

- [1] Белиничер В. И., Стурман Б. И. — УФН, 1980, т. 130, в. 3, с. 415—458.
 [2] Ивченко Е. Л., Пикус Г. Е. — В кн.: Проблемы современной физики. Л., 1980, с. 275—293.
 [3] Capasso F., Luryi S., Trang W. T., Bethea G. G., Levine B. F. — Phys. Rev. Lett., 1983, v. 51, N 25, p. 2318—2321.
 [4] Ивченко Е. Л., Пикус Г. Е. — В кн.: Тез. Докл. XII совещ. по теории полупроводников. Ташкент, 1985, ч. I, с. 283—284.
 [5] Белиничер В. И., Ивченко Е. Л., Стурман Б. И. — ЖЭТФ, 1982, т. 83, в. 2 (8), с. 649—660.
 [6] Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников. М., 1978. 616 с.

Ленинградский
 политехнический институт
 им. М. И. Калинина

Получено 14.07.1987
 Принято к печати 25.11.1987

ФТП, том 22, вып. 5, 1988

ВЛИЯНИЕ ОСВЕЩЕНИЯ НА ПРОВОДИМОСТЬ ЛЕГИРОВАННЫХ ПЛЕНОК $a\text{-Si} : \text{H}$

Елькин Н. В., Звягин И. П., Коробов О. Е.,
 Курова И. А., Лупачева А. Н.

Как известно, при длительном освещении нелегированных и слабо легированных пленок $a\text{-Si} : \text{H}$ белым светом темновая проводимость σ_t и фотопроводимость σ_f пленок уменьшаются (эффект Стеблера—Вронского) [1^{-3}]. Эти изменения связаны с образованием фотоиндуцированных дефектов — оборванных связей (ОС) [4]. Образование фотоиндуцированных ОС детально исследовалось в нелегированных пленках $a\text{-Si} : \text{H}$, в которых, по-видимому, действует механизм разрыва слабых $\text{Si}-\text{Si}$ -связей за счет энергии, выделяемой при безызлучательной рекомбинации электронов и дырок, захваченных в хвосты зон. При больших концентрациях ОС, когда вероятность конкурирующего процесса рекомбинации становится большой, происходит самоограничение образования ОС: вероятность образования ОС существенно уменьшается. Влияние освещения на свойства легированных пленок менее изучено, и механизм образования ОС неясен. В [5], например, получено, что с увеличением концентрации примесей бора и фосфора, а следовательно, и ОС [6] концентрация фотоиндуцированных ОС растет; это указывает на то, что образование ОС имеет более сложный характер, чем предполагалось в работе [4].

В настоящей работе исследовалось влияние освещения на проводимость и термоэдс пленок $a\text{-Si} : \text{H}$, легированных из газовой фазы бором или фосфором. На рис. 1 показаны температурные зависимости темновой проводимости σ_t одной из пленок, легированных бором (содержание диборана в газовой смеси ~ 5 ат%), после отжига (кривая 1) и после освещения белым светом в течение 1 ч (кривая 2), а также температурная зависимость термоэдс S этой же пленки при тех же условиях. Видно, что в области низких температур температурная зависимость σ_t как до, так и после освещения не описывается простым экспоненциальным законом, а соответствует уменьшению энергии активации с понижением температуры. Подобная зависимость с переменной энергией активации могла бы указать на то, что в области низких температур осуществляется переход к режиму прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка. Действительно, экспериментальные кривые с хорошей точностью описываются выражением

$$\sigma_t = \sigma_{01} \exp(-E_1/kT) + \sigma_{02} \exp(-T_0/T)^{1/4}, \quad (1)$$

где σ_{01} , E_1 , σ_{0h} , T_0 — параметры, характеризующие зонный и прыжковый вклады в проводимость соответственно. Однако полученные при такой обработке экспериментальных данных значения параметра T_0 не позволяют связать низкотемпературную область на рис. 1 с режимом прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка. Действительно, в рамках аппроксимации (1) значения T_0 составляют $5 \cdot 10^8 \div 10^9$ К, что соответствует энергии прыжка $kT (T_0/T)^{1/4}$ около $0.7 \div 0.8$ эВ при $T=200$ К. Таким образом, энергия прыжка заметно превышает энергию активации $E_{01} \approx 0.25$ эВ. Дополнительным свидетельством, указывающим на то, что низкотемпературную область неправомерно связывать с режимом прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка,

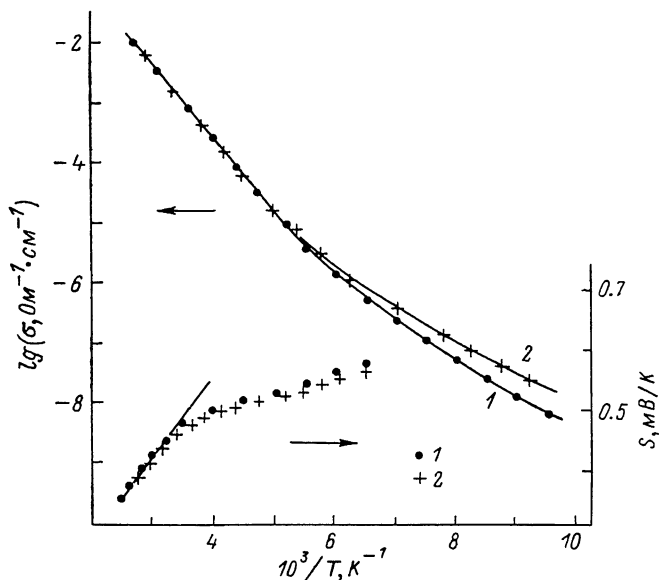


Рис. 1. Температурные зависимости темновой проводимости σ_x и термоэдс S сильно легированной бором пленки p -2 после отжига (1) и после предварительного освещения в течение 60 мин (2).

служит тот факт, что при найденных значениях параметров прыжкового вклада отношение этого вклада к зонному возрастает с температурой. С другой стороны, оказалось, что модель, учитывающая наличие двух активационных каналов проводимости

$$\sigma_x(T) = \sum_{i=1,2} \sigma_i(T) = \sum_{i=1,2} \sigma_{0i} \exp -\frac{E_{i\sigma}}{kT} \quad (2)$$

также хорошо описывает экспериментальные данные для сильно легированных бором пленок a -Si : H. В модели (2) удается удовлетворительно описать и кривые для температурной зависимости термоэдс, используя соотношение

$$S(T) = \sum_{i=1,2} \frac{\sigma_i(T) S_i(T)}{\sigma(T)} \quad (3)$$

где

$$S_i(T) = \frac{k}{e} \left(\frac{E_{iS}}{kT} + A_i \right).$$

Нами использовалась процедура аппроксимации экспериментальных данных по измерению проводимости и термоэдс сильно легированных образцов a -Si : H p -типа с помощью выражений (2), (3) путем минимизации взвешенных средне-квадратичных отклонений. Найденные с помощью выражений (2), (3) значения параметров пленки до и после предварительного освещения в течение 1.5 ч при 250 К приведены в таблице, причем вследствие ограниченности температурного

№ образца и тип	$E_{1\sigma}$, эВ		$E_{2\sigma}$, эВ		σ_{01} , Ом/см ($\times 10^3$)		σ_{02} , Ом/см ($\times 10^3$)		E_{1S} , эВ		E_{2S} , эВ		$\Delta E = E_{1\sigma} - E_{1S}$, эВ		$\Delta E_{\sigma} = E_{1\sigma} - E_{2\sigma}$, эВ	
	0.24	0.25	0.11	0.10	16	19	2.8	2	0.11	0.095	0.03	0.02	0.13	0.15	0.13	0.15
p-2	0.24	0.25	0.11	0.10	16	19	2.8	2	0.11	0.095	0.03	0.02	0.13	0.15	0.13	0.15
n-10	0.25	0.36	—	—	3	11	—	—	0.16	0.2	—	—	0.09	0.16	—	—

Примечание. Первое значение всех параметров для пленки после отжига, второе — для пленки после предварительного освещения.

интервала измерения S погрешность в определении низкотемпературной энергии E_{2S} велика, и приводимые в таблице значения следует рассматривать как ориентировочные.

В соответствии с существующими представлениями о природе проводимости в a -Si : H можно связать первый канал (с большей энергией активации) с проводимостью по делокализованным состояниям вблизи порога подвижности, а второй канал (с энергией активации $E_{2\sigma} < E_{1\sigma}$) — с прыжковой проводимостью по состояниям хвоста. Это предположение подтверждается большим (почти на 4 порядка) различием предэкспоненциальных множителей σ_{01} и σ_{02} (см. таблицу).

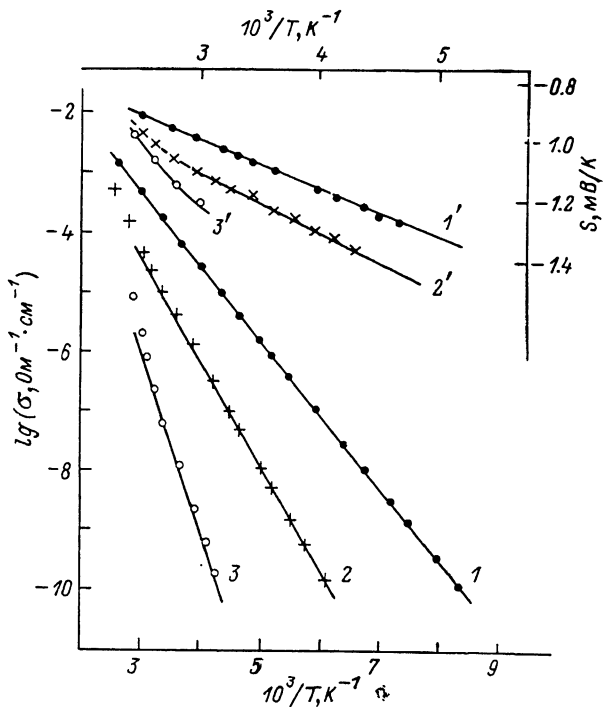


Рис. 2. Температурные зависимости темновой проводимости (1—3) и термоэдс (1'—3') слабо легированной фосфором пленки n-10 после отжига (1, 1') и после освещения в течение 15 (2, 2') и 30 мин (3, 3').

Отклонение от зависимости $S \sim 1/T$ в области высоких температур на кривых 2' и 3' обусловлено отжигом фотоиндуцированных дефектов во время более длительных измерений S .

Как видно из рис. 1, после предварительного освещения наблюдается возрастание проводимости в области низких температур, где существенный вклад дает прыжковая проводимость. После отжига при 170 °C проводимость пленки и ее температурная зависимость восстанавливались.

Описанные изменения проводимости и термоэдс сильно легированных пленок a -Si : H после предварительного освещения существенно отличаются от поведения слабо легированных пленок. Для пленок, слабо легированных фосфором

или бором, во всей исследованной области температура проводимости и термоэдс могут быть описаны в предположении одного канала проводимости [7, 8]. В качестве примера на рис. 2 приведены температурные зависимости проводимости и термоэдс одной из слабо легированных фосфором пленок $a\text{-Si} : \text{H}$ до и после предварительного освещения. Значения параметров приведены в таблице. Значения предэкспоненциального множителя σ_{01} и температурная зависимость $S(T)$ для этой пленки указывают на зонный характер проводимости.

В соответствии с литературными данными в слабо легированных пленках предварительное освещение приводит к существенному возрастанию энергии активации $E_{1\sigma}$ и энергии E_{1S} ; это свидетельствует о смещении уровня Ферми в глубь зоны вследствие образования фотоиндуцированных ОС.

В сильно легированных пленках энергия активации зонной проводимости $E_{1\sigma}$ изменяется мало (см. таблицу). Сильнее изменяется (уменьшается) после освещения энергия активации прыжковой проводимости по хвосту зоны $E_{2\sigma}$. Это приводит к возрастанию проводимости в области низких температур. Как и в слабо легированных пленках, в сильно легированных пленках $a\text{-Si} : \text{H}$ наблюдается заметное различие энергий активации зонной проводимости $E_{1\sigma}$ и энергии E_{1S} , фигурирующей в термоэдс, причем разность $\Delta E_1 = E_{1\sigma} - E_{1S}$ возрастает после освещения. Однако в сильно легированных пленках увеличение разности ΔE_1 значительно слабее. Согласно [9], различие энергий $E_{1\sigma}$ и E_{1S} в аморфных материалах может быть связано с наличием крупномасштабных флуктуаций потенциала, а возрастание разности ΔE_1 при освещении может быть обусловлено неравномерным по пространству образованием фотоиндуцированных дефектов, увеличивающих амплитуду крупномасштабного потенциала [10].

Величина $\Delta E_{\sigma} = E_{1\sigma} - E_{2\sigma}$ характеризует эффективную протяженность хвоста локализованых состояний и, вообще говоря, мало чувствительна к наличию крупномасштабного потенциала. Из таблицы видно, что в сильно легированных бором пленках, в которых можно определить $E_{2\sigma}$ по прыжковой проводимости, после освещения величина ΔE_{σ} увеличивается. Это может быть связано с тем, что в области хвоста валентной зоны образуются фотоиндуцированные дефекты, отличные от ОС. Такими дефектами могут быть, например, близкие пары $\text{V}^- - \text{Si}^{\ddagger}$, создающие локальные уровни вблизи краев зоны [11]. Слабый рост ΔE_1 , небольшая величина изменения энергии активации $E_{1\sigma}$, т. е. малый сдвиг энергии Ферми относительно порога подвижности, а также малое изменение фотопроводимости после освещения указывают на то, что число создаваемых светом ОС относительно невелико. Это обусловлено, по-видимому, тем, что большая «затравочная» концентрация ОС в сильно легированных пленках ограничивает рекомбинацию, приводящую к образованию ОС [12].

Таким образом, исследования сильно легированных пленок с малыми энергиями активации проводимости (0.24 ÷ 0.25 эВ), в которых наблюдаются заметные отклонения от простой активационной зависимости проводимости и отклонения термоэдс от закона $S \sim 1/T$, позволяют получить дополнительную информацию относительно влияния освещения не только на положение уровня Ферми и концентрацию ОС, но и на плотность состояний в хвосте зоны. В исследованных нами пленках после освещения было обнаружено заметное уширение хвоста, не сопровождающееся сильным сдвигом уровня Ферми относительно порога подвижности.

Л и т е р а т у р а

- [1] Staebler D. L., Wronski C. R. — Appl. Phys. Lett., 1977, v. 31, p. 292—296.
- [2] Tanielian M. H., Goodman N. B., Fritzsche H. — J. de Phys., 1981, v. 42, N C4, p. 375—378.
- [3] Курова И. А., Ормонт Н. Н., Подругина В. Д. — Вестн. МГУ, Физика, астрономия, 1985, т. 26, в. 3, с. 86—88.
- [4] Dersch H., Stuke J., Beichler P. — Appl. Phys. Lett., 1980, v. 38, p. 456—457.
- [5] Skumanich A., Amer N. M. — Phys. Rev., 1985, v. B31, N 4, p. 2263—2269.
- [6] Street R. A. — Phys. Rev. Lett., 1982, v. 49, N 16, p. 1187—1190.
- [7] Insigler P., Wagner D., Dunstan D. J. — J. Phys., 1983, v. 16, p. 6605—6613.
- [8] Курова И. А., Акимченко И. П., Читая К. Б. — Вестн. МГУ, Физика, астрономия, 1987, т. 28, в. 3, с. 90—93.
- [9] Overhof H., Beyer W. — Phil. Mag., 1983, v. 43, N 3, p. 433—450.

- [10] Fuchs W., Mell H., Thomas P. — Ann. Phys., 1985, 7 Folge, Bd 42, S. 187—197.
 [11] Adler D. — J. de Phys., 1981, v. 42, N C4, p. 3—6.
 [12] Stutzmann M., Jackson W. B., Tsai C. C. — Phys. Rev. B, 1985, v. 32, p. 23—46.

Московский
 государственный университет
 им. М. В. Ломоносова

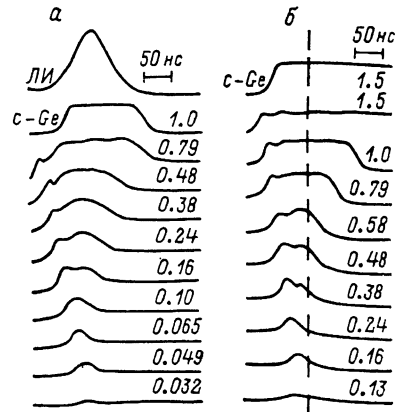
Получено 15.07.1987
 Принято к печати 25.11.1987

ФТП, том 22, вып. 5, 1988

ДИНАМИКА НАНОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА АМОРФНЫХ И УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ИМПЛАНТАЦИОННЫХ СЛОЕВ ГЕРМАНИЯ

Закиров Г. Г., Ивлев Г. Д., Хайбуллин И. Б.

Как известно [1, 2], имплантационный слой германия может быть аморфным (АИС) и ультрадисперсным (УДИС). АИС образуется независимо от типа внедряемой примеси при достижении соответствующей дозы имплантации. УДИС получается из АИС в процессе имплантации ионов тяжелых химически активных элементов. При переходе приповерхностной области в ультрадисперсное состояние она «распухает», ее плотность и параметр кристаллической решетки уменьшаются примерно в 5 раз и на 10—15 % соответственно. Уменьшается также до ~1—5 % коэффициент отражения от УДИС излучения видимой, УФ и ИК областей спектра. УДИС состоит из множества мелких гранул размерами от десятков до сотен ангстрем и обладает высокой термической стабильностью, вследствие чего восстановить монокристаллическое состояние германия обычной (равновесной) термообработкой не удастся. Это достигается импульсным лазерным отжигом [3]. Установлено, что при незначительном превышении плотности энергии W моноимпульсного облучения над пороговым значением УДИС трансформируется в мелкозернистый поликристалл, при более высоких W либо



Оциллограммы временной зависимости отражения зондирующего излучения от c-Ge, УДИС (а) и АИС (б).

Штриховой линией обозначено положение вершины лазерного импульса (ЛП), числа означают величину плотности энергии лазерного излучения в Дж/см².

образуется крупнозернистая структура, либо воздействие лазерного импульса приводит к восстановлению монокристаллического состояния полупроводника. Причем при определенных режимах лазерного воздействия фиксируются некоторые метастабильные фазы германия [4].

В данной работе с целью дальнейшего изучения стадий и механизма фазовых превращений в германии, инициируемых ионными и лазерными пучками, исследована динамика отжига АИС и УДИС под действием одиночных наносекундных импульсов рубинового лазера.

Для получения УДИС химико-механически полированные пластины (111) монокристаллического германия марки ГДГ-45 имплантировались ионами Sn⁺⁺ (60 кэВ; $1.24 \cdot 10^{16}$ см⁻²). Аморфизация электрохимически полированного Ge ГДГ-10 производилась имплантацией P⁺ с энергией 40 кэВ при дозе 10^{16} см⁻². Плотность ионного тока в обоих случаях была ~1 мкА/см². Динамика лазерного отжига исследовалась по методике [5] оптическим зондированием образца на отражение ($\lambda=1.06$ мкм) с разрешением во времени. Рубиновый лазер гене-