©1994 г.

ДЕФЕКТЫ В АМОРФНОМ КРЕМНИИ, ЛЕГИРОВАННОМ БОРОМ

О.А.Голикова, Э.П.Домашевская, М.М.Казанин, Х.Ю.Мавлянов, В.А.Терехов

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук, 194021, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 28 января 1994 г. Принята к печати 7 февраля 1994 г.)

Проведены исследования ультрамягких рентгеновских эмиссионных спектров образцов *a*-Si:H, легированных бором из газовой фазы и ионной имплантацией. Показано, что этот метод может успешно применяться для определения концентрации нейтральных оборванных связей (D^0) и что закономерности трансформации спектров при изменении степени легирования объясняются перезарядкой дефектов типа $D^0 \rightarrow D^+$ (D^+ — положительно заряженная оборванная связь). Показано различие в спектрах при различных методах введения бора.

Как известно, произведения подвижности на время жизни ($\mu\tau$) электронов и дырок аморфного гидрированного кремния (*a*-Si:H) определяются не только плотностью дефектов (оборванных связей) N_D, но и зарядовым состоянием этих дефектов. При этом хотя величина N_D и зарядовое состояние дефектов, казалось бы, задаются положением уровня Ферми (ε_F) в щели подвижности (E_g) [1,2], ($\mu\tau$) дырок зависит и от способа легирования бором [3].

В данной работе приводятся результаты анализа ультрамягких рентгеновских эмиссионных спектров (УМРЭС) *a*-Si:H, легированного бором ($L_{2,3}$-спектров Si). Типичный УМРЭС *a*-Si:H представлен на рис. 1: интенсивность сигнала I приведена к единице в максимуме, расположенном в области энергий, соответствующих валентной зоне *a*-Si:H. На рис. 1 показана также полоса значительно меньшей интенсивности, связываемая с существованием дефектов (оборванных связей). Действительно, как можно видеть из рис. 2, *a*,*b*, непосредственное сравнение структур полосы состояний дефектов, полученных из фотоэлектронного спектра [4], и полосы УМРЭС [5] «собственного» *a*-Si:H ($\varepsilon_c - \varepsilon_F = E_g/2$, ε_c — край зоны проводимости) показывает, что они весьма близки, хотя фотоэлектронный спектр (спектроскопия полного электронного выхода [4]) отражает вклад всех электронов, а

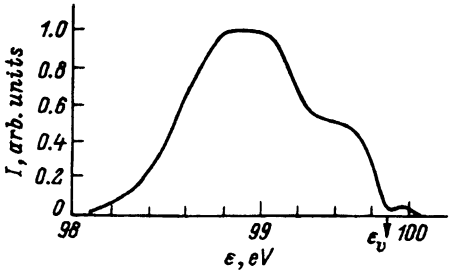

Рис. 1. Типичный УМРЭС *a*-Si:H.

УМРЭС — только *s*-электронов кремния. Отметим также, что спектры, представленные на рис. 2, относятся к приповерхностным областям пленок *a*-Si:H (~ 10 нм): фотоэлектронные спектры вообще дают информацию лишь о таких областях, а УМРЭС специально был снят при достаточно низкой энергии пучка возбуждающих электронов — 1 кэВ [5].

В [5] были представлены результаты калибровки УМРЭС с использованием данных о концентрации дефектов в псевдолегированном *a*-Si:H, определенной методом постоянного фототока. Полученная зависимость интегральной интенсивности (S) полосы дефектов УМРЭС от N_D была использована нами в настоящей работе. Как и ранее, речь идет об определении концентрации дефектов, состояния которых заняты электронами.

Были исследованы УМРЭС образцов *a*-Si:H, легированных бором из газовой фазы, — некоторые данные о них были приведены ранее в [3,6]. Энергия возбуждающих электронов составляла 6 кэВ, что обеспечивало получение информации об объемных дефектах (на глубине 100 нм) [5]. На рис. 3 показана трансформация УМРЭС в зависимости от энергии активации темновой проводимости (ΔE), т.е. от положения ε_F. Если УМРЭС собственного образца показывает отчетливый максимум, то для образца с $\Delta E = 0.6$ эВ он расплывается, а для еще более сильно легированных образцов отчетливо не виден.

Как и ранее в [5], дефектная полоса была выделена в результате вычитания экстраполированного «хвоста» валентной зоны. Далее определяли интегральную интенсивность полосы, а затем величины N_D. О сдвигах максимума дефектной полосы при легировании бором судить трудно из-за сопутствующего изменения ширины запрещенной зоны [3].

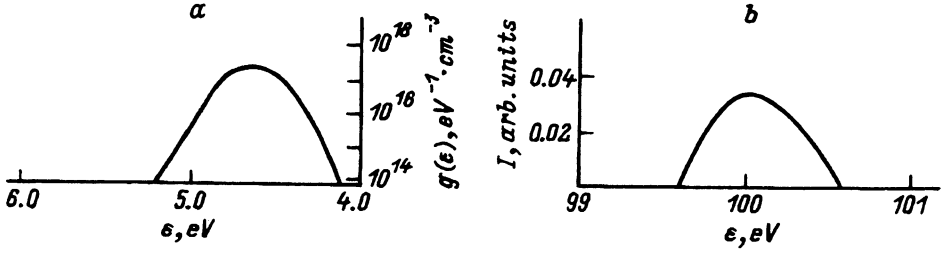

Рис. 2. Полоса состояний дефектов [4] (*a*) и полоса УМРЭС [5] (*b*). Характеристики полос соответственно:
ширина — 1.1 и 1.0 эВ, полуширина — 0.77 и 0.70 эВ, индекс асимметрии — 1.3 и 1.3.

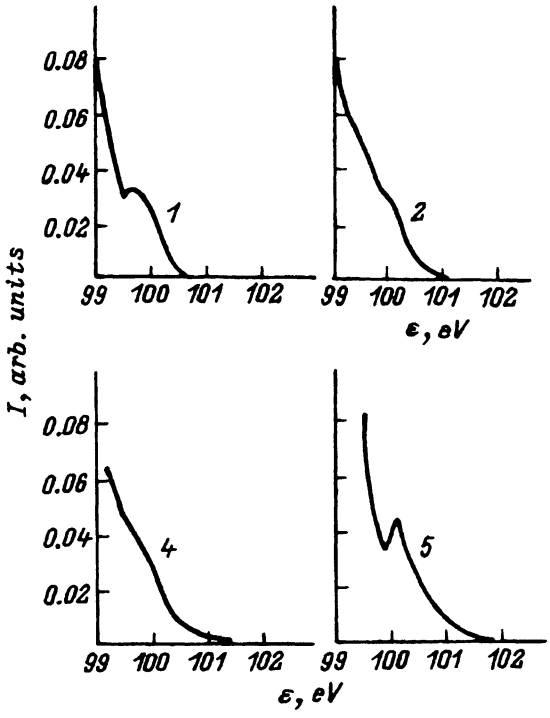

Рис. 3. УМРЭС образцов *a*-Si:H.
1 — нелегированный образец, ΔE = 0.94 эВ;
2–4 — образцы, легированные бором из газовой фазы, ΔE = 0.60, 0.45 и 0.38 эВ соответственно;
5 — образец, легированный бором методом ионной имплантации, ΔE = 0.60 эВ.

Зависимость концентрации дефектов от положения уровня Ферми в щели подвижности относительно края валентной зоны (ε_v) показана на рис. 4 (кривая *I*). В данном случае, очевидно, определяется концентрация дефектов, находящихся в состоянии D^0 (нейтральная оборванная связь). Между тем при легировании бором хотя и возрастает полная концентрация дефектов (рис. 4, кривая *II*), вклад D^0-центров падает,

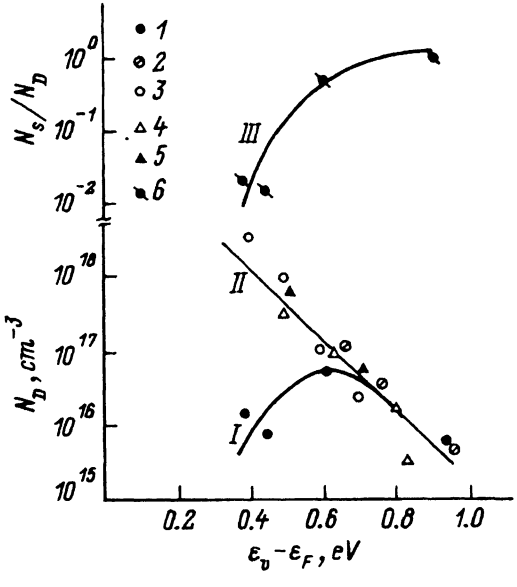

Рис. 4. Зависимости концентрации дефектов (*I*,*II*) и величины отношения N_s/N_D (*III*) от положения уровня Ферми в щели подвижности. Экспериментальные точки:
1 — данная работа, *2* — [6], *3* — [2], *4* — [1], *5* — [7]. Кривая *III* взята из [1], точки *6* — результат расчетов с использованием кривых *I* и *II*.

поскольку происходит перезарядка типа $D^0 \to D^+$ (D^+ — положительно заряженная, т.е. не занятая электроном оборванная связь). Это иллюстрирует кривая *III* на рис. 4, взятая из [1]: здесь N_s — концентрация дефектов (D^0-центров) по данным ЭПР, а N_D — полная концентрация дефектов, определенная методом спектроскопии фототермического отклонения.

Используя данные настоящей работы (кривая *I*) и усредненные данные работ [1,2,6,7] (кривая *II*), можно рассчитать отношения концентраций D^0- и D^+-центров: соответствующие точки попадают на кривую *III*. Таким образом, подтверждается, что УМРЭС можно с успехом применять для определения концентрации D^0-центров в объеме пленки *a*-Si:H. С помощью полученных этим методом данных можно, в частности, объяснить резкое снижение величины $\mu\tau$ дырок в образцах *a*-Si:H, легированных ионной имплантацией, по сравнению с наблюдаемыми в образцах, легированных из газовой фазы [3]. Как видно из сравнения рис. 3, кривые *2* и *5*, при $\Delta E = \text{const}$ УМРЭС образцов резко различаются. Как показали расчеты, концентрация D^0-центров в образце, легированном ионной имплантацией, выше более чем на порядок.

Работа была поддержана грантом Международного фонда Сороса.

Список литературы

[1] M. Stutzmann, W.B. Jackson. Sol.St.Commun., **62**, 153 (1987).
[2] K. Pierz, W Fuhs., H. Mell. Phil. Mag. B, **63**, 123 (1991).
[3] О.А. Голикова, А.П. Соколов, А.П. Шебанин, М.М. Мездрогина. ФТП, **26**, 960 (1992).
[4] L. Ley. J. Non-Cryst. Sol. **114**, 238 (1989).
[5] О.А. Голикова, Э.П. Домашевская, Х.Ю. Мавлянов, В.А. Терехов, С.Н. Тростянский. ФТП, **27**, 1468 (1993).
[6] О.А. Голикова, У.С. Бабаходжаев, В.В. Дубро, Р.Г. Икрамов, М.М. Казанин, М.М. Мездрогина, Р.Р. Яфаев. ФТП, **26**, 66 (1992).
[7] S. Mizukawa, K. Sato, Y. Kazumichi, M. Isawa, K. Kuroiwa, Y. Tarui. Japan. J. Appl. Phys., **28**, 961 (1989).

Редактор Л.В. Шаронова