

Оптоэлектронные параметры пленок аморфного гидрированного кремния, осажденных при высоких температурах, в зависимости от их микроструктуры

© G.J. Adriaenssens, O.A. Голикова*, W. Grevendonk

K.U. Leuven, B-3001, Heverlee, Belgium

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

(Получена 12 мая 1997 г. Принята к печати 15 мая 1997 г.)

Исследованы оптические модуляционные спектры и фотопроводимость ряда пленок $a\text{-Si:H}$, содержащих 5–6 ат% водорода и отличающихся по величине микроструктурного параметра ($R = 0.2\text{--}0.8$). Получена информация о плотности дефектов в пленках, размытии краев зон, величине щели, а также о величине произведения подвижности на время жизни электронов. Показано существенное влияние микроструктуры на оптоэлектронные параметры пленок с низким содержанием водорода.

В настоящей работе приводятся результаты исследований оптоэлектронных параметров пленок аморфного гидрированного кремния ($a\text{-Si:H}$), осажденных методом разложения SiH_4 на постоянном токе в магнитном поле (MASD). Как было показано ранее [1–3], этот метод обеспечивает вариации величины микроструктурного параметра пленок, осажденных при высоких температурах подложки: $T_s = 300\text{--}400^\circ\text{C}$ (микроструктурный параметр, R , как известно, характеризует содержание SiH_2 -комплексов по отношению к суммарному содержанию SiH_2 - SiH -комплексов). Вследствие высоких T_s широкие вариации R достигаются одновременно с низким содержанием водорода в пленке ($C_H < 10$ ат%) (рис. 1), что не удается при использовании других методов. Поэтому пленки, осажденные методом MASD, представляют собой новые объекты для исследований влияния микроструктуры на оптоэлектронные параметры аморфного гидрированного полупроводника. Такие исследования представляются особенно актуальными, поскольку MASD имеет ряд особенностей, привлекательных и с точки зрения технологии.

Следует отметить, что MASD позволяет получать легированные пленки $a\text{-Si:H}$ приборного качества, имеющие C_H до 3 ат%, при использовании сильно разбавленной смеси SiH_4 с Ar. Легирование пленки можно осуществить путем распыления сильно легированной мишени Si, играющей в магнетронной камере роль катода [1–3], или путем сораспыления (например, используя мишени Si и Er [4]). MASD успешно применяли для получения сплавов $a\text{-Si:H}$ с Ge [5].

В настоящей работе основным методом исследования была оптическая модуляционная спектроскопия (OMS) [6–10]. Для экспериментов были выбраны пленки, охарактеризованные ранее [1–3]. Они имели близкие величины C_H при $R = \text{var}$ и характеризовались также близкими величинами $\varepsilon_c - \varepsilon_F$, т.е. примерно одинаковым положением уровня Ферми относительно края зоны проводимости. Последнее существенно, поскольку, как известно, плотность дефектов (оборванных Si–Si-связей) N_D , и произведение подвижности на время жизни элект-

тронов, $\mu\tau$, являются функциями равновесного уровня Ферми, хотя и с большим разбросом экспериментальных данных при $\varepsilon_c - \varepsilon_F = \text{const}$ [11].

OMS как метод, позволяющий получать информацию о локализованных состояниях щели подвижности, E_g , состоит в следующем [6–10]. Образец находится под воздействием двух световых потоков. Один из них — пробный монохроматический, второй осуществляет накачку (probe and pump beams). Создаваемые в результате накачки избыточные носители заряда изменяют заселенность локализованных состояний щели, что влияет на переходы между ними и зонными состояниями. Экспериментально определяемой величиной является $-\Delta T/T$, где T — пропускание пробного светового потока через образец в отсутствие накачки, $-\Delta T$ — изменение пропускания при накачке. Эта величина пропорциональна изменению коэффициента поглощения. Для накачки использовали Ag^+ -лазер (30 мВт см^{-2}). Пробный световой поток создавался при использовании лампы накаливания и монохроматора, оптические модуляционные спектры снимались в интервале энергий $E = 0.5\text{--}2.2$ эВ при комнатной температуре.

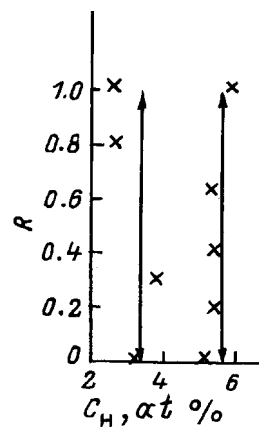


Рис. 1. Вариации микроструктурного параметра пленок $a\text{-Si:H}$, осажденных методом MASD при $C_H = \text{const}$.

На рис. 2 представлены кривые OMS для ряда образцов. На каждой кривой можно выделить три области. Центральная область находится в окрестности максимума при $E = 1$ эВ. Величина $-\Delta T/T$ в максимуме пропорциональна плотности дефектов N_D . Изменения $-\Delta T/T$ в области низких энергий дают информацию о размытии краев зон (tailing). Однако вследствие методических особенностей измерения в этой области не отличаются точностью, поэтому получаемая информация имеет лишь качественный характер [12]. Наконец, при величинах E , близких к краю фундаментального поглощения, наблюдается резкий рост величины $-\Delta T/T$: этот эффект называется термомодуляцией. Отсюда можно оценить величину щели E_g .

Таким образом, метод OMS весьма информативен, причем особенно ценной является информация о плотности дефектов в пленках. Как известно, метод постоянного фототока (СРМ), из-за его сравнительной простоты широко применявшийся для определения N_D , в последнее время подвергается особенно серьезной критике [13,14]. Следует отметить, что для определения N_D интегральное поглощение, связанное с дефектами, нормировалось на величину плотности неспаренных спинов, определенную по электронному парамагнитному резонансу (ЭПР) [15]. Это несомненно корректно, если дефекты находятся в нейтральном состоянии (D°), но становится не вполне корректным, если зарядовое состояние дефекта изменяется, т.е. когда a -Si:H не является "собственным" [11].

Рассмотрим, как изменяется плотность дефектов при изменении R (рис. 2). Пленки a -Si:H с наименьшими величинами R , осажденные методом MASD, по величине N_D сопоставимы с пленками a -Si:H приборного качества, осажденными методом тлеющего разряда, для которых в [12] методом OMS были получены аналогичные данные. В то же время из рис. 2 следует, что

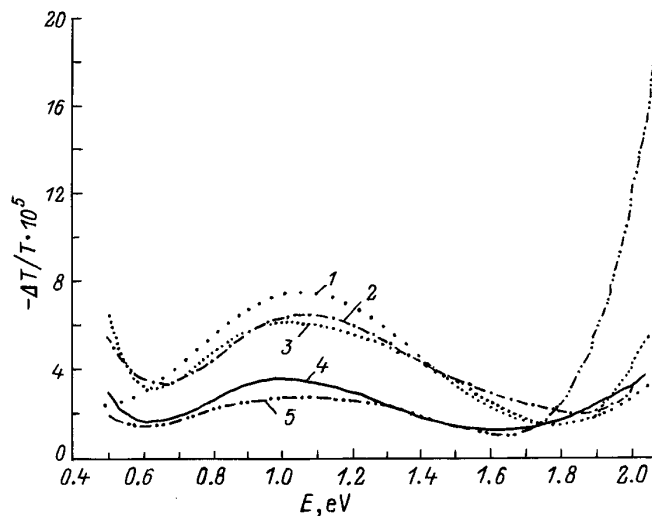


Рис. 2. OMS кривые для пленок 1, 2, 3, 4, 5, имеющих $R = 0.8, 0.8, 0.6, 0.2, 0.3$ соответственно, и $C_H = 5-6$ ат%.

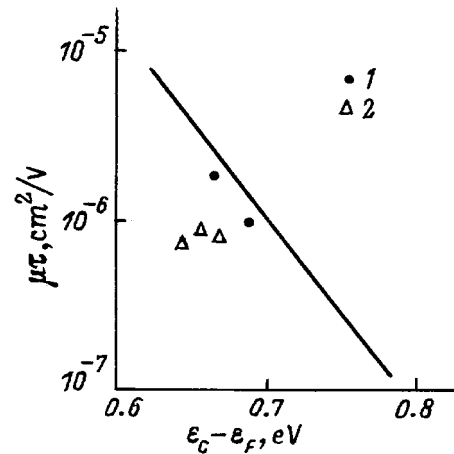


Рис. 3. Зависимость произведения подвижности на время жизни электронов от положения уровня Ферми, a -Si:H приборного качества (кривая). Точки представляют данные для пленок 4 и 5 (1) и № 1-3 (2); см. рис. 2.

рост R приводит к значительному увеличению N_D . При максимальных R фактически весь водород находится в составе SiH_2 комплексов и, хотя полное содержание водорода, C_H , невелико и, следовательно, число этих комплексов так же невелико, микроструктура пленок оказывает весьма существенное влияние как на N_D , так и на размытие хвостов зон (рис. 2). Последнее считается показателем неомогенности структуры a -Si:H. По-видимому, с особенностями микроструктуры следует связывать и повышение величины E_g , наблюдаемое почти для всех пленок, осажденных методом MASD. По оценкам $E_g = 1.8-2.0$ эВ (рис. 2), что не характерно для a -Si:H, осажденного методом тлеющего разряда при $T_s = 300-400^\circ\text{C}$. На рис. 3 представлена кривая, иллюстрирующая зависимость произведения подвижности на время жизни электронов, $\mu\tau$, от положения уровня Ферми для a -Si:H приборного качества [3]. Точки на этом рисунке отвечают данным для пленок, исследованных в настоящей работе. Величины $\mu\tau$ определялись из фотопроводимости, измеренной при комнатной температуре, скорости генерации $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}$ и $h\nu = 2$ эВ. Видно, что пленки с высоким R и соответственно с повышенными N_D отличаются заниженными $\mu\tau$ при $\epsilon_c - \epsilon_F = \text{const}$.

Таким образом, используя метод MASD для осаждения пленок, удалось установить, что изменение микроструктуры (вариации содержания SiH_2 комплексов относительно суммарного содержания SiH_2 и SiH комплексов) оказывает существенное влияние на оптоэлектронные параметры a -Si:H и при низком содержании водорода в пленках.

Работа была поддержана грантом INTAS N 931916 и выполнялась по программе совместных исследований.

Список литературы

- [1] О.А. Голикова, А.Н. Кузнецов, В.Х. Кудоярова, М.М. Казанин. ФТП, **30**, 1879 (1996).
- [2] O.A. Golikova, A.N. Kuznetsov, V.Kh. Kudoyarova, M.M. Kazanin, A.I. Kosarev. MRS Symp. Proc., **420**, 353 (1996).
- [3] О.А. Голикова, А.Н. Кузнецов, В.Х. Кудоярова, М.М. Казанин. ФТП, **31**, 816 (1997).
- [4] M.S. Bresler, O.B. Gusev, V.Kh. Kudoyarova, A.N. Kuznetsov, P.E. Pak, E.I. Terukov, I.N. Yassievich, B.A. Zakharchenya, W. Fuhs, A. Sturm. Appl. Phys. Lett., **67**, 3599 (1995).
- [5] V.Kh. Kudoyarova, N.A. Rogachev, J.T. Ishakov, E.I. Terukov, E.P. Milichevich. Proc. XIII Europ. Photovoltaic Solar Energy Conf., (Nice, France, 1995) p. 165.
- [6] Z. Vardeny, T.X. Zhou, J. Tauc. *Amorphous Silicon and Related Materials*, ed. by H. Fritzsche (World Scientific, Singapore, 1989) p. 513.
- [7] P.O'Connor, J. Tauc. Phys. Rev. B, **25**, 2748 (1982).
- [8] J. Tauc, Z. Vardeny. Phil. Mag. B, **52**, 313 (1985).
- [9] H.A. Stoddart, Z. Vardeny, J. Tauc. Phys. Rev. B, **38**, 1362 (1988).
- [10] W. Grevendonk, M. Verluyten, J. Dauven, G.J. Adriaenssens, J. Bezemer. Phil. Mag. B, **61**, 393 (1990).
- [11] О.А. Голикова. ФТП, **25**, 1517 (1991).
- [12] J. Dauven, W. Grevendonk. J. Non-Cryst. Sol., **114**, 295 (1989).
- [13] H. Stiebig, F. Siebke. MRS Symp. Proc., **377**, 287 (1995).
- [14] P. Stradis, H. Fritzsche, M. Tram. MRS Symp. Proc., **377**, 467 (1995).
- [15] J. Kocka, M. Vanecek, Z. Kozisek, O. Stika, J. Beichler. J. Non-Cryst. Sol., **59-60**, 293 (1983).

Редактор В.В. Чалдышев

A relationship between optoelectronic parameters and microstructures of amorphous hydrogenated silicon films deposited at high temperatures

G.J. Adriaenssens, O.A. Golikova*, W. Grevendonk

K.U. Leuven, B-3001, Heverlee, Belgium

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

Abstract Optical modulation spectra and photoconductivity for a number of *a*-Si:H films containing 5–6 at% of hydrogen with the different microstructure parameters ($R = 0.2–0.8$) have been investigated. Much information concerning the defect density in the films, the tailing, the gap, and the mobility — life time product for electrons was obtained. The changes in microstructures of the films with the low hydrogen content were shown to affect essentially their optoelectronic parameters.