

## Плотность состояний в щели подвижности аморфного гидрированного кремния, легированного эрбием

© А.В. Бирюков, А.Г. Казанский<sup>¶</sup>, Е.И. Теруков\*, К.Ю. Хабарова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119899 Москва, Россия

\* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 15 июля 2004 г. Принята к печати 9 августа 2004 г.)

Исследовано влияние легирования эрбием пленок аморфного гидрированного кремния на плотность электронных состояний в щели подвижности. Проведено сравнение с данными для пленок  $a\text{-Si:H}$ , легированных мышьяком. Информация о плотности состояний в нижней и верхней половинах щели подвижности получалась из измерений, соответственно, спектральных зависимостей коэффициента поглощения и температурных зависимостей постоянной и переменной составляющих фотопроводимости при освещении пленок модулированным светом. Проведенные исследования показали, что легирование пленок  $a\text{-Si:H}$  эрбием приводит к увеличению плотности состояний как в нижней, так и в верхней половине щели подвижности.

Пленки аморфного гидрированного кремния, легированные эрбием  $a\text{-Si:H(Er)}$ , привлекают к себе внимание исследователей в связи с тем, что в них наблюдается интенсивная фото- и электролюминесценция с максимумом излучения на длине волны 1.54 мкм, которая соответствует минимуму потерь в оптическом кварцевом волокне. Люминесценция ионов эрбия  $\text{Er}^{3+}$  в  $a\text{-Si:H}$  существенно сильнее, а ее температурное гашение значительно слабее по сравнению с люминесценцией  $\text{Er}^{3+}$  в кристаллическом кремнии [1,2].

В большинстве работ, посвященных изучению пленок  $a\text{-Si:H(Er)}$ , исследована фотолюминесценция данного материала (см., например, [2]). Было показано, что интенсивность люминесценции зависит от концентрации атомов кислорода и атомов эрбия, введенных в  $a\text{-Si:H}$ , достигая максимального значения при концентрации эрбия  $N_{\text{Er}} \approx 10^{20} \text{ см}^{-3}$  [3]. Однако в настоящее время в литературе практически отсутствуют данные о влиянии легирования  $a\text{-Si:H}$  эрбием на плотность локализованных электронных состояний в данном материале. В то же время оптические и фотоэлектрические свойства  $a\text{-Si:H(Er)}$  в значительной степени должны определяться распределением плотности электронных состояний в щели подвижности. Поэтому нами были проведены оптические и фотоэлектрические исследования пленок  $a\text{-Si:H(Er)}$ , позволившие получить информацию о влиянии легирования  $a\text{-Si:H}$  эрбием на плотность локализованных электронных состояний в данном материале, и проведено сравнение с данными, полученными для пленок, легированных „традиционными“ примесями (As).

В работе исследованы пленки  $a\text{-Si:H(Er)}$ , полученные разложением моносилана ( $\text{SiH}_4$ ) в высокочастотном тлеющем разряде. Пленки толщиной  $\sim 0.8$  мкм осаждались на кварцевую подложку, имевшую температуру  $250^\circ\text{C}$ . Легирование Er осуществлялось возгонкой металлорганического соединения  $\text{Er}(\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2)_3$  при различных

температурах  $T_f$  ( $90$ ,  $95$  и  $105^\circ\text{C}$ ), помещенного в вакуумную линию, соединенную с реакционной камерой. С ростом  $T_f$ , согласно данным измерений обратного резерфордовского рассеяния, концентрация атомов введенного эрбия возрастала от  $2 \cdot 10^{19}$  до  $3.3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . В полученных пленках наблюдалась фотолюминесценция на длине волны 1.54 мкм. Пленки имели проводимость  $n$ -типа и положение уровня Ферми относительно края зоны проводимости ( $E_C - E_F$ ) при комнатной температуре  $0.34\text{--}0.36$  эВ. Величина ( $E_C - E_F$ ) определялась из соотношения  $E_C - E_F = kT \ln(\sigma_0/\sigma_d)$ , где  $\sigma_d$  — темновая проводимость пленок и  $\sigma_0 = 150 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  — минимальная металлическая проводимость [4].

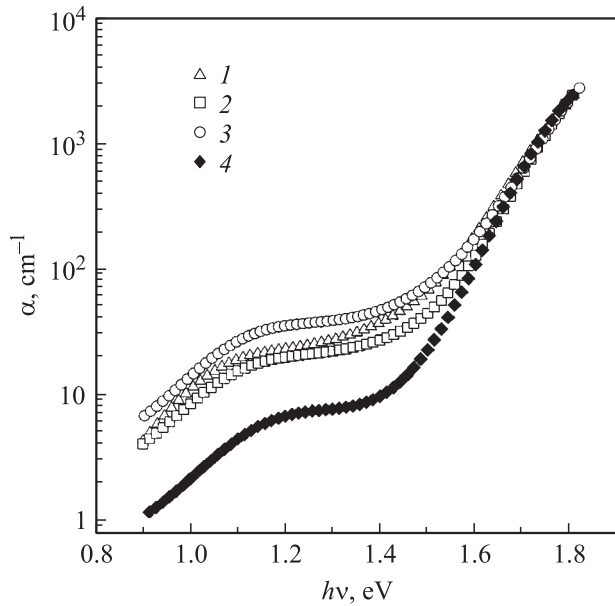
Пленки  $a\text{-Si:H(As)}$  с положением уровня Ферми  $E_C - E_F = 0.34$  эВ были получены в результате добавления арсина ( $\text{AsH}_3$ ) в реакционную камеру. Объемное отношение газов составляло  $[\text{AsH}_3]/[\text{SiH}_4] = 10^{-5}$ . Все измерения проводились в вакууме  $10^{-3}$  Па после отжига образцов при  $T = 180^\circ\text{C}$  в течение 30 мин.

Для получения информации о влиянии легирования  $a\text{-Si:H}$  эрбием на плотность состояний в нижней половине щели подвижности измерялись спектральные зависимости коэффициента поглощения ( $\alpha$ ) с помощью метода постоянного фототока [5]. Распределение плотности состояний  $N_t(E)$  в верхней половине щели подвижности определялось из измерений температурных зависимостей фотопроводимости в условиях освещения пленок модулированным светом с частотой  $\omega$ . Согласно [6], распределение  $N_t(E)$  может быть получено из измерений постоянной и переменной составляющих фототока. В этом случае

$$N_t(E_F^n) = \frac{G}{\omega kT} \frac{\Delta\bar{\sigma}}{\Delta\bar{\sigma}},$$

где  $\Delta\bar{\sigma}$  и  $\bar{\sigma}$  — соответственно постоянная составляющая и амплитуда переменной составляющей фотопроводимости,  $E_F^n$  — положение квазиуровня Ферми для

<sup>¶</sup> E-mail: Kazanski@phys.msu.ru



**Рис. 1.** Спектральные зависимости коэффициента поглощения  $\alpha$  для пленок  $a\text{-Si:H(Er)}$  (1–3) и пленки  $a\text{-Si:H(As)}$  (4). Температура возгонки при легировании эрбием  $T_f, ^\circ\text{C}$ : 1 — 90, 2 — 95, 3 — 105.

электронов,  $G$  — амплитуда темпа генерации неравновесных носителей при модулированном возбуждении. Изменение температуры или интенсивности возбуждения позволяет изменять положение  $E_F^n$  и соответственно получать распределение  $N_i(E)$  из измерений  $\Delta\bar{\sigma}$  и  $\Delta\bar{\sigma}'$ . Представленное выражение для  $N_i(E_F^n)$  справедливо в области частот модуляции, удовлетворяющих условию

$$\frac{1}{\tau_n} < \omega < N_C^* v S \exp[-(E_C - E_F^n)/kT],$$

где  $\tau_n$ ,  $N_C^*$ ,  $v$  и  $S$  — соответственно время фотосоответа, эффективная плотность состояний в зоне проводимости, тепловая скорость носителей заряда и сечение их захвата локализованными состояниями. Верхнее ограничение на величину  $\omega$  необходимо для обеспечения термодинамического равновесия между свободными носителями заряда и захваченными на состояния вблизи  $E_F^n$  при модулированном возбуждении. В то же время, в условиях ограничения значения  $\omega$  снизу, величина  $\Delta\bar{\sigma}$  не должна зависеть от времени жизни носителей и изменяться обратно пропорционально  $\omega$ .

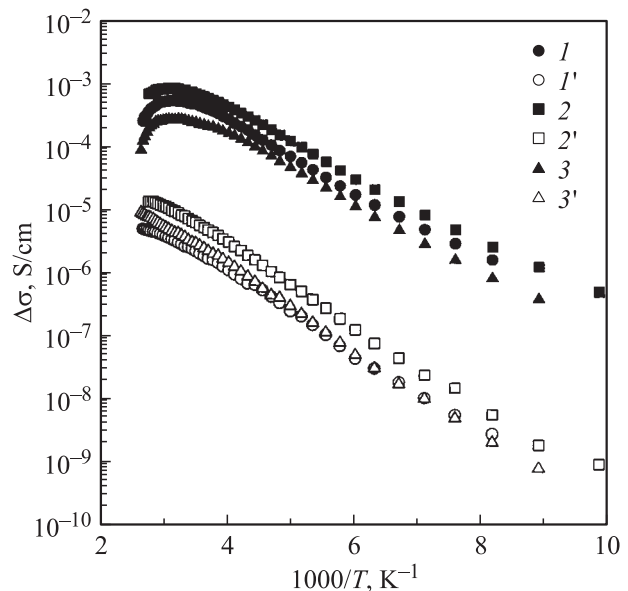
Измерения  $\Delta\bar{\sigma}$  и  $\Delta\bar{\sigma}'$  проводились в условиях освещения пленок модулированным светом от светодиода с энергией квантов 1.85 эВ и амплитудой модулированного потока падающих квантов  $I = 9.6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Частота модуляции составляла  $f = \omega/2\pi = 2 \text{ кГц}$ . Измерение частотных зависимостей  $\Delta\bar{\sigma}$  для исследованных пленок показало, что данная частота модуляции удовлетворяет представленному выше условию определения  $N_i(E)$  из измерений  $\Delta\bar{\sigma}$  и  $\Delta\bar{\sigma}'$ .

На рис. 1 показаны спектральные зависимости коэффициента поглощения  $\alpha$  исследованных пленок

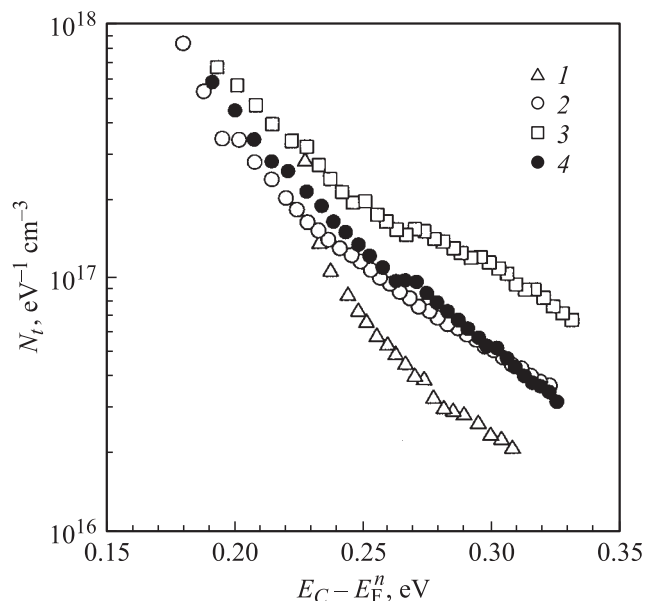
$a\text{-Si:H(Er)}$ . На этом же рисунке для сравнения показана спектральная зависимость  $\alpha$  для пленки  $a\text{-Si:H(As)}$ . Как видно из рисунка, в области поглощения излучения дефектами структуры  $a\text{-Si:H}$  ( $h\nu < 1.5 \text{ эВ}$ ) значение  $\alpha$  для пленок, легированных эрбием, почти на порядок превышает значение  $\alpha$  для пленки, легированной мышьяком. Причем с увеличением величины  $T_f$  и, соответственно, концентрации атомов эрбия, введенных в  $a\text{-Si:H}$ , наблюдается некоторое увеличение поглощения на дефектах.

Известно, что концентрация дефектов типа оборванных связей в пленках  $a\text{-Si:H}$  зависит от положения уровня Ферми в щели подвижности [7]. В исследованных нами пленках  $a\text{-Si:H(Er)}$  и  $a\text{-Si:H(As)}$  положения уровней Ферми близки друг к другу. Поэтому большее поглощение в области, соответствующей состояниям дефектов, для пленок  $a\text{-Si:H(Er)}$  свидетельствует о том, что введение Er в  $a\text{-Si:H}$  приводит к возникновению большей концентрации дефектов, нежели в случае легирования пленок  $a\text{-Si:H}$  мышьяком. Это может быть связано с тем, что, согласно имеющимся данным [8], атомы Er входят в структуру  $a\text{-Si:H}$  в виде комплексов  $\text{ErO}_x$ . Соответственно введение эрбия в  $a\text{-Si:H}$  может привести к большему по сравнению с „традиционными“ примесями увеличению плотности состояний дефектов, расположенных в середине щели подвижности.

На рис. 2 показаны температурные зависимости постоянной составляющей фотопроводимости и амплитуды переменной составляющей фотопроводимости, полученные для исследованных пленок. Из рисунка видно, что величина амплитуды переменной составляющей



**Рис. 2.** Температурные зависимости постоянной составляющей фотопроводимости  $\Delta\bar{\sigma}$  (1–3) и амплитуды переменной составляющей фотопроводимости  $\Delta\bar{\sigma}'$  (1'–3') для пленок  $a\text{-Si:H(Er)}$ , полученных при  $T_f, ^\circ\text{C}$ : 1, 1' — 95, 2, 2' — 105, и пленки  $a\text{-Si:H(As)}$  (3, 3').



**Рис. 3.** Распределение плотности состояний  $N_t$  вблизи зоны проводимости для пленок  $a\text{-Si:H(Er)}$  (1–3) и пленки  $a\text{-Si:H(As)}$  (4). Нумерация кривых 1–3 соответствует рис. 1.

фотопроводимости на 2 порядка меньше постоянной составляющей. Это связано со значительным временем фототовета в исследованных пленках  $a\text{-Si:H}$ .

Распределение плотности электронных состояний в верхней половине щели подвижности для исследованных пленок  $a\text{-Si:H}$ , легированных Er и As, полученных из обработки температурных зависимостей  $\Delta\bar{\sigma}$  и  $\Delta\tilde{\sigma}$ , представлено на рис. 3. Значения  $E_C - E_F^n$  определялись из соотношения

$$E_C - E_F^n = kT \ln(\sigma_0/\Delta\bar{\sigma}).$$

Из сравнения данных, полученных для пленок  $a\text{-Si:H(Er)}$  и  $a\text{-Si:H(As)}$ , видно, что плотность состояний в верхней половине щели подвижности для пленки  $a\text{-Si:H}$ , легированной мышьяком, близка к  $N_t(E)$  для пленки  $a\text{-Si:H}$ , легированной эрбием при  $T_f = 95^\circ\text{C}$ . Как видно из рисунка, с увеличением  $T_f$  и соответственно с ростом концентрации введенных в  $a\text{-Si:H}$  атомов Er увеличивается плотность электронных состояний вблизи зоны проводимости. Заметим, что полученный результат позволяет объяснить различную динамику изменения проводимости при длительном освещении пленок  $a\text{-Si:H}$  с различным уровнем легирования эрбием [9]. Уменьшение относительного изменения проводимости пленок  $a\text{-Si:H(Er)}$  с ростом концентрации Er при их длительном освещении может быть связано с увеличением плотности состояний в области смещения уровня Ферми.

Таким образом, проведенные исследования показали, что легирование пленок  $a\text{-Si:H}$  эрбием приводит к большему увеличению плотности состояний в щели подвижности материала по сравнению с легированием  $a\text{-Si:H}$  „традиционными“ донорными примесями.

Авторы выражают благодарность д-ру Х. Меллу за предоставление пленок микрокристаллического  $\text{Si:H}$ , легированных эрбием и мышьяком.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантом РФФИ № 02-02-39020-ГФЕН-а.

## Список литературы

- [1] W. Fuhs, I. Ulber, G. Weiser, M.S. Bresler, O.B. Gusev, A.N. Kuznetsov, V.Kh. Kudoyarova, E.I. Terukov, I.N. Yassievich. *Phys. Rev. B*, **56**, 9545 (1997).
- [2] H. Kühne, G. Weiser, E.I. Terukov, A.N. Kuznetsov, V.Kh. Kudoyarova. *J. Appl. Phys.*, **86**, 896 (1999).
- [3] В.Х. Кудоярова, А.Н. Кузнецов, Е.И. Теруков, О.Б. Гусев, Ю.А. Кудрявцев, Б.Я. Бер, Г.М. Гусинский, W. Fuhs, G. Weiser, H. Kühne. *ФТП*, **32**, 1384 (1998).
- [4] J. Stuke. *J. Non-Cryst. Sol.*, **97/98**, 1 (1987).
- [5] M. Vanecek, J. Kocka, J. Stuchlik, A. Triska. *Sol. St. Commun.*, **39**, 1199 (1981).
- [6] K.W. Boer, E.A. Niekisch. *Phys. Status Solidi*, **1**, 275 (1961).
- [7] K. Pierz, W. Fuhs, H. Mell. *J. Non Cryst. Sol.*, **114**, 651 (1989).
- [8] C. Piamonteze, A.C. Iniguez, L.R. Tessler, M.C. Martin Alves, H. Tolentino. *Phys. Rev. Lett.*, **81**, 4652 (1998).
- [9] A.V. Birukov, A.V. Fenuchin, A.G. Kazanskii, E.I. Terukov. *Mater. Sci. Engin. B*, **105**, 153 (2003).

Редактор Т.А. Полянская

## Density of states in the mobility gap of an erbium doped amorphous hydrogenated silicon

A.V. Birukov, A.G. Kazanskii, E.I. Terukov\*, K.Y. Khabarova

Lomonosov Moscow State University,  
119992 Moscow, Russia

\* Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The effect of erbium doping on the density of electron states in the mobility gap of an amorphous hydrogenated silicon have been studied. The results were compared to the data obtained for arsenic doped  $a\text{-Si:H}$  film. The information on the density of states in the lower and upper parts of mobility gap was obtained by measurements of the absorption coefficient spectral dependence and temperature dependences of constant and modulated parts of photoconductivity during the illumination of the sample by a modulated light intensity. The experiments performed have shown that the erbium doping leads to the density of states increase both in lower and upper parts of the amorphous hydrogenated silicon mobility gap.