



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  $8.0 \cdot 10^{19}$ ,  $3.0 \times$

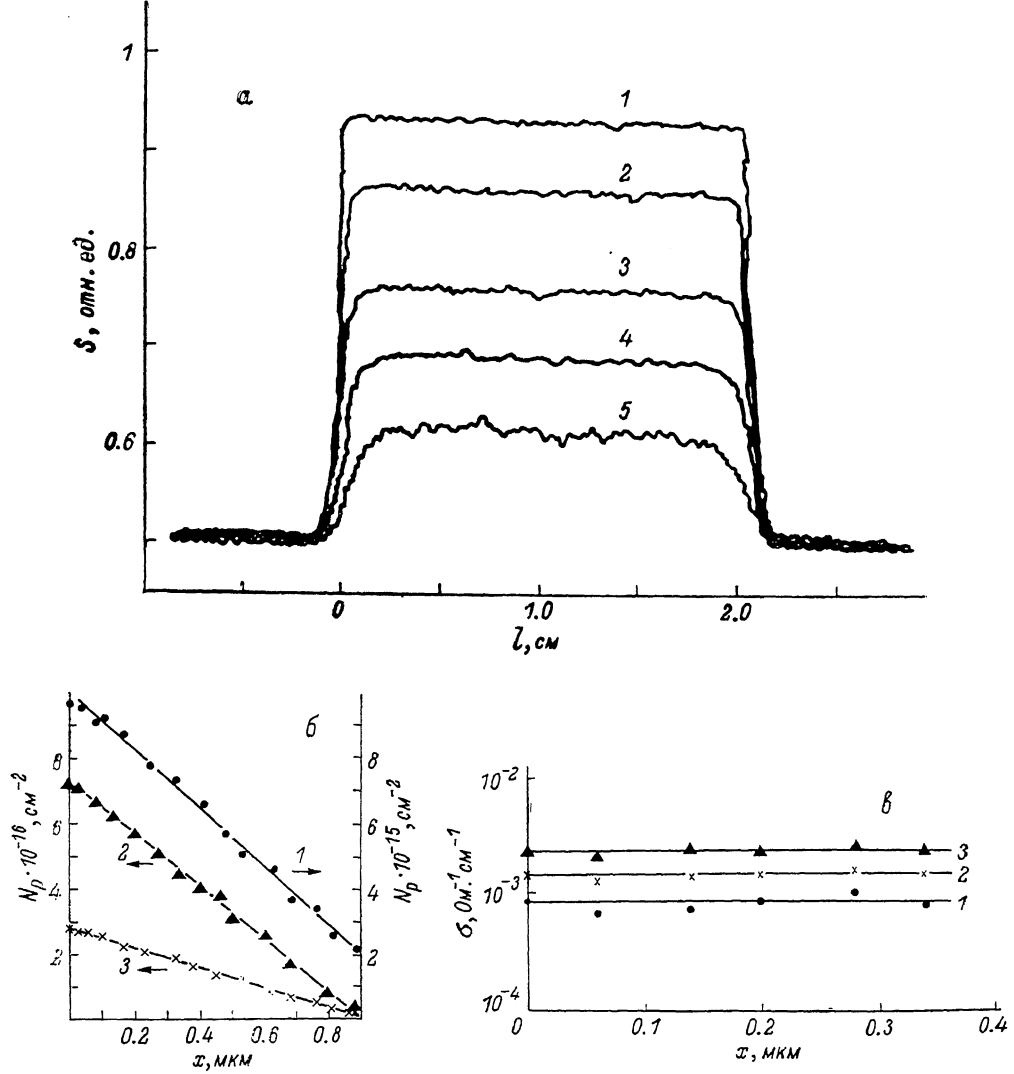


Рис. 1. Однородность легирования примесью фосфора тонких пленок аморфного гидрированного кремния.

а) денситограммы сечений пленки  $a\text{-Si} : \text{H}(\text{P})$  на различной глубине от исходной поверхности, мкм: 1 — 0 (исходная), 2 — 0.2, 3 — 0.4, 4 — 0.6, 5 — 0.85; б) распределение остаточной радиоактивности по толщине пленки  $a\text{-Si} : \text{H}(\text{P})$ ; толщина пленки, мкм: 1 — 1.2; 2, 3 — 0.9; уровень легирования (содержание  $\text{PH}_3$  в газовой смеси), об%: 1 — 0.3, 2 — 1.0, 3 — 3.0; в) распределение электропроводности по толщине пленок  $a\text{-Si} : \text{H}(\text{P})$  ( $T=300 \text{ K}$ ); содержание  $\text{PH}_3$  в газовой смеси, об%: 1 — 0.3, 2 — 1.0, 3 — 3.0; уровень легирования (концентрация электрически активных атомов фосфора)  $\cdot 10^{-18}, \text{cm}^{-3}$ : 1 — 1.52, 2 — 2.03, 3 — 6.34.

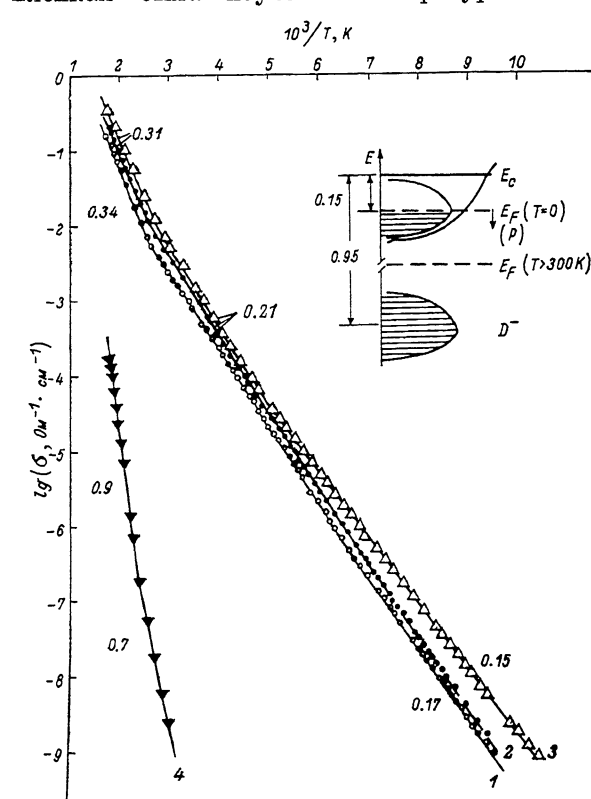
$\times 10^{20}$  и  $8.0 \cdot 10^{20}$  ат/см<sup>3</sup> для содержания фосфина в газовой смеси 0.3, 1.0 и 3.0 об% соответственно.

Исследование влияния уровня легирования на электропроводность пленок  $a\text{-Si} : \text{H}(\text{P})$  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

$\text{PH}_3/\text{SiH}_4$ , об%	$N_P$ , $\text{см}^{-3}$	$\sigma_{300\text{K}}$ , $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	$N_D \cdot 10^{-16}$ , $\text{см}^{-3}$	$\frac{\sigma_0 \cdot 10^{-2}}{\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}}$ , $(E_a^0 = 0.3 \text{ эВ})$	$D^- \cdot 10^{-16}$ , $\text{см}^{-3}$	$N_D \cdot 10^{-13}$ , $\text{см}^{-3}$
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 $a\text{-Si} : \text{H}$		$4.3 \cdot 10^{-10}$				

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  $\sim 6$  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  $a\text{-Si} : \text{H}$ . Основные электрические параметры пленок — абсолютная величина электропроводности ( $\sigma$ ,  $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ) и значения энергии активации ( $E_a^0$ , эВ) — совпадают с известными результатами [4]. Слабое различие этих величин для исследованных пленок (по соотношению  $\text{PH}_3/\text{SiH}_4$ , 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  $a\text{-Si} : \text{H} \langle P \rangle$  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  $a\text{-Si} : \text{H} \langle P \rangle$ , предлагаемую в обзоре Стрита [5].

Атомы фосфора в аморфной сетке кремния могут находиться в состояниях  $P_0^0$  (и являться в этом случае электрически неактивными) и состояниях  $P_1^+$ , у которых «лишний» электрон образует донорный уровень. Именно атомы фосфора в состояниях  $P_1^+$  определяют электрическую эффективность легирования, и их концентрация может быть обозначена как концентрация доноров  $N_D$ . Следовательно, общая концентрация атомов фосфора  $N_P$  (в  $\text{см}^{-3}$ ), измеренная методом нейтронной активации, представляет собой сумму

$$N_P = N_{P_0^0} + N_D + N_0,$$

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  $\alpha\text{-Si} : \text{H} \langle \text{P} \rangle$ , 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  $\alpha\text{-Si} : \text{H}$  состояния  $D^-$  находятся на расстоянии 0.9–0.95 от зоны проводимости (рис. 2, вставка — диаграмма). В нашем случае в  $\alpha\text{-Si} : \text{H} \langle \text{P} \rangle$  этот энергетический интервал равен 0.62–0.68 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  $E_D = 2E_a^e$  (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  $\text{см}^{-3}$ ) была найдена по оправдавшей себя для подобного расчета [7] формуле для одноуровневого донорного полупроводника

$$c_0 = e\mu_c \sqrt{2N_c N_D} \exp(\gamma/k),$$

где  $c_0$  — префактор в формуле электропроводности,  $e$  — заряд электрона,  $\mu_c$  — подвижность носителей на уровне  $E_c$ ,  $N_c$  — плотность состояний на уровне  $E_c$ ,  $N_D$  — плотность состояний доноров,  $\gamma$  — температурный коэффициент движения края  $E_c$ ,  $k$  — постоянная Больцмана. Расчет проведен для  $\mu_c = 1 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ,  $N_c = 10^{21} \text{ см}^{-3}$ ,  $\lambda = 2 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$ . 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 (1998).
- [2] Ходжаев К. Х., Абдурахманов К. П., Амиров Ю. Я., Дидик 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., Амиров 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». Balatonszèplak, Hungary, 1986. 197 p.
- [7] Андреев А. А., Сидорова Т. А., Казакова Е. А., Аблова М. С., Виноградов А. Я. Электропроводность и структура слоев  $\alpha\text{-SiH}_x$ . — ФТП, 1986, т. 20, в. 8, с. 1469–1475.