)$  при непрерывном повышении температуры в интервале 130–450 К (5). На вставке: кривые температурной зависимости темновой проводимости  $\sigma_d$  отожженной пленки (1) и пленки, предварительно освещенной при  $T_{\text{ill}} = 300$  К в течение 1 ч (2); *c* — при циклических измерениях  $\sigma_{ph}(T)$  (1, 2) и при непрерывном повышении температуры (3):  $\circ$  —  $\sigma_{ph}(T)$  при нагреве от 130 до  $T_h = 350$  К (1),  $\bullet$  — при последующем охлаждении от 350 до 130 К (2);  $\times$  —  $\sigma_{ph}(T)$  при непрерывном повышении температуры в интервале 130–450 К (3). Направления изменения температуры при измерениях указаны стрелками, а последовательность измерений — цифрами около стрелок. Вертикальными стрелками указаны максимальные температуры  $T_{h1}$  и  $T_{h2}$  при циклических измерениях  $\sigma_{ph}(T)$

менения распределения плотности локальных электронных состояний в запрещенной зоне во время освещения пленки, а также быстрых и медленных процессов восстановления начального распределения после выключения освещения.

Немонотонная кинетика изменения ТП освещенных пленок после выключения освещения указывает непосредственно на наличие быстрого и медленного процессов восстановления плотности состояний в запрещенной зоне (рис. 3). Влияние температуры предварительного освещения  $T_{\text{ill}}$  на величину и темпе-

ратурную зависимость ФП (рис. 1) можно объяснить тем, что быстрые и медленные метастабильные изменения плотности состояний в запрещенной зоне при и после освещения пленок по-разному зависят от температуры освещения и релаксации. Освещение при низких температурах  $T_{\text{ill}}$  создает в основном быстрые метастабильные состояния, которые релаксируют даже при низких температурах, когда  $T > T_{\text{ill}}$ . Высокая температура освещения определяет образование преимущественно медленных метастабильных состояний, которые релаксируют при более высоких температурах, когда



*Рис. 3.* Кинетика изменения темновой проводимости пленки  $\sigma_d(t)$ , нормализованной к ее равновесному значению  $\sigma_{d0}$ , после выключения предварительного освещения пленки в течение 60 мин при  $T_{\text{ill}} = 400$  К. На вставке: кинетика изменения фотопроводимости  $\sigma_{ph}$  этой пленки, нормализованной к ее начальному значению, во время освещения пленки при  $T_{\text{ill}} = 300$  К

$T > T_{\text{ill}}$ . Поэтому при нагреве пленок во время измерения температурной зависимости ФП восстановление плотности состояний в пленках, освещенных при разных температурах, происходит по-разному. Это определяет различия в температурных зависимостях ФП освещенных при разных температурах пленок (рис. 1). Отметим также, что повышенные величины ФП и ТП при температурах выше 380 К (рис. 1 и рис. 2, б) определяются тем, что заметная релаксация медленных метастабильных состояний в пленках происходит при температурах выше 420 К.

Быстрые изменения ФП и ТП в слоистых пленках, как и в стандартных нелегированных пленках а-Si:H, можно связать с образованием и релаксацией фотоиндированных метастабильных оборванных связей кремния, энергетические уровни которых являются рекомбинационными и расположены в нижней половине запрещенной зоны. Очевидно, что медленные процессы ФП и ТП имеют другую природу.

В работе [11] наблюдаемые температурные зависимости ФП стандартных нелегированных отожженных пленок а-Si:H объяснялись наличием рекомбинационных уровней в области 0.5–0.7 эВ выше потолка валентной зоны, связанных с наличием кислорода в пленках. В работе [12] наблюдалось уменьшение плотности состояний в области энергий 0.5–0.75 эВ выше потолка валентной зоны в результате освещения пленок а-Si:H с большим содержанием кислорода ( $N_O > 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ). Этот эффект возрастал с увеличением концентрации кислорода в пленках.

В исследованных в настоящей работе слоистых пленках а-Si:H концентрация кислорода была значительной вследствие технологии получения пленок. Следовательно, можно предположить, что в исследованных слоистых пленках имеются рекомбинационные центры, связанные с кислородом, энергетические уровни которых расположены в нижней половине запрещенной зоны. В случае уменьшения концентрации этих уровней

при освещении будут увеличиваться ТП и ФП пленки, а после освещения — уменьшаться, что согласуется с полученными в настоящей работе результатами.

### Заключение

В работе получены следующие результаты.

1. Исследованные слоистые пленки а-Si:H имеют высокую фоточувствительность:  $\sigma_{ph}/\sigma_d \approx 2 \cdot 10^7$  при  $T = 300$  К и интенсивности белого света 100 мВт·см $^{-2}$ .

2. Величины и температурные зависимости ФП и ТП предварительно изохронно освещенных пленок зависят от температуры, при которой проводилось предварительное изохронное освещение пленок. Наименьшие изменения ФП при комнатной температуре наблюдаются у пленок, предварительно освещенных при температуре выше комнатной.

3. Наблюдаемые метастабильные фотоиндированные изменения температурных зависимостей ФП и ТП и немонотонная кинетика релаксации ТП после выключения предварительного освещения в исследованных слоистых пленках могут быть объяснены быстрым и медленным процессами изменения распределения плотности электронных состояний в запрещенной зоне во время освещения пленок и после его выключения.

4. Быстрые процессы уменьшения ФП и ТП при освещении и увеличения их после выключения освещения могут быть связаны соответственно с образованием и релаксацией фотоиндированных метастабильных оборванных связей кремния, энергетические уровни которых расположены в нижней половине запрещенной зоны.

5. Установленное в освещенных пленках увеличение ТП и ФП при высоких температурах можно объяснить медленным процессом уменьшения во время освещения концентрации электронных состояний, расположенных в нижней половине запрещенной зоны и связанных с наличием кислорода в исследованных слоистых пленках.

Авторы выражают благодарность профессору В. П. Афанасьеву за предоставление слоистых пленок а-Si:H.

### Список литературы

1. Sheng S., Liao X., Kong G., Yan H. // Appl. Phys. Lett. 1998. **73**, N 3. P. 336.
2. Kamei T., Stradins P., Matsuda A. // Appl. Phys. Lett. 1999. **74**, N 12. P. 1707.
3. Longeaud C., Roy D., Hangouan Z.T. // Appl. Phys. Lett. 2000. **77**, N 22. P. 3604.
4. Hong J.P., Kim C.O., Nahm T.U., Kim C.M. // J. Appl. Phys. 2000. **87**, N 4. P. 4881.
5. Jun K.H., Ouwend J.D., Schropp R.E.I. et al. // J. Appl. Phys. 2000. **88**, N 8. P. 4881.
6. Sheng S., Liao X., Kong G. // Appl. Phys. Lett. 2001. **78**, N 17. P. 2509.
7. Ahn J.Y., Jun K.H., Lim K.S. // Appl. Phys. Lett. 2003. **82**, N 11. P. 1718.
8. Zhu X.H., Chen G.H., Zhang W.L. et al. // Chin. Phys. Soc. 2005. **14**, N 11. P. 2348.
9. Курова И.А., Ормонт Н.Н., Теруков Е.И. и др. // ФТП. 2001. **35**, № 3. С. 367.

10. Афанасьев В.П., Гудовских А.С., Коньков О.И. и др. // ФТП. 2000. **34**, № 4. С. 492.
11. Balberg I., Naidis R., Fonseca L.F. et al. // Phys. Rev. B. **63**, N 11. P. 113201.
12. Sakata I., Kamei T., Yamanaka M. // Phys. Rev. B. 2007. **76**, N 7. P. 075206.

## The effect of illumination on dark conductivity and photoconductivity of hydrogenated amorphous silicon layered films

I. A. Kurova, N. N. Ormont<sup>a</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics of Semiconductors, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.  
E-mail: <sup>a</sup>ormont@phys.msu.ru.

It was known that isochronous illumination differently changes values and temperature dependences of dark conductivity and photoconductivity of layered a-Si:H films, obtained by cyclic deposition with intermediate annealing in hydrogen plasma, depending on illumination temperature. The observed effects may be determined by fast and slow processes of density energy states distribution change below midgap during illumination.

**Keywords:** hydrogenated amorphous silicon, photoconductivity, photo-induced metastable defects, thermal relaxation.

PACS: 61.43.Dq, 71.23.Cq, 71.55.Jv.

Received 10 April 2009.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 5(2009).

### Сведения об авторах

1. Куроева Ида Александровна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; ст. науч. сотр.; e-mail: ormont@phys.msu.ru.  
2. Ормонт Наталия Николаевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; ст. науч. сотр.; e-mail: ormont@phys.msu.ru.