

- [1] Х о л у я н о в Г.Ф. // ФТТ. 1965. Т. 7. № 11. С. 3241-3245.
- [2] A d d a m i a n o A. // J. Electrochem. Soc. 1966. V. 113. N 2. P. 134-136.
- [3] V o d a k o v Yu.A., L o m a k i n a G.A., M o k h o v E.N., R a d o v a n o v a E.I., S o k o l o v V.I. et al. // Phys. Stat. Sol. 1976. V. 35. N 1. P. 37-42.
- [4] I k e d a M., H a y a k o w a Y., Y a - m a g i w a S., M a t s u n a m i H., T a - n a k a T. // J. Appl. Phys. 1979. V. 50. N 12. P. 8215-8225.
- [5] М о х о в Е.Н., Р о е н к о в А.Д., Р а м м М.Г. и др. // Тезисы докладов III Всесоюзного совещания по широкозонным полупроводникам. Махачкала, 1986. С. 67.
- [6] V o d a k o v Yu.A., M o k h o v E.N., R a m m M.G., R o e n k o v A.D. // Krist. und Techn. 1979. V. 14. N 6. P. 829-841.
- [7] В о д а к о в Ю.А., Л о м а к и н а Г.А., М о х о в Е.Н.// ФТТ. 1982. Т. 24. № 5. С. 1377-1383.
- [8] I k e d a M., M a t s u n a m i H. and T a n a k a T. // Phys. Rev. B 1980, V. 22. N 6. P. 2842-2854.
- [9] В е й н г е р А.И., Л е п н ё в а А.А., Л о м а к и н а Г.А., М о х о в Е.Н., С о к о л о в В.И. // ФТП. 1984. Т. 18. № 11. С. 2014-2019.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию
18 мая 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 15

12 августа 1989 г.

06.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОВОДИМОСТИ МНОГОСЛОЙНЫХ
ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР α -Si:H/ α -SiN_x:H
В ХОДЕ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ

Д.И. Б и л е н к о, Ю.Н. Г а л и ш н и к о в а,
Э.А. Ж а р к о в а, О.Ю. К о л д о б а н о в а,
И.И. Н и к о л а е в а

Многослойные периодические структуры на основе слоев гидрогенизированного аморфного кремния и нитрида кремния привлекают все большее внимание сочетанием различных явлений и необычных

свойств, в частности квантоворазмерными эффектами, высокими параметрами полевых транзисторов на их основе, большой кратностью фотопроводимости при меньших значениях темнового сопротивления [1-4]. Свойства многослойных структур определяются рядом параметров; не все из них могут оставаться неизменными при увеличении толщин или числа слоев, поэтому изучение свойств структур после их изготовления не позволяет находить значения таких параметров.

В работе впервые представлены результаты исследования кинетики изменения проводимости в ходе образования многослойных структур с чередующимися слоями $\alpha-Si:H$ и $\alpha-SiN_x:H$. Проведенное исследование, использующее разработанные методы и средства интерференционного и эллипсометрического контроля оптических свойств, толщины слоев в растущей структуре и ее электрофизических свойств [5, 6] позволили определить параметры, характеризующие свойства слоев и границ раздела, проверить адекватность используемого описания связи между толщинами слоев, числом пар, их свойствами и проводимостью структуры и на этой основе прогнозировать значения проводимости периодической структуры в ходе ее образования при увеличении числа слоев и изменении их толщины.

Структуры $\alpha-Si:H/\alpha-SiN_x:H$ были получены на специальной установке плазмохимического осаждения при контроле *in situ* [5] с толщинами 100-1000 Å и 25-50 Å для слоев $\alpha-Si:H$ и $\alpha-SiN_x:H$ соответственно. Чередующиеся слои $\alpha-Si:H$ и $\alpha-SiN_x:H$ наносились на подложки из кварца с гребенчатыми электродами, изготовленными последовательным осаждением в вакууме алюминия и никеля. Измерение сопротивления структур вдоль слоев R проводилось при выключении генератора ВЧ в промежутках времени между нанесением отдельных слоев.

Характерные зависимости R от числа пар слоев представлены на рис. 1. Установлено, что нанесение слоя нитрида кремния вызывает резкое, примерно на порядок, уменьшение удельного сопротивления ранее осажденного слоя $\alpha-Si:H$. При наращивании уже первых трех-четырех пар слоев $\alpha-Si:H/\alpha-SiN_x:H$ сопротивление структуры падает на 2-3 порядка, в дальнейшем при увеличении числа пар оно изменяется существенно медленнее.

Для описания наблюдаемых зависимостей была использована модель проводимости структуры $\alpha-Si:H/\alpha-SiN_x:H$, основанная на учете легирования переносом, т.е. увеличения концентрации носителей в $\alpha-Si:H$, вызванного переходами из локализованных состояний в нитриде кремния [1, 2]. Проводимость слоев $\alpha-Si:H$ в структуре определяется высотой барьера на границе слой-подложка $e\phi_0$, толщинами и диэлектрическими проницаемостями слоев нитрида - L_N , ϵ_N и кремния - L_S и ϵ_S , эффективной толщиной слоя обеднения в нитриде - x_N , определяемой в свою очередь плотностью локализованных состояний в нем - N_{TN} , числом пар слоев в структуре - M и проводимостью структуры с бесконечно большим числом пар - σ_0 . После некоторого уточнения зависимость σ от M и свойств слоев, приведенная в [1, 2], приняла вид

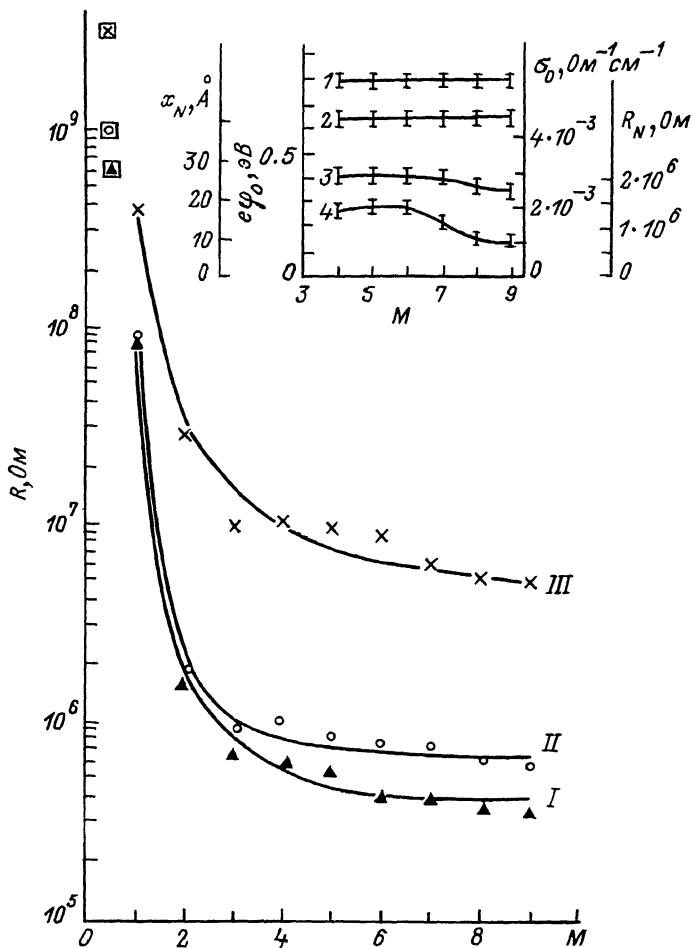


Рис. 1. Зависимости сопротивления и параметров (вставка) структуры $\alpha - Si:H/\alpha - SiN_x:H$ от числа пар слоев.

Сплошные кривые - расчетные по параметрам девяти пар; в квадратах - значения для начального слоя $\alpha - Si:H$. Толщины слоев: $L_S - 300 \text{ Å}$; $L_N - 50 \text{ Å}$ (I, II) и 25 Å (III). На вставке: 1 - $e\phi_0$, 2 - x_N , 3 - σ_0 , 4 - R_N .

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{M} \sum_{m=1}^M \exp \left\{ -\frac{e\varphi_0}{kT} \exp \left[-\frac{mL_N^{1/2} (L_N + \frac{L_S \epsilon_N}{\epsilon_S})^{1/2}}{x_N} \right] \right\}. \quad (1)$$

При используемом расположении контактов, когда отсутствует прямое электрическое замыкание слоев $\alpha - Si:H$, сопротивление структуры в плане определяется не только сопротивлением слоев $\alpha - Si:H$, но и сопротивлением прослоек нитрида кремния в поперечном направлении по отношению к плоскости структуры — R_N . На основе рекуррентного соотношения, связывающего измеряемые значения сопротивления структуры с сопротивлениями слоев $\alpha - Si:H$ и R_N , и соотношения (1) проводилось определение параметров структуры $e\varphi_0$, x_N , σ_0 и R_N при известных значениях L_N , L_S , ϵ_N , ϵ_S . Для нахождения четырех искомых значений достаточно знания сопротивления структуры после осаждения четырех пар слоев. Расчет параметров структуры осуществлялся методом наименьших квадратов по относительным отклонениям экспериментальных значений сопротивлений от расчетных при вариации искомых величин в широком диапазоне значений. Численным анализом показаны однозначность решения задачи и сравнительно высокая чувствительность к определяемым параметрам, позволяющая проводить поиск $e\varphi_0$, x_N с дискретом не хуже 0.05 эВ и 5 Å, σ_0 и R_N с относительным дискретом, меньшим 0.1. Обработка экспериментальных данных подтвердила возможность определения параметров сверхрешетки по результатам измерений *in situ*.

Для структур, зависимости $R(M)$ которых приведены на рис. 1, при температуре осаждения по четырем первым парам слоев были получены следующие наборы параметров: x_N , Å — 50, 55, 40; $e\varphi_0$, эВ — 1.5, 1.35, 0.8; σ_0 , Ом⁻¹ см⁻¹ — $4.5 \cdot 10^{-2}$, $5 \cdot 10^{-2}$, $3 \cdot 10^{-3}$; R_N , Ом — $8 \cdot 10^4$, $2 \cdot 10^5$, $1.3 \cdot 10^6$ для образцов I, II, III соответственно. Определение этих параметров проводилось многократно после наращивания каждой последующей пары. Пример зависимости параметров структуры от числа пар слоев приведен на вставке рис. 1. Значения $e\varphi_0$, x_N , σ_0 остаются практически постоянными, в то время как усредненное значение R_N меняется. Причины изменения R_N исследуются.

Плотность локализованных состояний в $\alpha - Si:H$ при температуре получения, рассчитанная по x_N , составляет $\sim 10^{19}$ см⁻³ эВ⁻¹, что почти на порядок превышает значения, полученные при $T = 300$ К [1]. Проводимость слоев $\alpha - SiN_x:H$ в условиях осаждения, вычисленная по параметру R_N , соответствует $\sigma_N \approx 3 \cdot 10^{-8} - 10^{-9}$ Ом⁻¹ см⁻¹, что согласуется с результатами работы [7] по температурной зависимости электропроводности $\alpha - SiN_x:H$.

По полученным данным, начиная с первых четырех пар слоев, осуществлялось прогнозирование проводимости структуры на последующих этапах образования. Результаты расчетов представлены на рис. 2. Значения проводимости структуры, рассчитанные по параметрам, определенным по четырем и девяти парам слоев, не различаются в пределах суммарной погрешности измерений (меньше 15%).

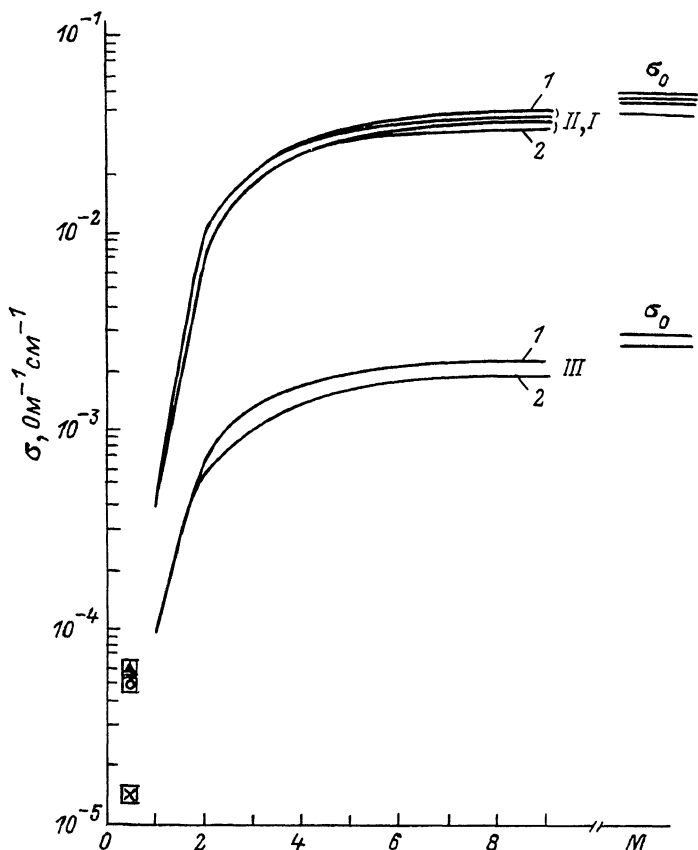


Рис. 2. Зависимость $\sigma(M)$, рассчитанная по параметрам структуры, определенным *in situ*.

Число пар слоев для определения параметров структуры в расчете: 1 - 4; 2 - 9. Остальные обозначения соответствуют рис. 1.

Возможность такого прогнозирования подтверждается хорошим соответствием экспериментальных и расчетных значений сопротивления структуры (рис. 1).

Полученные результаты показывают, что комплексный многопараметровый контроль периодических структур в ходе образования позволяет не только изучать кинетику образования отдельных слоев, но и получать ранее не доступные сведения о свойствах, определяемых границами раздела. На этой основе осуществлена проверка адекватности описания таких структур, основанных на явлении легирования переносом, и показаны возможности прогнозирования свойств структур в ходе их образования.

Авторы благодарны А.А. Меликову и И.И. Лясковскому за помощь в проведении экспериментов.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] T i e d j e T., A b e l e s B. // Appl. Phys. Lett. 1984. V. 45. N 2. P. 179-181.
- [2] T i e d j e T., R o x l o C.B., A b e l e s B., W r o n s k i C.R. // Extended Abstr. 16 (1984 Int.) Conf. Sol. St. Devices and Materials. Kobe. 1984. P. 531-534.
- [3] R o x l o C.B., A b e l e s B., P e r s a n s P.D. // J. Vac. Sci. Technol. B. 1986. V. 4. N 6. P. 1430-1434.
- [4] M a s a k i T s u k u d e, S u s u m u A k a m a t s u, S e i i c h i M i y a z a k i, M a s a t a k a H i r o s e // Jap. J. Appl. Phys. 1987. V. 26. N 2. P. L111-L113.
- [5] Биленко Д.И., Бауэр Р.Г., Галишников-ва Ю.Н., Дворкин Б.А., Колдобанова О.Ю., Лясковский И.И., Меликов А.А., Полянская В.П., Смирнов А.И. // ПТЭ. 1988. № 3. С. 266.
- [6] Биленко Д.И., Галишникова Ю.Н., Жаркова Э.А., Колдобанова О.Ю., Хасина Е.И. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 8. С. 1489-1492.
- [7] D u n n e t t B., J o n e s D.I., S t e w a r t A.D. // Phil. Mag. B. 1986. V. 53. N 2. P. 159-169.

Саратовский государственный университет

Поступило в Редакцию
18 апреля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 15

12 августа 1989 г.

05.2

ФОТОСТИМУЛИРОВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ α -СЕРЫ

Я.О. Д о в г и й, И.В. К и т ы к,
О.Г. Я б л о н о в с к а я

Среди атомарных структур на сегодняшний день фотостимулированные изменения обнаружены в кристаллах фосфора и мышьяка [1, 2]. В этих материалах под действием внешнего оптического