

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОСТИ ЛЕГИРОВАНИЯ
И ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРУЮЩЕЙ ПРИМЕСИ ФОСФОРА
НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК
АМОРФНОГО ГИДРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ**

Аблова М. С., Абдуманапов У. Ж., Абдурахманов К. П.,
Куликов Г. С., Уткин-Эдин Д. П., Ходжаев К. Х.

Методом послойной авторадиографии и измерения остаточной активности исследована однородность легирования фосфором тонких пленок аморфного гидрированного кремния ($a\text{-Si : H}$), осажденных на кремниевые подложки и подвергнутых нейтронной активации. На аналогичных пленках, осажденных на кварцевые подложки, изучено влияние фосфора на электрофизические параметры $a\text{-Si : H}$ при различных уровнях легирования. Показано, что фосфор, вводимый в пленку в процессе выращивания, распределяется достаточно однородно по площади и толщине пленки. Электропроводность легированных пленок на ~ 6 порядков больше электропроводности нелегированных пленок. Установлено, что концентрация введенных доноров пропорциональна $N_p^{1/2}$, где N_p — уровень легирования.

При создании тонкопленочных приборов на основе аморфного гидрированного кремния (ФЭП, фото-, $p-i-n$ -диодов Шоттки, ПЗС, полевых транзисторов и др.) [1] зачастую используются слои легированного материала. Одними из важных факторов, определяющих эффективность легирования аморфного гидрированного кремния ($a\text{-Si : H}$) в процессе выращивания, являются однородность легирования примесью и ее электрическая активность. Эти факторы наряду с другими определяют в дальнейшем качество приборных структур. В связи с этим нами была исследована эффективность легирования фосфором пленок $a\text{-Si : H}$ с использованием метода нейтронной активации и измерений электропроводности.

Объектами исследования служили тонкие (~ 0.9 мкм) пленки $a\text{-Si : H}$, осажденные способом разложения моносилана в ВЧ плазме газового разряда на кварцевых и кремниевых (КДБ-20, КДБ-100) подложках. Легирование примесью фосфора осуществлялось в процессе выращивания путем добавления фосфина к моносилану в различных соотношениях: 0.3, 1.0, 3.0 об % РН₃.

Легированные пленки на кремниевых подложках облучались тепловыми нейтронами (интегральная доза облучения составляла $9 \cdot 10^{18}$ н/см²). Для учета активации атомов матрицы и неконтролируемых примесей вместе с легированными фосфором пленками облучались и собственные (нелегированные), выращенные на таких же подложках. Для определения концентрации легирующей примеси в качестве эталонов использовались облученные такой же дозой нейтронов образцы монокристаллического кремния КДБ-20, предварительно имплантированные ионами фосфора с поверхностной концентрацией $8.125 \cdot 10^{15}$ ат/см². Изучение однородности легирования фосфором по площади и толщине пленок проводилось с использованием послойной авторадиографии и послойного радиоактивного анализа соответственно [2, 3].

На рис. 1, *a* показаны типичные денситограммы с авторадиограммами поверхности сечений легированной пленки после нейтронной активации. Они свидетельствуют в основном об однородности легирования пленок по площади в различных сечениях. Однородность легирования по толщине пленок представлена

на рис. 1, б, на котором приведены данные остаточной радиоактивности пленок при послойном анализе, показывающие, что и по толщине пленки легирующая примесь распределена также равномерно. Усреднение экспериментальных данных и их сравнение с облученными эталонами позволили определить концентрационные уровни легирующей компоненты (Р). Они составляют $8.0 \cdot 10^{19}$, $3.0 \times$

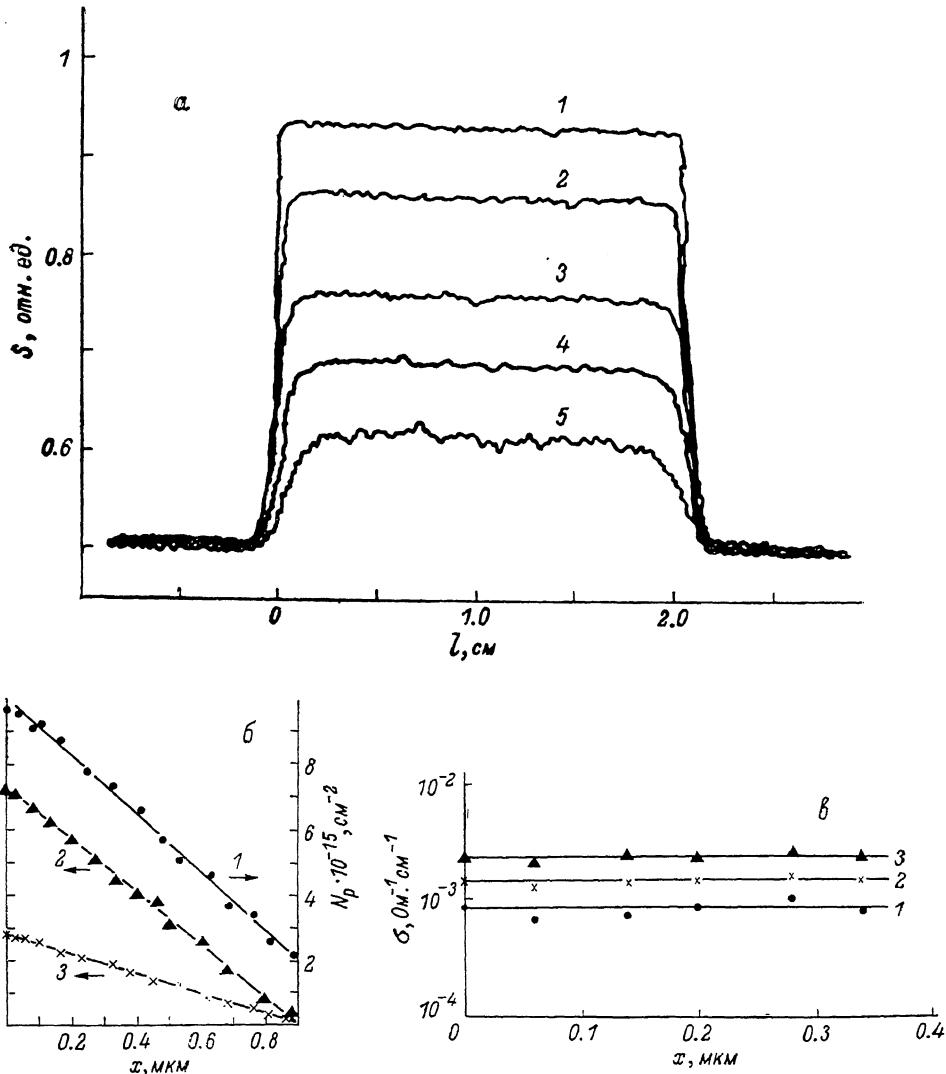


Рис. 1. Однородность легирования примесью фосфора тонких пленок аморфного гидрированного кремния.

а) денситограммы сечений пленки $a\text{-Si : H}\langle P \rangle$ на различной глубине от исходной поверхности, мкм: 1 — 0 (исходная), 2 — 0,2, 3 — 0,4, 4 — 0,6, 5 — 0,8; б) распределение остаточной радиоактивности по толщине пленки $a\text{-Si : H}\langle P \rangle$; толщина пленки, мкм: 1 — 1,2; 2, 3 — 0,9; уровень легирования (содержание PH_3 в газовой смеси), об%: 1 — 0,3, 2 — 1,0, 3 — 3,0; в) распределение электропроводности по толщине пленок $a\text{-Si : H}\langle P \rangle$ ($T=300$ К); содержание PH_3 в газовой смеси, об%: 1 — 0,3, 2 — 1,0, 3 — 3,0; уровень легирования (концентрация электрически активных атомов фосфора) $\cdot 10^{-18}$, см $^{-3}$: 1 — 1,52, 2 — 2,03, 3 — 6,34.

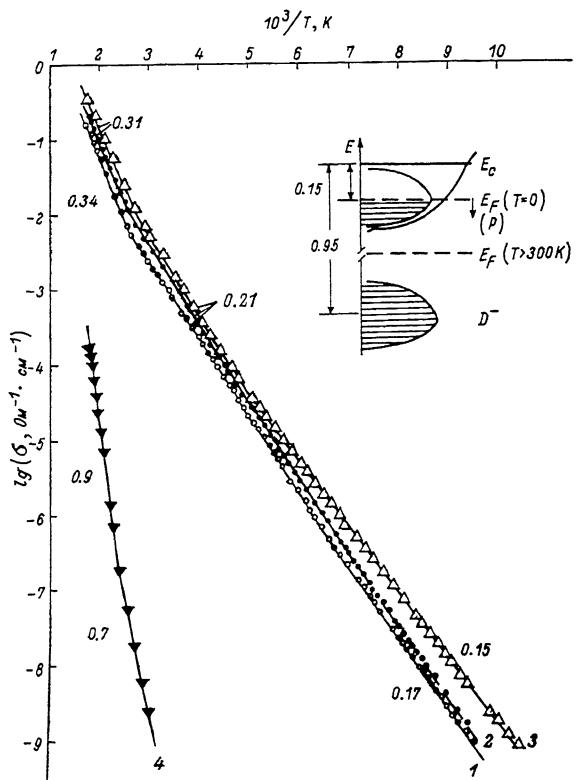
$\times 10^{20}$ и $8.0 \cdot 10^{20}$ ат/см 3 для содержания фосфина в газовой смеси 0,3, 1,0 и 3,0 об% соответственно.

Исследование влияния уровня легирования на электропроводность пленок $a\text{-Si : H}\langle P \rangle$ проводилось на аналогичных образцах, осажденных на кварцевых подложках. Как и в случае исследования однородности распределения фосфора по толщине пленки, нами проводилось послойное измерение электропроводности. При этом использовались аквадаговые контакты с платиновыми отводами, которые были удобны тем, что легко удалялись и наносились каждый раз

PH_3/SiH_4 , об%	$N_p, \text{см}^{-3}$	$\sigma_{300 \text{ K}}, \text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	$N_s \cdot 10^{-16}, \text{см}^{-3}$	$\frac{\sigma_0}{\Omega_m^{-1}} \cdot 10^{-2}, \text{см}^{-1} \cdot (\text{ЭВ})^{-1}$	$D^- \cdot 10^{-16}, \text{см}^{-3}$	$N_D \cdot 10^{-13}, \text{см}^{-3}$
0.3	$8 \cdot 10^{19}$	$9.1 \cdot 10^{-4}$	2	0.9	1.5	1.52
1.0	$3 \cdot 10^{20}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	3	1.0	2.0	2.03
3.0	$8 \cdot 10^{20}$	$2.6 \cdot 10^{-3}$	4	1.8	6.3	6.34
Собственный $a\text{-Si : H}$		$4.3 \cdot 10^{-10}$				

после снятия очередного слоя. Результаты электрометрических измерений электропроводности по толщине пленок, представленные на рис. 1, в, коррелируют с данными нейтронно-активационного анализа по однородности легирования (рис. 1, а, б) и свидетельствуют об эффективности легирования, поскольку электропроводность пленок с примесью фосфора на ~ 6 порядков выше, чем у нелегированных (см. таблицу).

С целью оценки электрической активности атомов фосфора в исследуемых пленках была изучена температурная зависимость электропроводности.



На рис. 2 приведены кривые $lg \sigma = f(1/T)$ для трех пленок, легированных фосфором, и для сравнения — кривая собственного $a\text{-Si : H}$. Основные электрические параметры пленок — абсолютная величина электропроводности (σ , $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$) и значения энергии активации (E_a^σ , ЭВ) — совпадают с известными результатами [4]. Слабое различие этих величин для исследованных пленок (по соотношению PH_3/SiH_4 , равному 0.3, 1.0 и 3.0 об%) свидетельствует о том, что пленки находятся в области насыщения величины электропроводности [4]. Это обстоятельство дает

Рис. 2. Температурная зависимость электропроводности тонких пленок $a\text{-Si : H<P>}$ с различным уровнем легирования.

Концентрация электрически активных атомов фосфора $\cdot 10^{-18}, \text{см}^{-3}$: 1 — 1.52, 2 — 2.03, 3 — 6.34, 4 — 0 (нелегированный).

основание использовать [при обсуждении результатов модель легированного $a\text{-Si : H<P>}$, предлагаемую в обзоре Стрита [5].

Атомы фосфора в аморфной сетке кремния могут находиться в состояниях P_3^+ (и являясь в этом случае электрически неактивными) и состояниях P_4^+ , у которых «лишний» электрон образует донорный уровень. Именно атомы фосфора в состояниях P_4^+ определяют электрическую эффективность легирования, и их концентрация может быть обозначена как концентрация доноров N_D . Следовательно, общая концентрация атомов фосфора N_p (в см^{-3}), измеренная методом нейтронной активации, представляет собой сумму

$$N_p = N_{P_3^+} + N_D + N_0,$$

где N_0 — концентрация атомов фосфора в некоторых других состояниях (комплексы, атомы без химических связей и т. п.). По модели Стрита [5], связанный

с «лишним» электроном пик плотности состояний находится в «хвосте» зоны проводимости на расстоянии 0.15 эВ от E_c . Близкие к этой величине энергии активации наблюдаются на кривых $\lg \sigma = f(1/T)$ при низких температурах (рис. 2). При температурах выше комнатной эти мелкие доноры (N_s) ионизованы и состояния N_s опустошены. Кроме того, многими экспериментами подтверждено, что легированный $a\text{-Si : H} \langle P \rangle$, так же как и чистый, содержит большую плотность изолированных оборванных связей D^0 , которые в случае легирования фосфором захватывают электроны с уровня N_s и становятся отрицательно заряженными D^- , т. е. $D^0 + e \rightarrow D^-$. По последним данным [6], в нелегированном $a\text{-Si : H}$ состояния D^- находятся на расстоянии $0.9 \div 0.95$ от зоны проводимости (рис. 2, вставка — диаграмма). В нашем случае в $a\text{-Si : H} \langle P \rangle$ этот энергетический интервал равен $0.62 \div 0.68$ эВ. Поскольку пик плотности состояний, обусловленный заряженными оборванными связями D^- , всегда заполнен, можно предполагать, что уровень Ферми E_F лежит посередине между порогом подвижности E_c и D^- . В этом случае глубину залегания полосы D^- в зазоре можно оценить по удвоенной энергии активации $E_D = 2E_a^\circ$ (высокотемпературный участок кривых 1—3, рис. 2). Согласно кривым рис. 2, $E_D = 0.62 \div 0.68$ эВ.

Таким образом, действие легирующей добавки сводится к тому, что в процессе осаждения пленки образуются мелкие электронные состояния N_s и (в результате самокомпенсации) глубокие состояния D^- . Тогда концентрация доноров может быть записана в виде суммы $N_D = N_s + D^-$, и, поскольку $N_s \ll D^-$, можно считать, что плотности доноров и заряженных оборванных связей равны. Концентрация D^- (в см^{-3}) была найдена по оправдавшей себя для подобного расчета [7] формуле для одноуровневого донорного полупроводника

$$\sigma_0 = e \mu_c \sqrt{2N_c N_D} \exp(\gamma/k),$$

где σ_0 — префактор в формуле электропроводности, e — заряд электрона, μ_c — подвижность носителей на уровне E_c , N_c — плотность состояний на уровне E_c , N_D — плотность состояний доноров, γ — температурный коэффициент движения края E_c , k — постоянная Больцмана. Расчет проведен для $\mu_c = 1 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $N_c = 10^{21} \text{ см}^{-3}$, $\lambda = 2 \cdot 10^{-4}$ эВ/К. Оценка мелких состояний электронов, обеспечивающих электропроводность по зоне проводимости и в ее «хвосте» при низких температурах, проведена по основной формуле для электропроводности $\sigma = e n \mu_c$ при $\mu_c = 1 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Результаты оценок плотности состояний доноров представлены в таблице. По нашим оценкам, электрическая эффективность легирования (N_D) зависит от общей концентрации фосфора как $N_D = \text{const } N_P^{1/2}$. Сравнение наших результатов с данными работы [5] показывает их удовлетворительное согласие.

Л и т е р а т у р а

- [1] Носов Ю. Р., Юабов Ю. М. Перспективы развития приборов на аморфном гидрированном кремнии. — В кн.: Обзоры по электронной технике, сер. 2. Полупроводниковые приборы. М.: ЦНИИ «Электроника», 1985, в. 3 (1098).
- [2] Ходжаев К. Х., Абдурахманов К. П., Амирзов Ю. Я., Дирик В. А., Куликов Г. С., Теруков Е. И., Уткин-Эдин Д. П. Диффузия олова в аморфном гидрированном кремнии, легированном фосфором. — ФТП, 1985, т. 19, в. 7, с. 1182—1185.
- [3] Ходжаев К. Х., Абдурахманов К. П., Амирзов Ю. Я., Куликов Г. С., Теруков Е. И., Уткин-Эдин Д. П. Растворимость олова в аморфном гидрированном кремнии, легированном фосфором. — ФТП, 1985, т. 19, в. 12, с. 2219—2220.
- [4] Аморфные полупроводники / Под ред. М. Бродски. М., 1982. 419 с.
- [5] Street R. A. J. — Non-Cryst. Sol., 1985, v. 77-78, p. 1—16.
- [6] Abstracts Int. Conf. «Non-Cryst. Semicond.-86». Balatonseplak, Hungary, 1986. 197 p.
- [7] Андреев А. А., Сидорова Т. А., Казакова Е. А., Аблова М. С., Виноградов А. Я. Электропроводность и структура слоев $a\text{-SiH}_x$. — ФТП, 1986, т. 20, в. 8, с. 1469—1475.