

Х. КОППЕЛ

## О СТРУКТУРЕ СПЛАВНЫХ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ В СИСТЕМАХ С ВЫРОЖДЕННОЙ ЭВТЕКТИКОЙ

### Введение

При изготовлении сплавных гетеропереходов, как правило, образуются многослойные структуры. Однако, кроме данных о слоистости структуры гетеропереходов GaAs—Ge [1–3], имеются сообщения о резких сплавных гетеропереходах GaAs—GaSb без слоистой структуры [4]. В названных работах указано также на связь строения образующихся структур как с характером взаимодействия компонентов в соответствующих квазибинарных системах, так и с условиями получения гетероперехода. В [3] на основе экспериментальных данных описан процесс образования слоистой структуры GaAs—Ge при контактном сплавлении. В настоящее время основным методом изготовления гетеропереходов является жидкостная эпитаксия, которая благодаря хорошей управляемости привела к получению качественных многослойных эпитаксиальных структур, а также полупроводниковых приборов на их основе [4–6]. Вероятно, использование физико-химического принципа рассмотрения процессов эпитаксии [7–10] позволяет также повысить управляемость процесса получения сплавных гетеропереходов.

В настоящей статье, исходя из представления о процессе образования сплавных гетеропереходов как о кристаллизации, протекающей в сильно неравновесных условиях, качественно обсуждается зависимость строения слоистых структур, образующихся при сплавных гетеропереходах, от температурных условий и времени в случае, если компоненты образуют систему с вырожденной эвтектикой. Приведены слоистые структуры, образующиеся в различных условиях. Рассматриваются только процессы, протекающие в расплавленной зоне.

### Общие замечания

Исходим из следующих общих предположений:

в момент начала кристаллизации присутствует по крайней мере одна твердая фаза;

равновесие в расплаве и далее во всей системе является граничным случаем и достигается при достаточном времени контакта твердой фазы с расплавом;

процессы происходят в небольшом объеме, где отсутствует конвекция, и изменение состава расплава происходит путем диффузии;

скорость перемещения фронтов кристаллизации достаточно большая для того, чтобы достигнутое распределение концентраций перед началом кристаллизации в расплаве не успело заметно измениться;



заметная диффузия перед фронтом кристаллизации равносильна увеличению времени контакта расплава с твердым компонентом при исходной температуре;

первые стадии кристаллизации происходят в условиях разделительной диффузии;

более поздние стадии кристаллизации могут происходить в условиях неполной разделительной диффузии или бездиффузионной кристаллизации.

### Методика рассмотрения вопроса

Пусть имеем два кристаллических вещества —  $A$  и более тугоплавкое  $B$ . Приведем их в механический контакт. Повышение температуры такой системы выше некоторого уровня вызывает появление расплавленной зоны, ограниченной с одной или с двух сторон нерасплавленным исходным веществом.

В зоне расплава при постоянной температуре в присутствии твердого вещества  $B$  в объеме неравновесного расплава, как и в случае концентрым веществом  $B$  ( $\tau_0=0$ ) происходят растворение последнего и диффузия его в направлении  $A$ . Из рис. 1, *a* видно упрощенное распределение растворенного вещества  $B$  вдоль перпендикуляра к границе раздела расплава и твердого вещества  $B(L|B)$  в разные моменты времени  $\tau$ . Концентрация  $C_{BT}$  у границы  $L|B$  соответствует величине растворимости вещества  $B$  в расплавленном веществе  $A$  при данной температуре  $T$ . В момент  $\tau_2=\tau_{ab}$  фронт диффузии вещества  $B$  достигает внешней границы расплава ( $-|L$ ), а в момент  $\tau_4=\tau_{eq}$  концентрация вещества  $B$  по всему объему расплава достигает величины  $C_{BT}$ . Из-за неодинаковых концентраций вещества  $B$  в объеме неравновесного расплава, как и в случае концентрационного переохлаждения [1], каждому определенному расстоянию от границы  $L|B$  соответствуют свои температура ликвидуса и температура солидуса. На рис. 1, *б* показано схематическое распределение температур ликвидуса и солидуса по расплаву в моменты времени  $\tau$ , соответственно времени на рис. 1, *a*, если  $A$  и  $B$  образуют систему с вырожденной эвтектикой при допущении, что линии локальных температур ликвидуса и солидуса состоят из прямых участков. Кристаллизация начинается в точке расплава, где создается достаточное переохлаждение, т. е. тогда когда в этой точке температура понижается ниже линии локальных ликвидусов. Кристаллизация объема расплава заканчивается, когда температура в этой точке понижается ниже линии локальных солидусов. Если в какой-то точке расплава линии локальных ликвидусов и солидусов совпадают, кристаллизация происходит при одной определенной температуре.

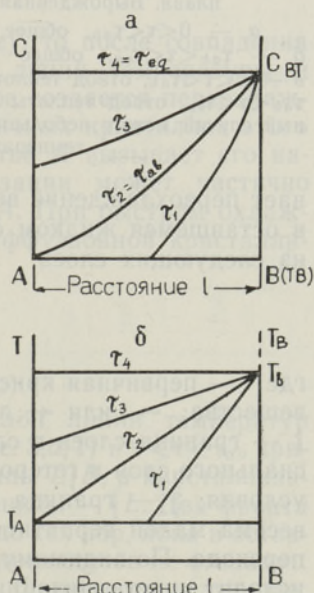


Рис. 1. Изменения в слое расплава вещества  $A$ , вызванные диффузией растворившегося вещества  $B$ .

*a* — Распределение концентрации вещества  $B$  в разные стадии диффузии. *б* — Распределение локальных температур ликвидуса и солидуса в разные стадии диффузии, если вещества  $A$  и  $B$  образуют систему с вырожденной эвтектикой.



## Строение слоистых структур

1. До начала кристаллизации нет градиента температуры ( $T_a = T_b$ ); имеется твердое вещество  $B$ .

1) Общее понижение температуры.

Если  $0 < \tau < \tau_{ab}$  (фронт диффузии вещества  $B$  не достигает внешней

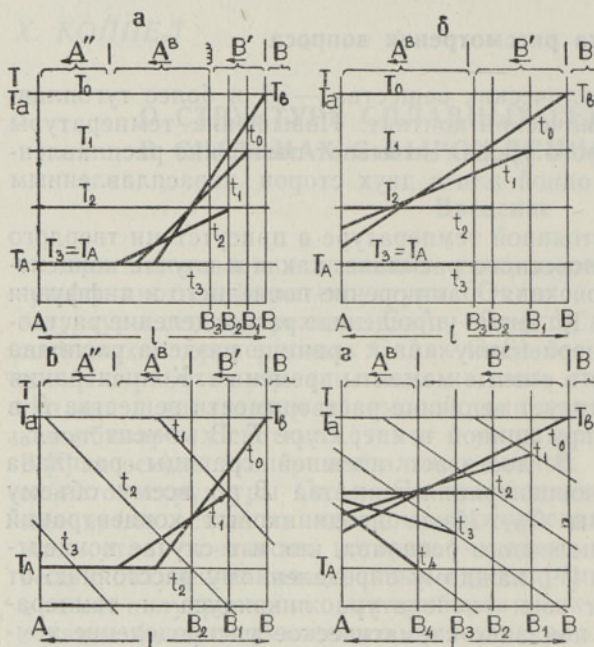


Рис. 2. Ход кристаллизации слоя неравновесного расплава. Вырожденная эвтектика.  $T_a = T_b$ .

$a$  —  $0 < \tau < \tau_{ab}$ , общее понижение температуры;  $б$  —  $\tau_{ab} < \tau < \tau_{eq}$ , общее понижение температуры;  $в$  —  $0 < \tau < \tau_{ab}$ , отвод теплоты в направлении  $B$ ;  $г$  —  $\tau_{ab} < \tau < \tau_{eq}$ , отвод теплоты в направлении  $B$ , граничный случай между небольшим и большим градиентом температуры.

вызывает переохлаждение вещества  $A$  и его одновременную кристаллизацию в оставшемся жидком слое от  $A$  до  $B_3$ . Получим структуру, состоящую из следующих слоев:

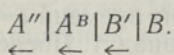
$$A'' \rightleftharpoons B' | B,$$

где  $'$  — первичная кристаллизация,  $''$  — затвердевание расплава одного вещества;  $\rightarrow$  или  $\leftarrow$  направление движения фронта кристаллизации;  $|$  — граница слоев в случае заметной вероятности образования эпитаксиального слоя и гетероперехода, если соблюдены остальные необходимые условия;  $\rightleftharpoons$  — граница слоев в случае отсутствия возможности или при весьма малой вероятности образования эпитаксиального слоя и гетероперехода. По-видимому, из-за ограниченной скорости диффузии, не происходит кристаллизации всего вещества  $B$  в виде слоя  $B'$ , часть его сме-

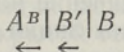
при общем понижении температуры (рис. 2,  $a$ ) отрезок линии локальных ликвидусов у границы  $L|B$  оказывается выше линии температур. В этой области создается переохлаждение вещества  $B$  и начинается его направленная кристаллизация от границы  $L|B$  в направлении  $A$ . В таких случаях имеется возможность образования автоэпитаксиального слоя. В момент  $t_1$ , когда  $T = T_1$ , фронт кристаллизации находится у  $B_1$ . Уменьшение содержания вещества  $B$  в расплаве при кристаллизации и некоторая диффузия его в направлении  $A$  приводят к уменьшению наклона линии локальных ликвидусов. В момент  $t_3$ , когда  $T_3 = T_A$  ( $T_A$  — температура плавления вещества  $A$ ), растворенное вещество  $B$  будет израсходовано. Дальнейшее охлаждение вызы-



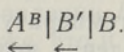
шивается с веществом  $A$  в слое  $A''$ , а близость фронта твердого вещества  $B$  обуславливает направленную кристаллизацию слоев  $A$  и структура выглядит следующим образом:



Если  $\tau_{ab} < \tau < \tau_{eq}$  (рис. 2,б), первый этап кристаллизации происходит так же, как и в предыдущем случае. Когда наклон линии локальных ликвидусов приближается к нулю, дальнейшее охлаждение создает одновременно во всем жидком слое переохлаждение вещества  $B$  и затем при  $T < T_A$  — вещества  $A$ . В случае умеренных скоростей охлаждения происходит сначала выделение первичных кристаллов вещества  $B$ , а затем затвердевание вещества  $A$ . Возможно, что при больших скоростях охлаждения происходит «бездиффузионная» кристаллизация этого слоя [3]. Получим структуру:

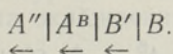


Если  $\tau_{eq} < \tau < \tau_{\infty}$ , при охлаждении во всем расплаве создается переохлаждение вещества  $B$ , а затем вещества  $A$ . Благодаря более низкой энергии зарождения происходит рост слоя  $B'$  на имеющейся поверхности исходного вещества  $B$  и несколько позже начинается кристаллизация в объеме расплава. Структура имеет вид:

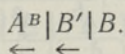


2) Отвод теплоты в направлении  $B$ , небольшой градиент температуры.

Если  $0 < \tau < \tau_{ab}$  (рис. 2,в), после направленной кристаллизации слоя  $B'$ , в результате направленного переохлаждения происходит не одновременная кристаллизация слоя  $A''$ , как при общем понижении температуры, а направленная кристаллизация его. Учитывая и неполную разделительную диффузию, можно записать:



Если  $\tau_{ab} < \tau < \tau_{eq}$ , а также  $\tau_{eq} < \tau < \infty$  (рис. 2,г), то после совпадения вследствие кристаллизации слоя  $B'$  наклонов линий температуры и локальных ликвидусов в оставшемся жидком слое создается переохлаждение вещества  $B$  и начинается выделение первичных кристаллов этого вещества. Направленное переохлаждение вещества  $A$  вызывает его направленную кристаллизацию. Фронт кристаллизации может частично вытеснять первичные кристаллы в направлении  $A$ . При быстром охлаждении в этом слое возможно прохождение бездиффузионной кристаллизации. В таком случае структура имеет вид:



3) Отвод теплоты в направлении  $A$  (рис. 3,а).

При небольшом градиенте температур (наклон линии температур меньше наклона линии локальных ликвидусов, рис. 3,а, I) и  $0 < \tau < \tau_{ab}$  кристаллизация растворенного  $B$  начинается у границы  $L|B$ , а кристаллизация расплавленного  $A$  начинается со стороны границы —  $|L$ . Два фронта кристаллизации движутся навстречу друг другу до тех пор, пока в оставшемся расплаве линии температур и локальных ликвидусов не совпадут. После этого начинается кристаллизация слоя  $A^B$ . Структура следующая:



$$A'' \xrightarrow{\rightarrow} A^B \xleftarrow{\leftarrow} B' | B.$$

Если  $\tau_{ab} < \tau < \tau_{eq}$  (рис. 3,б), фронт кристаллизации слоя  $B'$  смещается в направлении  $A$ , пока в момент времени  $t = t_2$  наклоны линий температур и локальных ликвидусов не совпадут. После этого в оставшемся слое расплава создается переохлаждение вещества  $B$ . При  $t = t_3$  линия температур пересекает линию локальных солидусов и от внешней границы расплава идет переохлаждение вещества  $A$ . Структура имеет вид:

$$A^B \xrightarrow{\rightarrow} B' | B.$$

Если  $\tau_{eq} < \tau < \infty$  (рис. 3,в), первичная направленная кристаллизация вещества  $B$  начинается у внешней границы расплава и фронт кристаллизации перемещается в направлении  $B$ . В этом случае кристаллизация вещества  $B$  обуславливает увеличение наклона линии локальных ликвидусов. В момент  $t_2$ , когда наклоны линий температур и локальных ликвидусов совпадут, создается переохлаждение вещества  $B$ , а в момент  $t_3$  — направленное переохлаждение вещества  $A$ . Учитывая обстоятельство, что переохлаждение у границы  $L|B$  вызывает образование слоя  $B'$ , можно записать:

$$B' \xrightarrow{\rightarrow} A^B \xleftarrow{\leftarrow} B' | B.$$

В случае резкого градиента температуры (рис. 3,а, II) и при  $0 < \tau < \tau_{ab}$  (рис. 3,г) создается переохлаждение вещества  $B$  сначала в месте расплава, где концентрация его минимальна. Так как здесь кристаллизация вещества  $B$  в направлении повышения температур линии локальных ликвидусов происходит при малых его концентрациях перед фронтом кристаллизации, причем первичная кристаллизация происходит за счет дальнейшего уменьшения его содержания в расплаве, а также так как вслед за переохлаждением вещества  $B$  создается переохлаждение вещества  $A$ ,

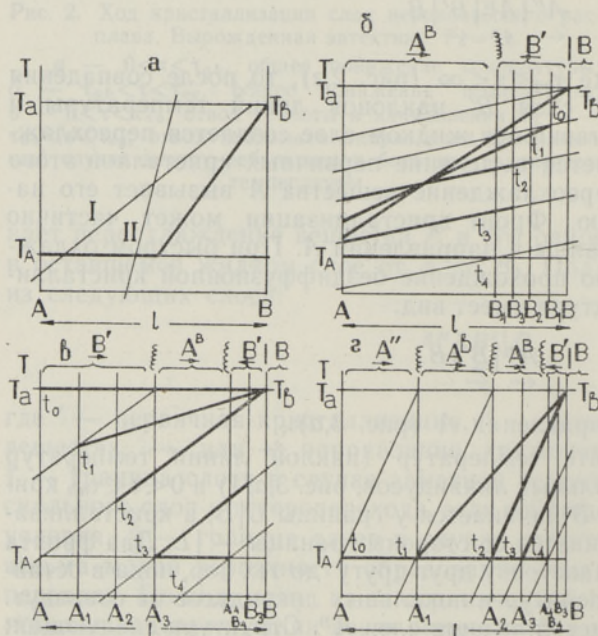


Рис. 3. Ход кристаллизации слоя неравновесного расплава. Вырожденная эвтектика.  $T_a = T_b$ .

а — Варианты наклона линии температур по отношению к наклону линии локальных ликвидусов. I — небольшой градиент температуры; II — большой градиент температуры. б —  $\tau_{ab} < \tau < \tau_{eq}$ , отвод теплоты в направлении  $A$ , небольшой градиент температуры; в —  $\tau_{eq} < \tau < \infty$ , отвод теплоты в направлении  $A$ ; г —  $0 < \tau < \tau_{ab}$ , отвод теплоты в направлении  $A$ , большой градиент температуры.

практически должна наблюдаться кристаллизация вещества  $A$ , содержащего некоторое количество вещества  $B$ . Содержание вещества  $B$  в полученном слое увеличивается в направлении движения фронта кристаллизации. При умеренных скоростях охлаждения, по-видимому, вещество  $B$  может содержаться в виде отдельных кристаллов или прослоек, а при больших скоростях охлаждения может иметь место бездиффузионная кристаллизация. Если обозначить описанный слой  $A^b$ , получим

$$\begin{matrix} A'' & \gtrsim & A^b & \gtrsim & A^B & \gtrsim & B. \\ \rightarrow & & \rightarrow & & \rightarrow & & \end{matrix}$$

Если  $\tau_{ab} < \tau < \infty$ , получим

$$\begin{matrix} B' & \gtrsim & A^b & \gtrsim & A^B & \gtrsim & B. \\ \rightarrow & & \rightarrow & & \rightarrow & & \end{matrix}$$

4) Возможен также отвод теплоты одновременно в направлениях  $A$  и  $B$ . По-видимому, такая ситуация может возникать часто и устойчиво сохраняться из-за выделения скрытой теплоты кристаллизации, особенно при наличии двух фронтов кристаллизации. Соответствующие структуры приведены в табл. 1.

2. Перед началом кристаллизации имеется градиент температуры  $T_a > T_b$  (рис. 4, а; табл. 2).

При общем понижении температуры, а также при отводе теплоты в направлении  $B$ , получим те же структуры, что и при  $T_a = T_b$  до кристаллизации и отводе теплоты в направлении  $B$ . При отводе теплоты в направлении  $A$  структуры будут теми же, что и при  $T_a = T_b$ .

3. До начала кристаллизации имеется градиент температуры  $T_a < T_b$ , имеется твердое вещество  $A$  (рис. 4, в; табл. 3).

Случаи  $0 < \tau < \tau_{ab}$  и  $\tau_{ab} < \tau < \tau_{eq}$  не отличаются принципиально от аналогичных случаев при  $T_a = T_b$  и  $T_a > T_b$ , кроме общего понижения температуры, когда наблюдается встречное движение двух фронтов кристаллизации. При  $\tau > \tau_{eq}$  из-за диффузии вещества  $B$  через слой расплава в сторону более низких температур имеет место направленная кристаллизация слоя  $B^D$  еще до начала охлаждения, и при достаточной длитель-

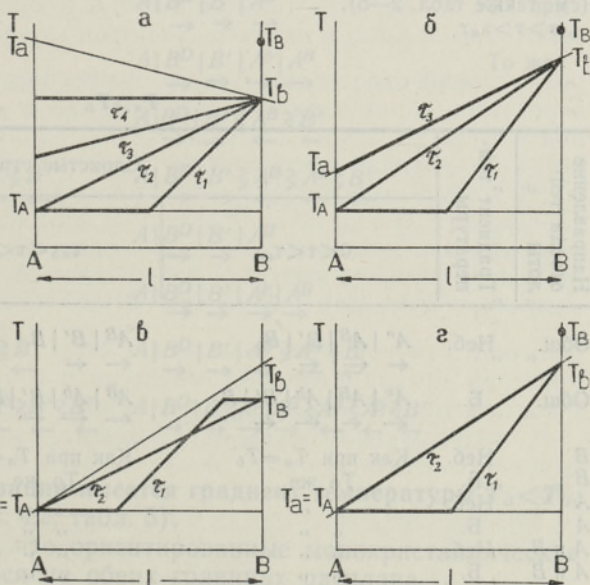


Рис. 4. Диаграммы локальных температур слоя расплава в случае системы с вырожденной эвктикой.

а —  $T_a > T_b$ , имеется твердое вещество  $A$ ; б —  $T_a < T_b$ , имеется твердое вещество  $B$ ; в —  $T_a < T_b$ , имеется твердое вещество  $A$ ; г —  $T_a < T_b$ , имеются твердые вещества  $A$  и  $B$ .



ности выдержки ( $\tau > \tau_{tot}$ ) системы при  $T > T_A$  слой исходного вещества  $B$  растворяется полностью.

4. До начала кристаллизации имеется градиент температуры  $T_a < T_b$ , имеется твердое вещество  $A$  (рис. 4,б; табл. 4).

Структуры, соответствующие  $0 < \tau < \tau_{ab}$ , приведены с предположением (условным), что фронты диффузии веществ  $A$  и  $B$  достигают границы расплава одновременно.

$$T_a = T_b$$

Таблица 1

Направление отвода теплоты	Градиент температуры	Слоистые структуры		
		$0 < \tau < \tau_{ab}$	$\tau_{ab} < \tau < \tau_{eq}$	$\tau_{eq} < \tau < \infty$
Общ.		$A''   A^B   B'   B$ ← ← ←	$A^B   B'   B$ ← ←	$A^B   B'   B$ ← ←
$B$	Неб.	$A''   A^B   B'   B$ ← ← ←	$A^B   B'   B$ ← ←	$A^B   B'   B$ ← ←
$B$	Б.	$A''   A^B   A^b   B'   B$ ← ← ← ←	$A^B   A^b   B'   B$ ← ← ←	$A^B   A^b   B'   B$ ← ← ←
$A$	Неб.	$A'' \gtrsim A^B \gtrsim B'   B$ → → → ←	$A^B \gtrsim B'   B$ → → ←	$B' \gtrsim A^B \gtrsim B'   B$ → → → ←
$A$	Б.	$A'' \gtrsim A^b \gtrsim A^B \gtrsim B'   B$ → → → → ←	$B' \gtrsim A^b \gtrsim A^B \gtrsim B'   B$ → → → → ←	$B' \gtrsim A^b \gtrsim A^B \gtrsim B'   B$ → → → → ←
$A$ и $B$	Неб.	$A'' \gtrsim A^B \gtrsim A^B   B'   B$ → → → ← ←	$A^B \gtrsim A^B   B'   B$ → → ← ←	$B' \gtrsim A^B \gtrsim A^B   B'   B$ → → → ← ←
$A$ и $B$	Б.	$A'' \gtrsim A^b \gtrsim A^B \gtrsim A^b   B'   B$ → → → → ← ← ←	$B' \gtrsim A^b \gtrsim A^B \gtrsim A^b   B'   B$ → → → → ← ← ←	$B' \gtrsim A^b \gtrsim A^B \gtrsim A^b   B'   B$ → → → → ← ← ←

Примечание. Общ. — общее охлаждение, неб. — небольшой, б. — большой (см. также табл. 2—5).

$$T_a > T_b$$

Таблица 2

Направление отвода теплоты	Градиент температуры	Слоистые структуры		
		$0 < \tau < \tau_{ab}$	$\tau_{ab} < \tau < \tau_{eq}$	$\tau_{eq} < \tau < \infty$
Общ.	Неб.	$A''   A^B   B'   B$ ← ← ←	$A^B   B'   B$ ← ←	$A^B   B'   B$ ← ←
Общ.	Б.	$A''   A^B   A^b   B'   B$ ← ← ← ←	$A^B   A^b   B'   B$ ← ← ←	$A^B   A^b   B'   B$ ← ← ←
$B$	Неб.	Как при $T_a = T_b$	Как при $T_a = T_b$	Как при $T_a = T_b$
$B$	Б.	То же	То же	То же
$A$	Неб.	" "	" "	" "
$A$	Б.	" "	" "	" "
$A$ и $B$	Неб.	" "	" "	" "
$A$ и $B$	Б.	" "	" "	" "

Таблица 5

 $T_a < T_b$ . Имеется твердая фаза В

Направление отвода теплоты	Градиент температуры	Слоистые структуры			
		$0 < \tau < \tau_{ab}$	$\tau_{ab} < \tau < \tau_{eq}$	$\tau_{eq} < \tau < \tau_{tot}$	$\tau_{tot} < \tau < \infty$
Общ.		$A'' \gtrsim A^B \gtrsim B'   B$ $\rightarrow \rightarrow \leftarrow$	$A^B \gtrsim B'   B$ $\rightarrow \leftarrow$	$B^D \gtrsim B' \gtrsim A^B \gtrsim B'   B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow$	$B^D \gtrsim B' \gtrsim A^B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow$
В	Неб.	Как при $T_a = T_b$	Как при $T_a = T_b$	$B^D \gtrsim B' \gtrsim A^B   B'   B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow$	$B^D \gtrsim B' \gtrsim A^B \gtrsim B'$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow$
В	Б.	То же	То же	$B^D \gtrsim B' \gtrsim A^B   A^b   B'   B$ $\rightarrow \rightarrow \leftarrow \leftarrow \leftarrow$	$B^D \gtrsim B' \gtrsim A^B \gtrsim A^b \gtrsim B'$ $\rightarrow \rightarrow \leftarrow \leftarrow \leftarrow$
А	Неб.	" "	" "	$B^D \gtrsim B' \gtrsim A^B \gtrsim B'   B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow$	$B^D \gtrsim B' \gtrsim A^B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow$
А	Б.	" "	" "	$B^D \gtrsim B' \gtrsim A^b \gtrsim A^B \gtrsim B'   B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow$	$B^D \gtrsim B' \gtrsim A^b \gtrsim A^B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow$
А и В	Неб.	" "	" "	$B^D \gtrsim B' \gtrsim A^B \gtrsim A^B   B'   B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow \leftarrow$	$B^D \gtrsim B' \gtrsim A^B \gtrsim A^B \gtrsim B'$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow \leftarrow$
А и В	Б.	" "	" "	$B^D \gtrsim B' \gtrsim A^b \gtrsim A^B \gtrsim A^b   B'   B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow \leftarrow \leftarrow$	$B^D \gtrsim B' \gtrsim A^b \gtrsim A^B \gtrsim A^b \gtrsim B'$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow \leftarrow \leftarrow$

Таблица 4

 $T_a < T_b$ . Имеется твердая фаза А

Направление отвода теплоты	Градиент температуры	Слоистые структуры		
		$0 < \tau < \tau_{ab}$	$\tau_{ab} < \tau < \tau_{eq}$	$\tau_{eq} < \tau < \infty$
Общ.	Неб.	$A   A''   A^B \gtrsim B' \gtrsim B''$ $\rightarrow \rightarrow \leftarrow \rightarrow$	$A   B^D   B'   A^B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow$	Как при $\tau_{ab} < \tau < \tau_{eq}$
Общ.	Б.	$A   A''   A^b   A^B \gtrsim B''$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow$	$A   B^D   B'   A^b   A^B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow$	То же
В	Неб.	$A \gtrsim A'' \gtrsim A^B \gtrsim B' \gtrsim B''$ $\leftarrow \leftarrow \leftarrow \leftarrow$	$A   B^D   B' \gtrsim A^B \gtrsim B'$ $\rightarrow \rightarrow \leftarrow \leftarrow$	" "
В	Б.	$A \gtrsim A'' \gtrsim A^b \gtrsim A^B \gtrsim B' \gtrsim B''$ $\leftarrow \leftarrow \leftarrow \leftarrow$	$A   B^D   B' \gtrsim A^b \gtrsim A^B \gtrsim B'$ $\rightarrow \rightarrow \leftarrow \leftarrow \leftarrow$	" "
А	Неб.	$A   A''   A^B \gtrsim B' \gtrsim B''$ $\rightarrow \rightarrow \leftarrow \rightarrow$	$A   B^D   B'   A^B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow$	" "
А	Б.	$A   A''   A^b   A^B \gtrsim B''$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow$	$A   B^D   B'   A^b   A^B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow$	" "
А и В	Неб.	$A   A''   A^B \gtrsim A^B \gtrsim B' \gtrsim B''$ $\rightarrow \rightarrow \leftarrow \leftarrow \leftarrow$	$A   B^D   B'   A^B \gtrsim A^B \gtrsim B'$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow \leftarrow$	" "
А и В	Б.	$A   A''   A^b   A^B \gtrsim A^B \gtrsim A^b \gtrsim B' \gtrsim B''$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow \leftarrow \leftarrow \leftarrow$	$A   B^D   B'   A^b   A^B \gtrsim A^b \gtrsim B'$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow \leftarrow \leftarrow$	" "

5. До начала кристаллизации имеется градиент температуры  $T_a < T_b$ , имеются твердые А и В (рис. 4,з; табл. 5).

Случай интересен и тем, что ориентированные монокристаллические затравки могут располагаться на обеих границах расплава.



$T_a < T_b$ . Имеются твердые фазы  $A$  и  $B$ 

Направление отвода теплоты	Градиент температуры	Слоистые структуры			
		$0 < \tau < \tau_{ab}$	$\tau_{ab} < \tau < \tau_{eq}$	$\tau_{eq} < \tau < \tau_{tot}$	$\tau_{tot} < \tau < \infty$
Общ.		$A A'' A^B \gtrsim B' B$ $\rightarrow \rightarrow \leftarrow$	$A B^D B' A^B \gtrsim B' B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow$	Как при $\tau_{ab} < \tau < \tau_{eq}$	$A B^D B' A^B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow$
$B$	Неб.	$A \gtrsim A'' A^B B' B$ $\leftarrow \leftarrow \leftarrow$	$A B^D B' \gtrsim A^B B' B$ $\rightarrow \rightarrow \leftarrow \leftarrow$	То же	$A B^D B' \gtrsim A^B \gtrsim B'$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow$
$B$	Б.	$A \gtrsim A'' A^B A^b B' B$ $\leftarrow \leftarrow \leftarrow \leftarrow$	$A B^D B' \gtrsim A^B A^b B' B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow \leftarrow$	„ „	$A B^D B' \gtrsim A^B \gtrsim A^b \gtrsim B'$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow \leftarrow$
$A$	Неб.	$A A'' A^B \gtrsim B' B$ $\rightarrow \rightarrow \leftarrow$	$A B^D B' A^B \gtrsim B' B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow$	„ „	$A B^D B' A^B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow$
$A$	Б.	$A A'' A^b A^B \gtrsim B' B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow$	$A B^D B' A^b A^B \gtrsim B' B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow$	„ „	$A B^D B' A^b A^B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow$
$A$ и $B$	Неб.	$A A'' A^B \gtrsim A^B B' B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow$	$A B^D B' A^B \gtrsim A^B B' B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow$	„ „	$A B^D B' A^B \gtrsim A^B \gtrsim B'$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow$
$A$ и $B$	Б.	$A A'' A^b A^B \gtrsim A^B A^b B' B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow \leftarrow$	$A B^D B' A^b A^B \gtrsim A^B A^b B' B$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow \leftarrow$	„ „	$A B^D B' A^b A^B \gtrsim A^B \gtrsim A^b \gtrsim B'$ $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow \leftarrow$

## Обсуждение результатов

Как видно из табл. 1—5, при образовании сплавляемыми компонентами системы с вырожденной эвтектикой строение многослойной структуры зависит как от наличия, направления и величины градиента температуры во время предварительной выдержки при  $T > T_A$  компонентов, приведенных в механический контакт перед охлаждением, и длительности выдержки, так и от направления отвода теплоты и величины градиента температуры при охлаждении, а также от скорости охлаждения. При  $T_a < T_b$ , наличии твердой фазы  $A$  и  $\tau > \tau_{ab}$  уже во время предварительной выдержки может образоваться гетеропереход типа  $A|B^D$ . Подбо-

ром условий охлаждения также можно получить слои веществ  $A$  и  $B$  с вероятным образованием гетероперехода во всех случаях предварительной выдержки, кроме случаев  $T_a < T_b$ , наличия твердой фазы  $A$ ,  $\tau < \tau_{ab}$  и  $T_a < T_b$ , наличия твердой фазы  $B$ ,  $\tau > \tau_{tot}$ . Так как некоторая растворимость компонентов в твердом состоянии практически всегда наблюдается, слои одного компонента  $A^b$ ,  $A^B$ ,  $B'$  и  $B^D$  состоят из твердых растворов с большим или меньшим содержанием второго компонента. При значительной растворимости вещества  $A$  в твердом  $B$  может наблюдаться резкое изменение состава и у перехода  $B'|B$ . Напомним, что в таком случае

величина изменения состава может быть отрегулирована подбором температуры предварительной выдержки в соответствии с ходом солидуса в этой части фазовой диаграммы системы.

Следует предположить, что на практике предпочтительно реализуются случаи, соответствующие более длительному времени выдержки до охлаждения.

При большой скорости диффузии растворенного вещества в расплаве, а также при очень медленном охлаждении (один крайний случай) реализуются структуры, соответствующие приближению времени выдержки до



охлаждения к бесконечности при небольшом градиенте температуры. При небольшой скорости диффузии в расплаве или очень быстром охлаждении (второй крайний случай), по-видимому, разделительная диффузия может происходить только в начале кристаллизации первого слоя около каждой имеющейся твердой фазы, а остальная масса расплава затвердевает путем бездиффузионной кристаллизации. Скорости охлаждения, лежащие между этими граничными случаями, по-видимому, обуславливают возникновение структур, соответствующих большим градиентам температуры (см. табл. 1—5).

В заключение можно сказать, что при разработке методик получения сплавных гетеропереходов и соответствующей аппаратуры в случае образования компонентами вырожденной эвтектики следует учитывать как наличие, направление и величину градиента температуры во время предварительной выдержки перед началом охлаждения и длительность выдержки, так и направление отвода теплоты и величину градиента температуры при охлаждении, а также скорость охлаждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Rediker R. H., Stopek S., Ward J., Solid-State Electron., 7, 621, 1964.
2. Mroczkowski R. S., Lavine M. C., Gatos H. C., Trans. AMS, 233, 456, 1965.
3. Чистяков Ю. Д., Матсон Э. А., ДАН, 177, 3, 643, 1967.
4. Алферов Ж. И., Андреев В. М., Корольков В. И., Портной Е. Л., Яковенко А. А., ФТП, 3, 930, 1969.
5. Алферов Ж. И., Андреев В. М., Мурыгин В. И., Стремин В. И., ФТП, 3, 1470, 1969.
6. Алферов Ж. И., Андреев В. М., Корольков В. И., Никитин В. Г., Яковенко А. А., ФТП, 4, 578, 1970.
7. Чистяков Ю. Д., Порошковая металлургия, 8 (68), 35, 1968.
8. Чистяков Ю. Д., Автореф. докт. дис., М., 1967.
9. Чистяков Ю. Д., Рост кристаллов, 8, 258, 1968.
10. Чистяков Ю. Д., Сб. науч. тр. по проблемам микроэлектроники. Эпитаксия, 4, 36, 1969.
11. Rutter J. W., Chalmers B., Canad. J. Phys., 31, 15, 1953.

Институт физики  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
22/I 1974

H. KOPPEL

#### SULANDATUD HETEROSIIRETE STRUKTUURIST KÕDUNUD EUTEKTIKUMIGA SÜSTEEMIDE KORRAL

Lähtudes seisukohast, et heterosiirete moodustumine sulandamise teel kujutab endast tugevasti mittetasakaalulistes tingimustes toimuvat kristallisatsiooni, on kvalitatiivselt vaadeldud tekkinud kihiliste struktuuride ehituse sõltuvust temperatuurigradiendi olemasolust, suunast ja suurusest eelneval kuumutamisel enne jahutamise algust, eelneva kuumutamise kestusest, soojuse äravoolu suunast ja temperatuurigradiendi suurusest jahutamise ajal ning jahutamise kiirusest, kui komponendid moodustavad kõdunud eutektikumiga süsteemi. On esitatud mitmesugustel tingimustel tekkivaid kihilisi struktuure.

H. KOPPEL

#### ON THE STRUCTURE OF ALLOYED HETEROJUNCTIONS IN THE CASE OF DEGENERATED EUTECTIC SYSTEMS

Supposing that the components form a degenerated eutectic system and treating the fabrication of alloyed heterojunctions as crystallisation at nonequilibrium conditions, the dependences of the layer structure on the value and direction of temperature gradient during alloying and cooling, the duration of alloying and the cooling rate are considered. The layer structures formed at various conditions are presented.