

ДИФфуЗИЯ ИНДИЯ ПО ОДИНОЧНЫМ МЕЖФАЗНЫМ ГРАНИЦАМ КРУЧЕНИЯ $\langle 001 \rangle$ Sn—Ge

Б. Б. Страумал, Б. С. Бокштейн, Л. М. Клиндер,
Л. С. Швиндлерман

Впервые экспериментально исследована диффузия по одиночным межфазным границам (МФГ) в бикристаллах (границы кручения $\langle 001 \rangle$ Sn—Ge в интервале углов $0-45^\circ$ с шагом по углу $1.5-2^\circ$). Диффузия индия по МФГ изучалась методом микро-рентгеноспектрального анализа. Максимумы на ориентационных зависимостях диффузионной проницаемости, энергии активации и предэкспоненциального множителя пограничной диффузии соответствуют положениям специальных межфазных границ. Впервые наблюдалась более высокая по сравнению с границами общего типа диффузионная проницаемость специальных границ. Этот факт объясняется тем, что температуры диффузионных отжига лежат выше температуры компенсации. Измерены параметры объемной диффузии индия в олове.

Успехи, достигнутые в изучении границ зерен в последнее время, в основном связаны с использованием одиночных точно аттестованных границ в бикристаллах. Скудность данных о свойствах межфазных внутренних границ раздела в кристаллах (МФГ) связана с тем, что исследова-

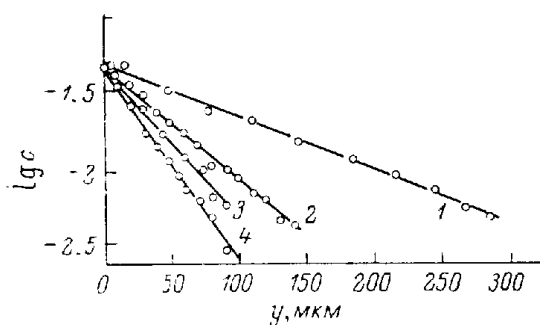


Рис. 1. Зависимости концентрации индия вблизи межфазной границы $c|_{x=0}$ от глубины y .

$T=160^\circ\text{C}$, $t=145$ час. Угол разориентации, град: 1 — 1, 2 — 9, 3 — 30, 4 — 38.

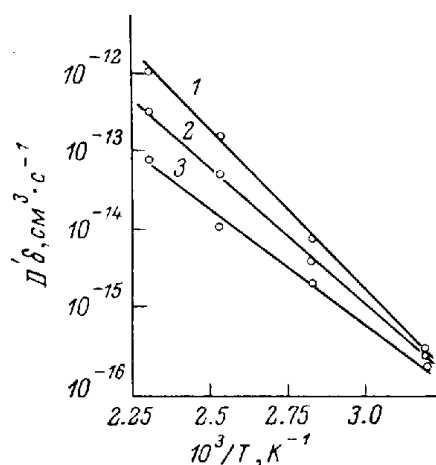


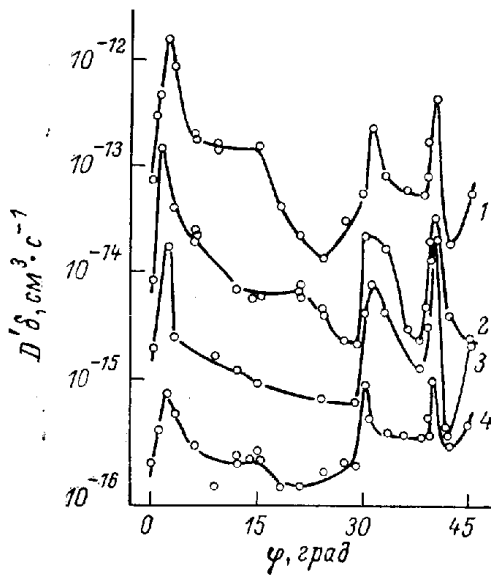
Рис. 2. Температурные зависимости диффузионной проницаемости $D'\delta$.

Угол разориентации, град: 1 — 2, 2 — 6, 3 — 0.

ния проводились исключительно на поликристаллах, а существенных успехов в изучении МФГ можно добиться, по нашему мнению, лишь при исследовании одиночных межфазных границ в бикристаллах с заданными кристаллографическими характеристиками.

В предыдущей работе [1] нами была исследована ориентационная зависимость поверхностного натяжения межфазных границ кручения $\langle 001 \rangle$ в системе Sn—Ge, полученная на бикристаллических образцах.

В настоящей работе на этих же образцах была изучена диффузия индия. Индий, растворимость которого в олове составляет $\sim 6\%$ и слабо меняется с температурой, наносился на поверхность образцов электролитически. Диффузионный профиль определялся с помощью микрорентгено-



спектрального анализа при перемещении электронного зонда перпендикулярно межфазной границе. Профиль асимметричен, так как коэффициент диффузии индия в германии при температурах опытов намного ниже, чем в олове. Диффузионная проницаемость (произведение коэффициента диффузии индия по межфазной границе D' на ширину границы δ) определялась по модели Фишера [2]. При этом учитывалось, что диф-

Рис. 3. Ориентационные зависимости диффузионной проницаемости $D'\delta$.

$T, ^\circ\text{C}$: 1 — 160, 2 — 120, 3 — 80, 4 — 40. t , час.: 1 — 144, 2 — 362, 3 — 290, 4 — 1366.

фузионным потоком атомов индия с межфазной границы в объем германия можно пренебречь [3]. Тогда величина $D'\delta$ определяется из выражения

$$c = c_0 \exp \left[-y \left(\frac{D}{\pi t} \right)^{1/4} (D'\delta)^{-1/2} \right] \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right], \quad (1)$$

где D — коэффициент объемной диффузии In в Sn, t — время отжига, c_0 — предел растворимости, c — концентрация индия начало координ-

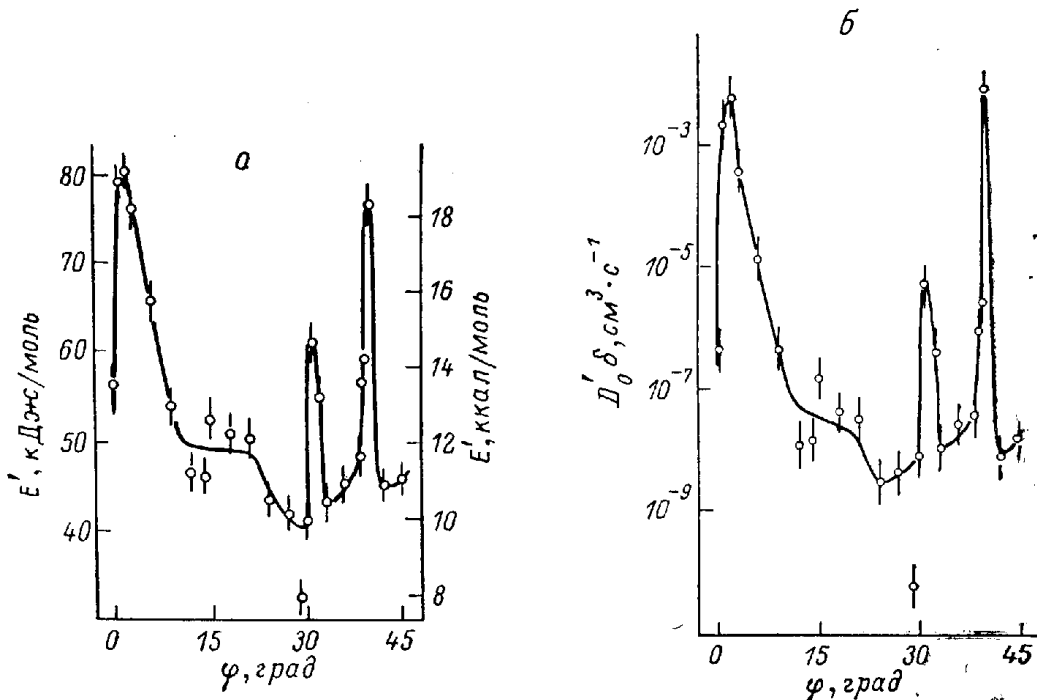


Рис. 4. Ориентационная зависимость энергии активации E' (а) и предэкспоненциального множителя $D'\delta$ (б) диффузии индия по межфазным границам $\langle 001 \rangle$.

нат помещено в месте пересечения межфазной границы с поверхностью, ось x параллельна поверхности, ось y — межфазной границе). Диффузия происходит из источника постоянной концентрации. В наших экспериментах концентрационные кривые хорошо спрямляются в координатах $\ln(c/c_0) - y$ в интервале концентраций $0.3 \leq c/c_0 \leq 1$ (рис. 1). Это,

как показывает анализ Ле—Клера [4], позволяет применять решение Фишера. Определение коэффициента пограничной диффузии осложнялось диффузионным ростом в приграничной области клина промежуточной γ -фазы состава Sn—(9—15 ат.%) In. Было показано [5], что при $y > y_0$, т. е. за пределами клина γ -фазы (y_0 — глубина клина γ -фазы) можно пользоваться решением (1).

Коэффициент объемной диффузии In в Sn определялся на тех же образцах, что и произведение $D'\delta$, при тех же температурах отжига (160, 120, 110, 80 и 40° С). Найденные значения энергии активации и предэкспоненциального множителя объемной диффузии In в Sn (12.2 ± 0.1 ккал/моль и $2.2 \pm 1 \cdot 10^{-6}$ см²/с) сильно отличаются от значений, определенных в ра-

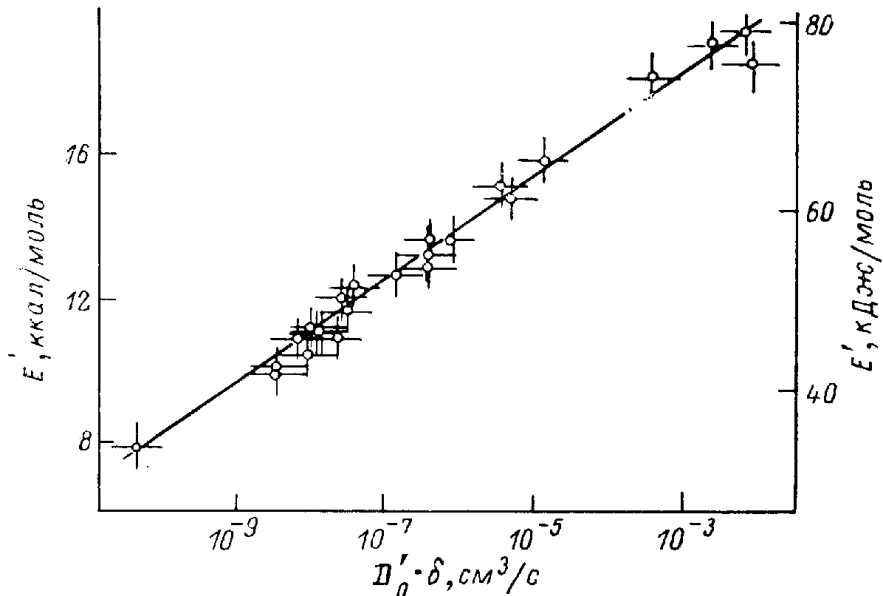


Рис. 5. Зависимость энергии активации E' от логарифма предэкспоненциального множителя $D'\delta$ («компенсационный эффект»).

боте [6] при температурах 180—221° С ($E=25.6 \pm 0.5$ ккал/моль, $D_0=12.2 \pm 2.5$ см²/с). Совпадение имеет место лишь для температуры 160° С.

По температурной зависимости произведения $D'\delta$ (рис. 2) определялась энергия активации E' диффузии по межфазным границам. Ориентационные зависимости произведения $D'\delta$ (рис. 3) немонотонны, причем максимумы отвечают углам 2, 31, и 40°. Положения максимумов $D'\delta$ не зависят от температуры и совпадают с положениями минимумов на ориентационной зависимости поверхностного натяжения, полученной на тех же границах [1].

Поскольку такие минимумы соответствуют специальным межфазным границам [2], то следует считать, что специальные границы кручения $\langle 001 \rangle$ Sn—Ge обладают более высокой диффузионной проницаемостью, чем границы, отвечающие углам разворота, далеким от специальных. Между тем до настоящего времени считалось, что специальные границы должны обладать меньшей диффузионной проницаемостью (из-за своего более высокого структурного совершенства). Такой вывод основывался на экспериментах по диффузии по границам зерен [7-9].

Специальным МФГ отвечают и наибольшие значения энергии активации E' и предэкспоненциального множителя $D'_0\delta$ (рис. 4, а, б). Аналогичный вид ориентационных зависимостей E' и $D'_0\delta$ наблюдался и при диффузии по границам зерен [7-9]. Таким образом, отличительной особенностью специальных внутренних границ раздела (как границ зерен, так и границ фаз) является высокая величина энергии активации и предэкспоненциального множителя пограничной диффузии. В то же время величина диффузионной проницаемости специальных границ может быть как выше, так и ниже проницаемости границ общего типа.

Наличие линейной зависимости между энергией активации и логарифмом предэкспоненциального множителя проницаемости («компенсационный эффект», рис. 5) свидетельствует о том, что активационные прямые $\ln D'\delta - T^{-1}$ (рис. 2) для всех границ пересекаются в одной точке при температуре компенсации T_c . В нашем случае $T_c \approx 27^\circ \text{C}$. Отметим, что компенсационный эффект наблюдался и при диффузии по границам зерен, однако

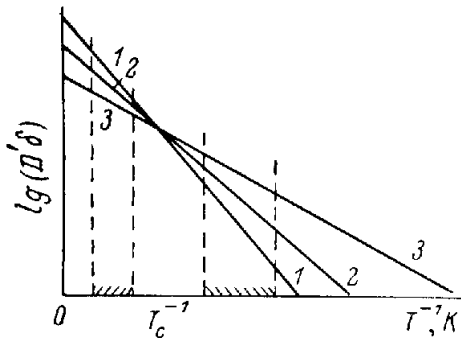


Рис. 6. Расположение температурных областей исследования диффузии по межфазным границам ($T > T_c$) и по границам зерен ($T < T_c$) по отношению к точке компенсации (схематически).

1-3 — $E'_1 > E'_2 > E'_3$, $D'_{01} > D'_{02} > D'_{03}$. При $T^{-1} < T_c^{-1}$ $D'_1 > D'_2 > D'_3$ при $T^{-1} > T_c^{-1}$ $D'_1 < D'_2 < D'_3$.

при диффузии цинка по границам зерен в алюминии [7] $T_c \approx 450^\circ \text{C}$. Указанное различие в характере ориентационных зависимостей для диффузии по границам зерен и границам фаз (максимумы произведения $\lambda'\delta$ на специальных границах фаз и минимумы — на специальных границах зерен) связано с положением температуры компенсации по отношению к исследованному температурному интервалу. Из схемы (рис. 6) видно, что выше точки компенсации специальные границы будут обладать и более высокой диффузионной проницаемостью, что и наблюдалось в наших опытах.

Л и т е р а т у р а

- [1] Б. С. Бокштейн, Л. М. Клиггер, Б. Б. Страумал, Л. С. Швиндлерман. ФТТ, 23, 202, 1981.
- [2] J. C. Fisher. T. Appl. Phys., 22, 74, 1951.
- [3] A. Bondy, P. Regnier, V. Levy. Scripta Met., 5, 345, 1971.
- [4] A. D. Le Clair. Brit. J. Appl. Phys., 14, 351, 1963.
- [5] Л. М. Клиггер, И. Р. Когай, Б. Б. Страумал. ФММ, 53, № 4, 1982.
- [6] A. Sawatzky. J. Appl. Phys., 29, 1303, 1958.
- [7] А. Н. Алешин, Б. С. Бокштейн, А. Л. Петелин, Л. С. Швиндлерман. Металлофизика, 2, 82, 1980.
- [8] A. N. Aleshin, V. Yu. Aristov, B. S. Bokshstein, L. S. Shvindlerman. Phys. St. Sol. (a), 45, 359, 1978.
- [9] А. Н. Алешин, Б. С. Бокштейн, Л. С. Швиндлерман. ФТТ, 19, 3511, 1977.

Институт физики твердого тела АН СССР
Черноголовка
Московская область
Ногинский район

Поступило в Редакцию
13 мая 1981 г.
В окончательной редакции
29 ноября 1981 г.