

## ПРИРОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ПРИМЕСНЫХ ЦЕНТРОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ В АМОРФНОМ ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОМ КРЕМНИИ

*Проведено исследование электрических и фотоэлектрических свойств пленок аморфного гидрогенизированного кремния  $a\text{-Si(H)}$ , легированных редкоземельными металлами (РЗМ). Наилучшие фотоэлектрические параметры (минимальная темновая проводимость, максимальная фотопроводимость) реализованы при температуре подложки  $T_s = 380$  °С. Примесные атомы  $\text{Eu}$ ,  $\text{Dy}$  и  $\text{Yb}$  стимулируют фотопроводимость  $a\text{-Si(H)}$ , тогда как примеси  $\text{Nd}$ ,  $\text{Sm}$ ,  $\text{Gd}$ ,  $\text{Tb}$  и  $\text{Eu}$  подавляют фотопроводимость.*

*G. Bordovsky, A. Marchenko, M. Mezdrogina, P. Seregin*

## THE NATURE OF ELECTRIC ACTIVITY OF IMPURITY CENTERS OF RARE-EARTH METALS IN AMORPHOUS HYDROGENATED SILICON

*A research of electric and photo-electric properties of films of amorphous hydrogenated silicon  $a\text{-Si(H)}$  doped with rare-earth metals is described. The best photo-electric parameters (minimal dark conduction, the maximal photo-conductivity) are observed at the temperature of substrate of 380 °C. The impurity atoms  $\text{Eu}$ ,  $\text{Dy}$  and  $\text{Yb}$  stimulate photoconductivity  $a\text{-Si(H)}$  whereas impurity  $\text{Nd}$ ,  $\text{Sm}$ ,  $\text{Gd}$ ,  $\text{Tb}$  and  $\text{Eu}$  suppress photoconductivity.*

Известно, что примесные атомы, как правило, электрически неактивны в аморфных полупроводниках [1]. Исключение составляет лишь аморфный гидрогенизированный кремний  $a\text{-Si(H)}$ , хотя остается неясной природа электрической активности примесных атомов в нем [2]. Очевидно, что она может быть установлена, если проводится комплексное исследование состояния примесных атомов и, кроме традиционных методов физики полупроводников, используются методы, позволяющие идентифицировать зарядовое состояние примесных атомов. К числу таких методов принадлежит, в частности, мессбауэровская спектроскопия, а наиболее перспективными для мессбауэровских исследований являются редкоземельные металлы (РЗМ), многие из которых имеют мессбауэровские изотопы [3].

Однако, несмотря на очевидную необходимость таких исследований, в литературе они практически отсутствуют [2]. Объясняется это трудностями экспериментального плана: легирование  $a\text{-Si(H)}$ , как прави-

ло, проводится из газовой фазы, тогда как РЗМ не имеют газообразных соединений, что затрудняет приготовление материала, необходимого для проведения исследований. Поэтому нами была разработана и реализована технология получения специально нелегированного и легированного РЗМ а-Si(H) методом высокочастотного распыления монокристаллической мишени кремния и мишени соответствующего металла в газовой смеси водорода, аргона и силана. В настоящей работе представлены результаты по исследованию влияния примесей РЗМ на свойства а-Si(H), полученного таким методом.

Пленки а-Si(H), легированные РЗМ, получали с помощью метода высокочастотного распыления мозаичной мишени в газовой смеси, содержащей аргон, водород и силан. Температура подложки  $T_s$  была или 280 или 400 °С (при температуре подложки менее 280 °С пленки а-Si(H) не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к пленкам «приборного класса», а выше 380 °С начинается частичная кристаллизация пленок). В качестве легирующих добавок использовали Nd, Sm, Gd, Tb, Ho, Dy, Yb. Чистота легирующих добавок — 99,999%. Концентрацию примеси определяли с учетом коэффициента распыления и площади РЗМ на мозаичной мишени.

Были измерены следующие параметры полученных пленок: температурная зависимость темновой проводимости  $\alpha$ , фотопроводимость при освещении потоком  $3,10^{13}$  фотон/см<sup>2</sup>-с, спектральная зависимость фотопроводимости, оптическая ширина запрещенной зоны  $E^0$ , температурная зависимость термоэдс  $S$ . Для оценки концентрации водорода в пленках а-Si(H) и для идентификации типа связей водорода с кремнием использовался метод ИК-спектроскопии. Зарядовое состояние примесей определялось методом мессбауэровской спектроскопии на изотопах <sup>149</sup>Sm, <sup>151</sup>Eu, <sup>161</sup>Dy.

Во всех исследованных пленках концентрация примеси металла была  $(0,10 \pm 0,01)$  ат%. Введение примеси РЗМ не влияло на общую концентрацию водорода, и во всех пленках она была  $(15 \pm 2)$  ат%, хотя введение примеси РЗМ ведет к незначительному возрастанию в пленках соотношения группировок SiH<sup>2</sup>/SiH.

Оптическая ширина запрещенной зоны для специально нелегированного а-Si(H) (температуры подложки  $T_s = 380$  и  $280$  °С) при 295 К была  $E^0 = (1,70 \pm 0,02)$  эВ. Легирование пленок а-Si(H) редкоземельными металлами ( $T_s = 380$  и  $280$  °С) не сопровождается изменением  $E^0$ .

Для нелегированного а-Si(H) ( $T_s = 380$  °С) в температурном интервале 250-500 К зависимость  $\ln \sigma = f(1/T)$  была линейной (см. рис. 1) с энергией активации  $E^0 = (0,58 \pm 0,02)$  эВ. Легирование пленок а-Si(H) редкоземельными металлами (кроме европия) не изменит линейного характера зависимости  $\ln \sigma = f(1/T)$ , однако энергия активации возрастает, а электропроводность при комнатной температуре уменьшается (см. рис. 1 и табл. 1). Для примесей Nd и Ho в области низких температур наблюдается излом на зависимости  $\ln \alpha = f(1/T)$  и переход к проводимости с меньшей энергией

активации (см. рис. 1 и табл. 1). В отличие от других РЗМ, европий приводит к резкому возрастанию электропроводности и к уменьшению  $E^0$  (см рис. 1 и табл. 1). Пленки a-Si(H), полученные при  $T_s = 280^\circ\text{C}$ , оказываются практически нечувствительными к легированию (см. табл. 1), т. е. все примеси РЗМ оказываются электрически неактивными.

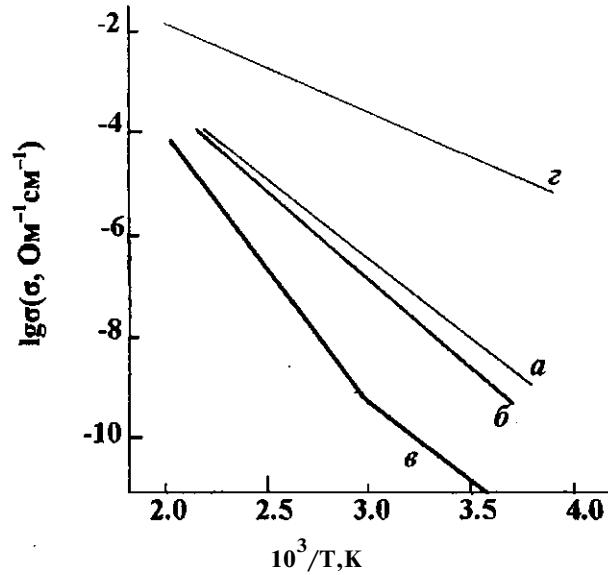


Рис. 1. Температурные зависимости электропроводности пленок:  
 а — a-Si (H), б — a-Si(H):Dy, в — a-Si (H):Ho, з — a-Si (H):Eu.  
 Все пленки получены при  $T_s = 380^\circ\text{C}$

Таблица 1

Параметры электропроводности пленок a-Si(H)

Примесь	$T_s$ , $^\circ\text{C}$	$\rho_0$ , эВ	$\sigma_0$ , $\text{OM}^{-1}\text{CM}^{-1}$	S (295 K) $\text{МКВ.К}^{-1}$	S (500 K) $\text{МКВ.КГ}^{-1}$	$\sigma\Phi(295\text{ K})$ $\text{OM}^{-1}\text{CM}^{-1}\text{МКВТ}$
a-Si(H)	380	0,58	$5,3 \cdot 10^2$	-1950	-1100	$2 \cdot 10^5$
Nd	380	1,02	$2,5 \cdot 10^6$	+50	-300	$410 \cdot 10^6$
	380	0,7(*)				
Sm	380	0,97	$2,8 \cdot 10^6$	0	-500	$410 \cdot 10^9$
Eu	380	0,25	22	-400	-750	$10 \cdot 10^6$
Gd	380	0,89	46	0	-480	$510 \cdot 10^9$
Tb	380	0,80	$3,4 \cdot 10^5$	-350	-600	$210 \cdot 10^9$
Dy	380	0,73	$2,4 \cdot 10^4$	-400	-600	$710 \cdot 10^7$
Ho	380	1,01	$10^6$	+50	-300	$7 \cdot 10^{10}$
	380	0,7(*)				
Yb	380	0,70	$6,5 \cdot 10^4$	-375	-580	$210 \cdot 10^7$
a-Si(H) (H)	280	0,70	$2 \cdot 10^{10}$ (**)			
Sm	280	0,69	$1,8 \cdot 10^{10}$ (**)			
Eu	280	0,70	$1,8 \cdot 10^{10}$ (**)			
Dy	280	0,71	$1,9 \cdot 10^{10}$ (**)			
Погрешности		$\pm 0,02$		10	10	

Примечания: (\*) — область температур ниже 300 К; (\*\*) — проводимость при 295 К.

Нелегированный  $\alpha$ -Si(H) ( $T^s = 380^\circ\text{C}$ ) обладает электронной проводимостью — коэффициент термоэдс  $S$  в области температур 250...506 К был отрицательным. Температурная зависимость  $S = f(1/T)$  была линейной (рис. 2) с энергией активации  $E^s = (0,58 \pm 0,02)$  эВ. Легирование пленок  $\alpha$ -Si(H) ( $T^s = 380^\circ\text{C}$ ) примесями РЗМ сопровождается падением абсолютной величины  $S$  (см. табл. 1), причем по влиянию на термоэдс все РЗМ могут быть разделены на четыре группы:

1. Тербий, диспрозий и иттербий не меняют знака  $S$  в интервале температур 250...560 К, а с ростом температуры величина  $S$  уменьшается, причем зависимость  $S = f(1/T)$  остается линейной (см. рис. 2).

2. Самарий и гадолиний настолько понижают абсолютное значение  $S$ , что мы не смогли определить его знак при комнатной температуре, но при  $T > 350$  К знак  $S$  становится отрицательным (см. табл. 1), а зависимость  $S = f(1/T)$  перестает быть линейной (см. рис. 2).

3. Неодим и гольмий приводят к положительному знаку  $S$  при комнатной температуре, но при более высоких температурах происходит инверсия знака  $S$  (см. табл. 1), а зависимость  $S = f(1/T)$  не линейна (см. рис. 2).

4. Европий понижает абсолютное значение  $S$ , хотя знак остается отрицательным. С ростом температуры величина  $S$  растет (см. табл. 1), причем зависимость  $S = f(1/T)$  линейна с  $E^s = (0,23 \pm 0,02)$  эВ.

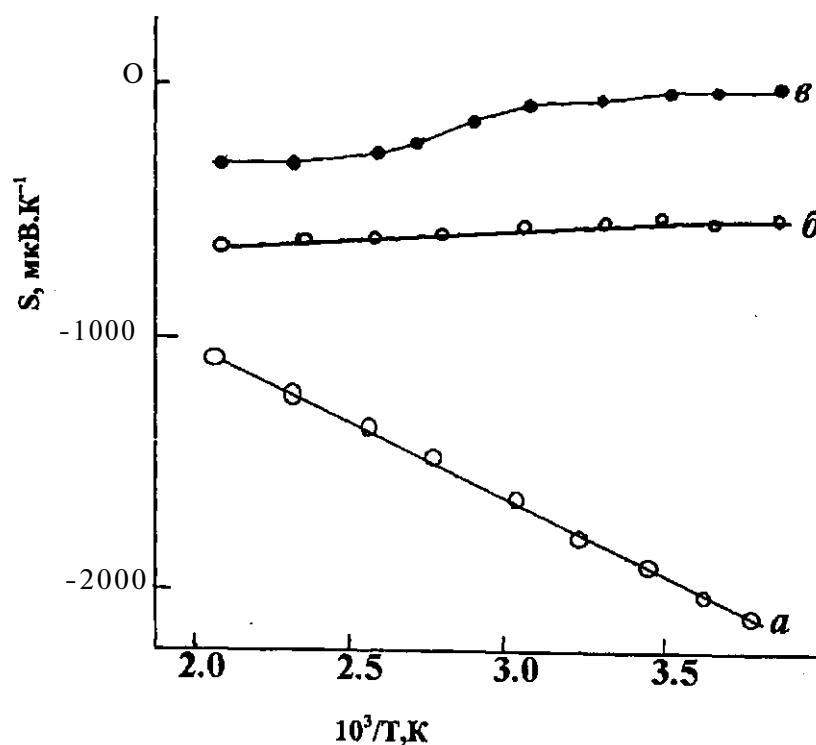


Рис. 2. Температурные зависимости коэффициента термоэдс пленок:  
*a* —  $\alpha$ -Si(H), *б* —  $\alpha$ -Si (H):ТЬ, *в* —  $\alpha$ -Si (H):Ho.  
 Все пленки получены при  $T^s = 380^\circ\text{C}$

Спектральная зависимость фотопроводимости нелегированного  $\alpha$ -Si(H) ( $T^s = 380^\circ\text{C}$ ) при 220, 295 и 325 К приведена на рис. 3. При комнатной температуре максимум фотопроводимости отвечает длине волны падающего света  $\lambda_{\text{max}} = 0,59 \text{ мкм}$  и с понижением температуры максимум фотопроводимости смещается в коротковолновую область (при 220 К  $\lambda_{\text{max}} = 0,56 \text{ мкм}$ ).

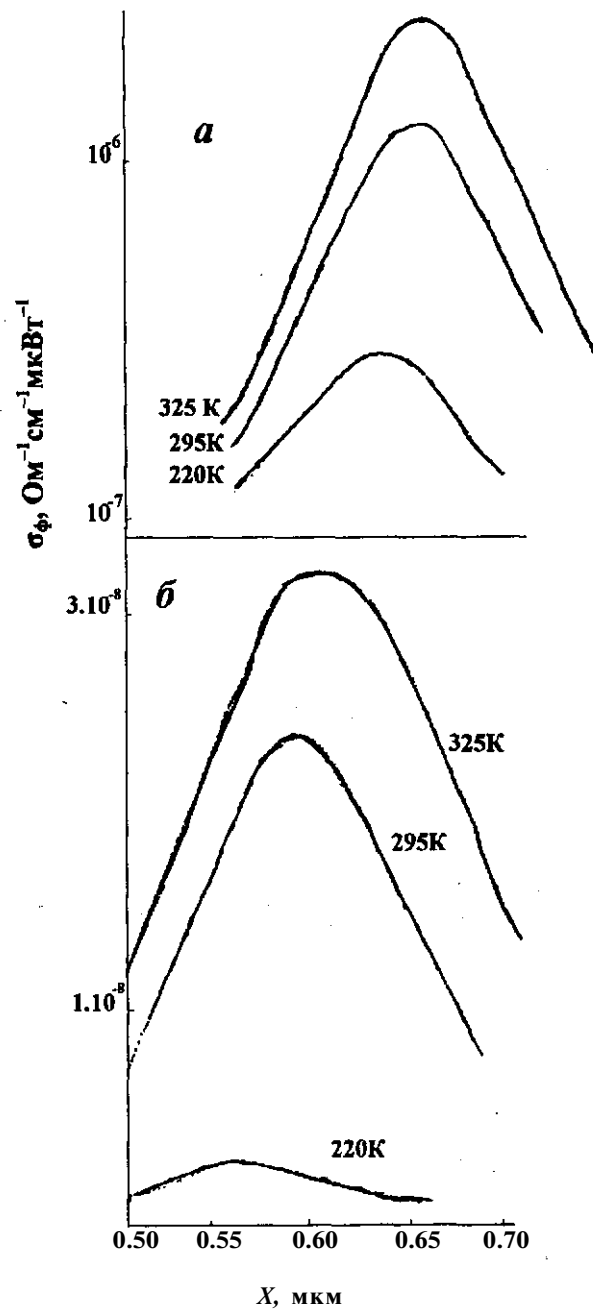


Рис. 3. Спектральные зависимости фотопроводимости пленок:  
 а —  $\alpha$ -Si(H) и б —  $\alpha$ -Si(H):Eu при 220, 295 и 325 К.  
 Все пленки получены при  $T^s = 380^\circ\text{C}$

Примесные атомы РЗМ по влиянию на фотопроводимость  $\alpha$ -Si(H), полученного при  $T^s = 380^\circ\text{C}$ , могут быть разделены на две группы (см. табл. 1).

1. Европий, диспрозий и иттербий стимулируют фотопроводимость, причем наибольшее влияние оказывает европий: как видно из рис. 3, фотопроводимость таких пленок возрастает более чем на два порядка по сравнению с фотопроводимостью пленок  $\alpha$ -Si(H). Одновременно с этим сдвигается в длинноволновую область максимум фотопроводимости (см. рис. 3). Температурная зависимость для таких пленок аналогична таковой для пленок  $\alpha$ -Si(H) (см. рис. 3).

2. Ниодим, самарий, гадолиний, тербий и гольмий подавляют фотопроводимость  $\alpha$ -Si(H) (см. табл. 1).

Мессбауэровские спектры примесных атомов  $^{149}\text{Sm}$ ,  $^{151}\text{Eu}$  и  $^{161}\text{Dy}$  в пленках  $\alpha$ -Si(H) снимались при 295 К с источниками  $^{149}\text{Eu}^{203}$ ,  $^{151}\text{Sm}^{203}$  и  $\text{Gd}^{203}$  ( $^{161}\text{Tb}$ ) соответственно. Образцы готовились с использованием металлических мишеней, обогащенных до 90% соответствующим изотопом.

Мессбауэровский спектр  $^{151}\text{Eu}$  для пленки  $\alpha$ -Si(H):Eu, полученной при  $T^s = 380^\circ\text{C}$ , представляет собой наложение линий, отвечающих  $\text{Eu}^{2+}$  (более интенсивная линия) и  $\text{Eu}^{3+}$  (менее интенсивная линия) (см. рис. 4). Для пленки  $\alpha$ -Si(H):Eu, полученной при  $T^s = 280^\circ\text{C}$ , спектр отвечает только центрам  $\text{Eu}^{2+}$  (см. рис. 4). Мессбауэровские спектры  $^{149}\text{Sm}$  и  $^{161}\text{Dy}$  для пленок  $\alpha$ -Si(H), легированных соответствующими примесями при  $T^s = 380$  и  $280^\circ\text{C}$ , отвечают центрам  $\text{Sm}^{3+}$  и  $\text{Dy}^{3+}$ .

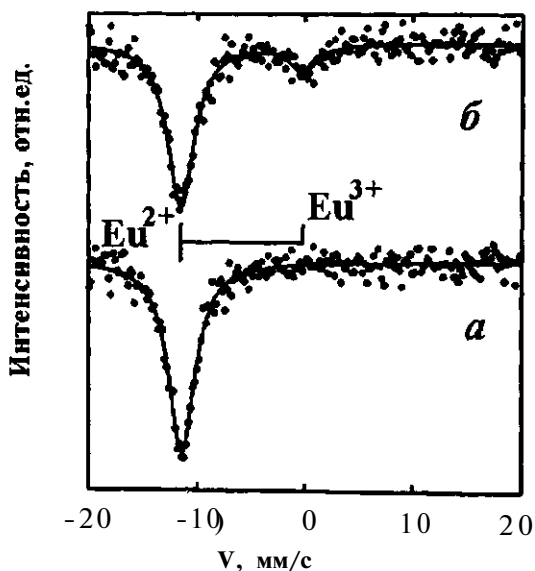


Рис. 4. Мессбауэровские спектры  $^{151}\text{Eu}$  при 295 К пленок  $\alpha$ -Si(H):Eu, полученных при: *a* —  $T^s = 280$  и *б* —  $380^\circ\text{C}$ . Показано наложение линий, отвечающих центрам  $\text{Eu}^{2+}$  и  $\text{Eu}^{3+}$

**Специально нелегированный  $\alpha$ -Si(H).** Температурные зависимости электропроводности  $\ln\sigma = f(1/T)$  и термоэдс  $S = f(1/T)$  в температурном интервале 250...500 К линейны, а энергии активации  $E^0$  и  $E^s$  совпадают. Следовательно, в температурном интервале 250...500 К проводимость пленок  $\alpha$ -Si(H), полученных методом высокочастотного распыления кремниевой мишени в газовой смеси аргона, водорода и силана, осуществляется носителями по делокализованным состояниям одной из разрешенных зон. Исходя из отрицательного знака  $S$ , следует сделать вывод, что проводимость реализуется электронами, забрасываемыми с уровня Ферми на делокализованные состояния зоны проводимости, причем уровень Ферми при низких температурах лежит на 0,58 эВ ниже порога подвижности зоны проводимости  $E^c$ .

**Пленки  $\alpha$ -Si(H), легированные европием.** Эффективное легирование  $\alpha$ -Si(H) примесными атомами европия достигается лишь при температурах подложки  $T^s = 380$  °С (тогда как при  $T^s = 280$  °С все примесные атомы оказываются электрически неактивными).

Для образцов  $\alpha$ -Si(H):Eu, полученных при  $T^s = 380$  °С, температурные зависимости электропроводности  $\ln\sigma = f(1/T)$  и термоэдс  $S = f(1/T)$  остаются линейными, а энергии активации  $E^0$  и  $E^s$  совпадают. Следовательно, в температурном интервале 250...506 К проводимость пленок  $\alpha$ -Si(H):Eu осуществляется электронами по делокализованным состояниям зоны проводимости, однако уровень Ферми при легировании сдвигается к порогу подвижности зоны проводимости. Иными словами, примесные атомы европия образуют в щели подвижности  $\alpha$ -Si (H) полосу донорного типа, лежащую на 0,25 эВ ниже  $E^c$ .

Очевидно, что состояние  $E_i^{3+}$  в мессбауэровском спектре образца  $\alpha$ -Si(H):Eu, полученного при  $T^s = 380$  °С, отвечает ионизованным центрам европия. Следует подчеркнуть, что состояние  $E_i^{2+}$  в мессбауэровском спектре того же образца нельзя приписать нейтральному центру европия — это же состояние наблюдается и для образца  $\alpha$ -Si(H):Eu, полученного при  $T^s = 280$  °С, когда все примесные атомы европия оказываются в электрически неактивном состоянии. Наличие состояния  $E_i^{2+}$  в образце  $\alpha$ -Si(H):Eu, полученном при  $T^s = 380$  °С, указывает на то, что большая часть примесных атомов европия и при этой температуре подложки оказывается в электрически неактивном состоянии. Электрически активным центрам европия отвечает линия  $E_i^{3+}$  в мессбауэровском спектре и, исходя из относительной интенсивности этих линий (см. рис. 4), можно определить, что доля электрически активных атомов европия не превышает 0,14.

Мессбауэровский спектр  $E_i^{2+}$  имеет изомерный сдвиг, близкий к изомерному сдвигу спектра соединения  $E_iO$ . По-видимому, в структурной сетке  $\alpha$ -Si(H) примесные атомы европия образуют электрически неактивные ассоциаты типа  $[E_i^{2+} - O^{2-}]$ .

**Пленки  $a\text{-Si(H)}$ , легированные РЗМ (кроме европия).** Получение пленок  $a\text{-Si(H)}$ , легированных РЗМ при  $T^s = 280^\circ\text{C}$ , не приводит к изменению электропроводности материала: все примесные атомы оказываются в электрически неактивном состоянии. Эффективное легирование достигается только для пленок  $a\text{-Si(H)}$ , полученных при  $T^s = 380^\circ\text{C}$ . Ниже мы рассмотрим только результаты, относящиеся к таким пленкам.

Для пленок  $a\text{-Si(H)}$ , легированных РЗМ, характерно наличие линейной зависимости электропроводности  $\ln a = f(1/T)$ , но температурная зависимость коэффициента термоэдс ведет себя аномальным образом. Полученные результаты можно объяснить, если предположить, что примеси РЗМ образуют в щели подвижности  $a\text{-Si(H)}$  полосу акцепторного типа, лежащую вблизи середины зазора подвижности. Все примеси РЗМ могут быть разделены на три группы:

1. Тербий, диспрозий и иттербий образуют полосу, лежащую на 0,05-0,15 эВ выше середины зазора подвижности [определяемого как  $(E^c - E^v)/2$ , где  $E^v$  — порог подвижности валентной зоны] и, таким образом, акцепторная полоса лежит на 0,7-0,8 эВ ниже  $E^v$ . При низких температурах уровень Ферми  $F^0$  локализован в акцепторной полосе, и проводимость в интервале температур 250...506 К осуществляется электронами, забрасываемыми с уровня Ферми на делокализованные состояния зоны проводимости (мы учли отрицательный знак  $S$  для этих примесей), причем  $E^0 = E^c - F^0 = (0,7-0,8)$  эВ. Малое значение  $S$  при  $T < 300$  К объясняется вкладом дырочного тока.

2. Ниодим и гольмий образуют полосу, лежащую на 0,5 эВ ниже середины зазора подвижности: при низких температурах уровень Ферми  $F^0$  локализован в акцепторной полосе, проводимость в области температур 250...500 К осуществляется преимущественно дырками, забрасываемыми с уровня Ферми на делокализованные состояния валентной зоны (мы учли, что для этих примесей при  $T < 300$  К  $S$  положителен) и  $E^0 = F^0 - E^v = 0,7$  эВ. С ростом температуры уровень Ферми поднимается к  $E^c$ , и в области температур 330...370 К легированный материал ведет себя как собственный полупроводник, причем одинаковый вклад в проводимость электронов и дырок приводит к аномально малому значению  $S$ . Наконец, при дальнейшем повышении температуры начинает преобладать электронная проводимость с энергией активации  $E^0 = E^c - F^0 = 1,01$  эВ, т. е. реализуется аномальный случай, когда  $E^0 > (E^c - E^v)/2$ . На зависимости  $\ln a = f(1/T)$  появляется излом и переход от проводимости с  $E^0 = 0,7$  эВ к проводимости с  $E^0 = 1,01$  эВ.

3. Самарий и гадолиний занимают промежуточное положение между первой и второй группой, т. е. они образуют в зазоре подвижности  $a\text{-Si(H)}$  полосу акцепторного типа, лежащую вблизи середины зазора подвижности. Для них одинаковый вклад электронов и дырок в проводимость наблюдается в области температур 330...350 К.



Мессбауэровские спектры примесных атомов  $^{149}\text{Sm}$  и  $^{161}\text{Dy}$  отвечают зарядовым состояниям  $\text{Sm}^{2+}$  и  $\text{Dy}^{2+}$ . Эти спектры относятся к электрически неактивным центрам самария и диспрозия, поскольку тонкая структура спектров не зависела от температуры подложки. Близость изомерных сдвигов спектров примесных атомов и соединений  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  указывает на образование в структурной сетке  $\alpha\text{-Si(H)}$  ассоциатов типа  $[\text{Ln}^{3+} - \text{O}^{2-}]$  ( $\text{Ln}$  — редкоземельный атом). Как и в случае примесных атомов европия, образование таких ассоциатов ответственно за электрическую неактивность большей части примесных атомов.

В табл. 2 приведена последовательность РЗМ по мере возрастания разности  $(E^c - F^0)$ . В этой же таблице приведены данные по фотопроводимости пленок  $\alpha\text{-Si(H)}$ , легированных РЗМ. Видно, что для примесей, образующих относительно мелкие полосы ( $\text{Yb}$ ,  $\text{Dy}$ ), наблюдается возрастание фотопроводимости, причем имеется отчетливая корреляция между глубиной залегания акцепторной полосы и степенью подавления фотопроводимости. Последний факт имеет очевидное объяснение: глубокие уровни являются эффективными центрами рекомбинации и должны подавлять фотопроводимость. Однако отметим, что уровни, образуемые  $\text{Yb}$  и  $\text{Dy}$ , не являются мелкими ( $E^c - F^0 \sim 0,7$  эВ) и, тем не менее, фотопроводимость этими примесями стимулируется. Следовательно, имеются два механизма влияния примесей РЗМ на фотопроводимость  $\alpha\text{-Si(H)}$ : один из них подавляет (мы его уже обсудили), а другой — стимулирует фотопроводимость, разрушая центры рекомбинации, существующие в структурной сетке  $\alpha\text{-Si(H)}$ . В специально нелегированном  $\alpha\text{-Si(H)}$  основными центрами рекомбинации являются центры [азот — кислород]. По-видимому, РЗМ образуют в структурной сетке  $\alpha\text{-Si(H)}$  ассоциаты  $[\text{Ln}^{3+} - \text{O}^{2-}]$  и разрушают тем самым ассоциаты [азот — кислород]. По крайней мере, для примесей  $\text{Eu}$ ,  $\text{Sm}$  и  $\text{Dy}$  (а именно эти примеси особенно сильно стимулируют фотопроводимость) такие ассоциаты были нами обнаружены методом мессбауэровской спектроскопии.

**Таблица 2**  
**Последовательность РЗМ по мере возрастания  $(E^c - F^0)$**

Примесь	$(E^c - F^0)$ , эВ	оф/о
Yb	0,70	10
Dy	0,73	35
Tb	0,80	0,1
Gd	0,89	0,25
Sm	0,97	0,20
Ho	1,01	0,03
Nd	1,01	0,02

### Заключение

Проведено исследование электрических и фотоэлектрических свойств пленок  $\alpha$ -Si(H), легированных редкоземельными металлами. Пленки получали путем высокочастотного распыления мозаичных мишеней в газовой смеси аргона, водорода и силана. Наилучшие фотоэлектрические параметры (минимальная темновая проводимость, максимальная фотопроводимость) реализованы при температуре подложки  $T^s = 380$  °С. При этой же температуре достигается и эффективное легирование пленок, тогда как при  $T^s = 280$  °С примесные атомы оказываются в электрически неактивном состоянии. Таким состояниям отвечают ассоциаты типа [примесь — дефект структуры], причем с повышением температуры подложки происходит разрушение указанных ассоциатов и возрастает доля электрически активных атомов.

Примесные атомы Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho и Yb образуют в щели подвижности  $\alpha$ -Si(H) полосу акцепторного типа, лежащую вблизи середины щели подвижности, и уровень Ферми оказывается локализованным в этой полосе. В зависимости от глубины залегания акцепторной полосы легированный материал при  $T < 300$  К может быть дырочным (примеси Nd, Ho), собственным (Sm, Ho) или электронным (Tb, Dy, Yb). В области высоких температур ( $T > 400$  К) проводимость осуществляется электронами по делокализованным состояниям зоны проводимости. Примесные атомы европия образуют в щели подвижности  $\alpha$ -Si(H) полосу донорного типа, лежащую на 0,25 эВ ниже порога подвижности зоны проводимости, так что проводимость такого материала осуществляется электронами по делокализованным состояниям зоны проводимости. Такое отличие европия от всех РЗМ объясняется особой устойчивостью полузаполненной 4f оболочки, характерной для атомов Ей.

Примесные атомы Eu, Dy и Yb стимулируют фотопроводимость  $\alpha$ -Si(H), что объясняется образованием в процессе легирования ассоциатов типа  $[Ei^{2+} - O^{2-}]$  и одновременным разрушением центров рекомбинации типа [азот — кислород]. Примеси остальных РЗМ подавляют фотопроводимость, поскольку основными центрами рекомбинации в таких материалах оказываются глубокие акцепторные уровни, образованные РЗМ в щели подвижности. Наблюдается корреляция между степенью подавления фотопроводимости и глубиной залегания акцепторной полосы соответствующей примеси.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Бордовский Г. А., Кастро Р. А., Теруков Е. И. Примесная проводимость стеклообразных полупроводников  $Ge^{28,5}Pb^{15}S^{56,5}$  и  $Ge^{27}Pb^{17}Se^{56}$ // Письма в Журнал технической физики. 2006. Т. 32. Вып. 216. С. 1-6.

2. Емцев В. В., Емцев В. В. (мл.), Полоскин Д. С., Соболев Н. А. Примесные центры в кремнии, легированном редкоземельными примесями диспрозием, гольми-

ем, эрбием и иттербием // **Физика и техника полупроводников.** 1999. Т. 33. Вып. 6.  
С.649-651

*3. Серегин П. П. Физические основы мессбауэровской спектроскопии. СПб., 2002.*