

- [1] Касаткин В. А., Макаренко В. Г., Сидоров В. Г., Целищев Н. С., Шлихтов С. Н. Получение GaP без электрически активного кислорода. — Электрон. техн., сер. 6, Материалы, 1983, в. 5 (178), с. 29—31.
- [2] Ennen H., Schneider J. — Proc. 13 Int. Conf. Def. Semicond. California, 1984, p. 115—127.
- [3] Касаткин В. А., Кесаманлы Ф. П., Мастеров В. Ф., Романов В. В., Саморуков Б. Е. Влияние примесей лантаноидов на свойства GaP. — Изв. АН СССР, Неорг. матер., 1980, т. 16, в. 11, с. 1901—1905.
- [4] Podor B., Pfeifer J., Csontos L., Nador N., Deak F. — Phys. St. Sol. (a), 1983, v. 76, N 2, p. 695—704.
- [5] Siegel W., Kühnel G. — Phys. St. Sol. (a), 1984, v. 84, N 1, p. 251—262.
- [6] Hara T., Akasaki I. — J. Appl. Phys., 1968, v. 39, N 2, p. 285—290.
- [7] Баранский П. И., Беляев А. Е., Городничий О. П., Сытвина Н. Г., Томчук П. М. О механизмах рассеяния в фосфиде галлия. — ФТП, 1979, т. 13, в. 3, с. 488—493.
- [8] Беляев А. Е., Городничий О. П., Пидлисный Е. В. Величина отношения констант деформационного потенциала в кристаллах *n*-GaP. — ДАН УССР, сер. А, 1981, № 7, с. 54—57.

Институт полупроводников
АН УССР
Киев

Получено 27.04.1987
Принято к печати 2.06.1987

ФТП, том 22, вып. 1, 1988

**ПРИРОДА ПРИМЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ,
ОБРАЗУЕМЫХ ПЕРЕХОДНЫМИ МЕТАЛЛАМИ
(ЖЕЛЕЗОМ И ЕВРОПИЕМ)
В АМОРФНОМ ГИДРИРОВАННОМ КРЕМНИИ**

Регель А. Р., Серегин П. П., Мездрогина М. М., Насредин Ф. С.,
Аблова М. С., Абдуманов У. Ж.

Проблема легирования аморфного гидрированного кремния *a*-Si(H) давно привлекает внимание исследователей [1]. Основным методом, приводящим к эффективному изменению электрических свойств *a*-Si(H), является легирование из газовой фазы [2]. В настоящей работе приводятся результаты по легированию *a*-Si(H) переходными металлами (железом, европием) методом распыления.

Образцы были получены высокочастотным совместным распылением монокристаллической кремниевой мишени и мишени из металлического железа (или европия) в газовой смеси гелия, аргона и силана [3]. Температура подложки была 250, 300 и 380 °С. Концентрация металла составляла 0.1 ат%, концентрация водорода — 15 ат%. Темновая проводимость σ_t и фотопроводимость σ_f определялись в планарной геометрии. Фотопроводимость измерялась при 295 К при освещении светом с интенсивностью $4 \cdot 10^{17}$ фот/см²·с и длиной волны 0.65 мкм. Положение края оптического поглощения определялось при 295 К. Мессбауэровские спектры примесных атомов ⁵⁷Fe и ¹⁵¹Eu измерялись при 295 и 80 К с источниками ⁵⁷Co в палладии и ¹⁵¹Sm₂O₃.

Параметры электропроводности *a*-Si(H)

Состав образцов	$T_s, ^\circ\text{C}$	$E_s, \text{эВ}$	$\text{ОМ}^{-1} \cdot \text{СМ}^{-1}$	$\text{ОМ}^{-1} \cdot \text{СМ}^{-1}$
<i>a</i> -Si(H)	380	0.58	280	$3.4 \cdot 10^{-8}$
<i>a</i> -Si(H)+Fe	380	0.80	320	$1.9 \cdot 10^{-11}$
<i>a</i> -Si(H)+Eu	380	0.20	0.56	$5.0 \cdot 10^{-3}$
<i>a</i> -Si(H)	300	0.71	1300	$6.3 \cdot 10^{-10}$
<i>a</i> -Si(H)+Fe	300	0.69	89	$9.5 \cdot 10^{-11}$
<i>a</i> -Si(H)+Eu	300	0.56	320	$5.0 \cdot 10^{-7}$
<i>a</i> -Si(H)	250	0.70	180	$1.5 \cdot 10^{-10}$
<i>a</i> -Si(H)+Fe	250	0.69	200	$1.9 \cdot 10^{-10}$
<i>a</i> -Si(H)+Eu	250	0.68	1300	$1.0 \cdot 10^{-9}$

Все нелегированные образцы α -Si(H) обладали электронной проводимостью (знак термоэдс был отрицательным при комнатной температуре, абсолютное значение термоэдс ~ 200 мкВ/К), оптическая ширина запрещенной зоны была 1.70 ± 0.02 эВ, и, как видно из рис. 1, температурная зависимость электропроводности является линейной функцией в координатах $\lg \sigma - 1/T$ в интервале температур 100—500 К. Следовательно, проводимость для нелегированных образцов в выбранном температурном интервале осуществляется электронами на делокализованных состояниях, лежащих выше порога подвижности E_c , а энергия активации проводимости E_s определяется как $E_s = E_c - F$, где F — уровень Ферми. Параметры электропроводности и фотопроводимости существенным образом зависят от температуры подложки T_s (см. таблицу), причем изменение

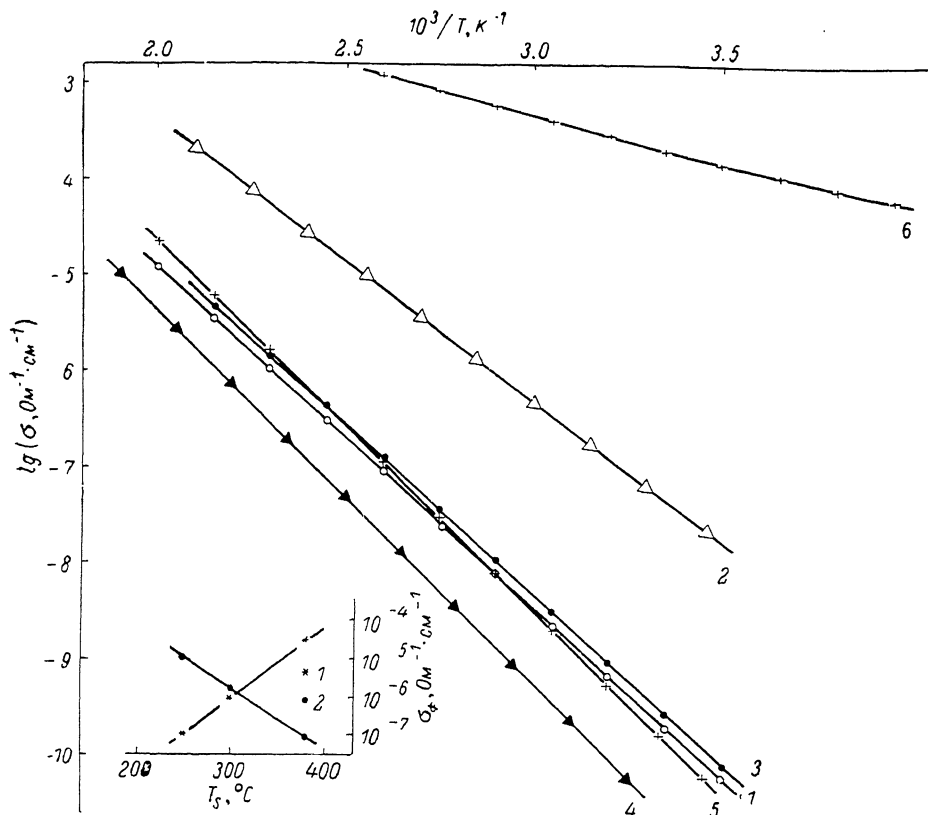


Рис. 1. Температурные зависимости электропроводности α -Si(H) (1, 2), α -Si(H)+Fe (3, 4) и α -Si(H)+Eu (5, 6).

Температура подложки, °С: 1, 3, 5 — 250; 2, 4, 6 — 380. На вставке — зависимость фотопроводимости от T_s для α -Si(H) (1) и α -Si(H)+Fe (2).

величин σ_t , σ_ϕ и E_s при увеличении T_s имеет тот же характер, что и для пленок α -Si(H), полученных разложением силана (см., например, [2]). Очевидно, как и в случае α -Si(H), полученного разложением силана, для исследованных нами пленок увеличение T_s ведет к уменьшению концентрации собственных дефектов и сдвигу уровня Ферми к E_c (для образца, полученного при $T_s = 380$ °С, $E_s = 0.58$ эВ).

При введении железа в α -Si(H) характер зависимостей меняется: величины σ_t и σ_ϕ при увеличении T_s уменьшаются, а E_s увеличивается (см. рис. 1 и таблицу), т. е. легирование α -Si(H) железом сдвигает уровень Ферми к середине запрещенной зоны. Особенно сильно эффект легирования проявляется для пленок, полученных при $T_s = 380$ °С ($E_s = 0.80$ эВ). Коэффициент термоэдс и оптическая ширина запрещенной зоны не зависят от легирования.

Структура мессбауэровских спектров ^{57}Fe зависит от температуры подложки. Для образцов, полученных при $T \leq 300$ °С, они представляют собой

квадрупольные дублеты (при 295 К изомерный сдвиг $\delta=0.20\pm 0.02$ мм/с, квадрупольное расщепление $\Delta=0.34\pm 0.03$ мм/с). Согласно [3], этот спектр отвечает ассоциатам «железо—вакансия». Для образцов, полученных при $T_s=380$ °С, наряду с указанным дублетом появляется дополнительный синглет, отвечающий изолированным атомам железа в состоянии Fe^{3+} ($\delta=0.35$ мм/с относительно α -Fe; рис. 2, а). Очевидно, эти центры железа ответственны за изменение элек-

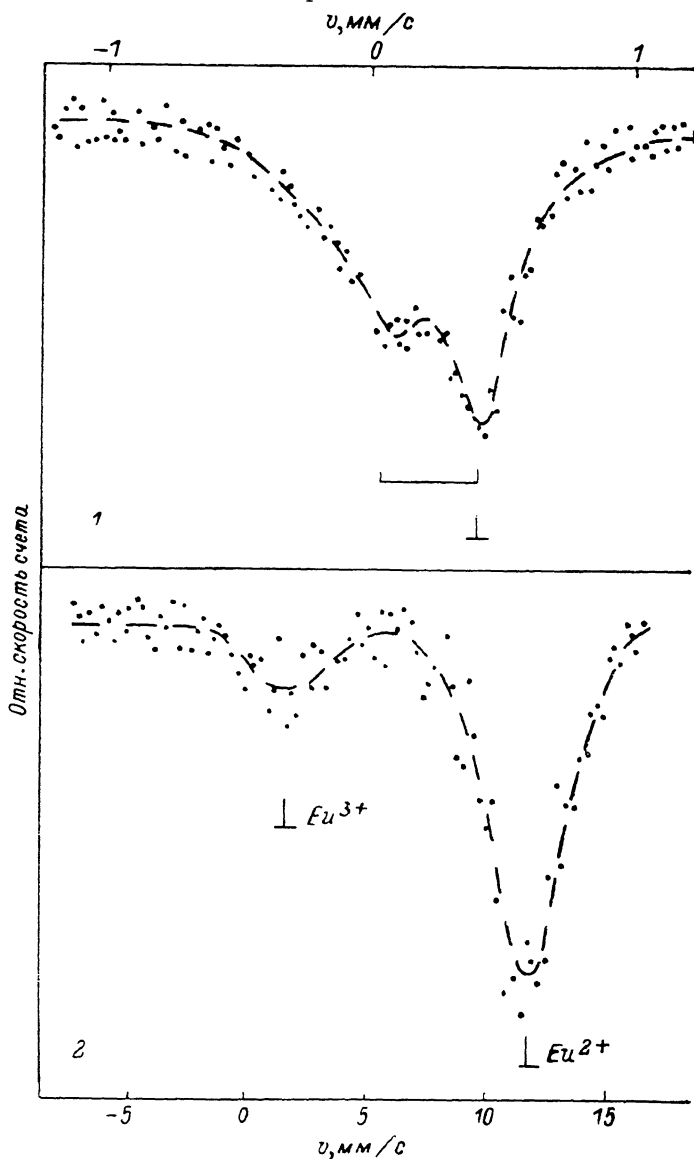


Рис. 2. Мессбауэровские спектры примесных атомов ^{57}Fe (1) и ^{151}Eu (2) в α -Si(H), полученном при $T_s=380$ °С.

Для спектра ^{57}Fe показано разложение на квадрупольный дублет и одиночную линию.

тропроводности легированного α -Si(H). При $T_s \leq 300$ °С концентрация вакансий превышает концентрацию железа и практически все примесные атомы оказываются связанными в электрически неактивные комплексы «железо—вакансия». При $T_s=380$ °С концентрация вакансий понижается и значительная часть атомов железа [по интенсивности мессбауэровского спектра $(1\div 2) \cdot 10^{19}$ см $^{-3}$] находится в электрически активном состоянии.

Воздействие примеси железа на электрические свойства α -Si(H) заключается в том, что изолированные атомы железа образуют в цепи подвижности полосу акцепторных уровней. Синглет Fe^{3+} в мессбауэровском спектре принадлежит

нейтральному состоянию акцепторного центра железа. Отсутствие в спектре линии Fe^{2+} , которая должна соответствовать ионизованному состоянию центра, свидетельствует о малой степени заполнения акцепторной полосы, т. е. о том, что уровень Ферми находится в ее нижней части. Это соответствует малой по сравнению с концентрацией акцепторных центров железа плотности состояний в зазоре между положениями F в легированном и нелегированном образцах. Уровень Ферми в легированных железом образцах, полученных при $T_s = 380^\circ C$, по-видимому, привязан к акцепторной полосе железа, а значение $E_s = 0.80$ эВ указывает на положение этой полосы относительно E_c . Однако эта величина может оказаться верхней оценкой для $E_c - E_{Fe}$ (E_{Fe} — положение полосы железа), так как центры железа в основном нейтральны и F может быть зафиксирован ниже полосы железа. Центры железа могут, видимо, выступать и как центры рекомбинации, что уменьшает фотопроводимость легированного материала (рис. 1).

В отличие от железа примесные атомы европия увеличивают электропроводность a -Si(H), но легирующий эффект, как и для железа, возрастает при увеличении T_s (см. рис. 1 и таблицу). Коэффициент термоэдс и оптическая ширина запрещенной зоны не зависят от легирования. Все это означает, что введение европия в a -Si(H) сдвигает уровень Ферми к E_c (для образца, полученного при $T_s = 380^\circ C$, $E_s = 0.25$ эВ). Действие примеси европия можно объяснить образованием в щели подвижности a -Si(H) полосы донорных уровней, электроны с которых заселяют нижележащие пустые состояния и поднимают уровень Ферми. Эффективность легирования в такой модели должна возрастать при уменьшении концентрации собственных дефектов, что и проявляется в зависимости F от температуры подложки в легированных европием образцах (см. таблицу).

Мессбауэровские спектры ^{151}Eu в a -Si(H) (рис. 2, б) состоят из двух линий, отвечающих Eu^{2+} ($\delta = -11.7$ мм/с) и Eu^{3+} ($\delta = -1.7$ мм/с, оба сдвига относительно Eu_2O_3). Эти линии относятся к нейтральному и ионизованному состояниям донорного центра европия соответственно. В образовании химических связей участвуют два $6s$ -электрона, а один из $4f$ -электронов европия играет роль донорного электрона.

Таким образом, железо и европий образуют в a -Si(H) электрически активные центры, нейтральное состояние которых соответствует ионам с полузаполненной оболочкой $3d^5$ для железа и $4f^7$ для европия. Различный характер (акцепторный или донорный) электрической активности центров железа и европия, по-видимому, следует связывать с различием свойств полузаполненных оболочек $3d$ и $4f$ этих элементов.

Л и т е р а т у р а

- [1] Аморфные полупроводники / Под ред. М. Бродски. М., 1982. 419 с.
- [2] Hydrogen amorphous silicon Electronic and transport properties / Ed. by J. Pankove. N. Y.—London, 1984. 437 p.
- [3] Насредин Ф. С., Мездрогина М. М., Подхалюзин В. П., Сергеев П. П. Мессбауэровское исследование примесных атомов железа в аморфном кремнии. — ФТТ, 1986, т. 28, в. 8, с. 2543—2546.

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

Получено 18.05.1987
Принято к печати 2.06.1987

ФТП, том 22, вып. 1, 1988

О МЕХАНИЗМЕ ДИФФУЗИИ БОРА В КАРБИДЕ КРЕМНИЯ

Константинов А. О.

Диффузия бора является одним из основных методов создания p - n -переходов на карбиде кремния и исследовалась в большом количестве экспериментальных работ [1-6]. В этих работах был установлен ряд аномальных особен-