

УДК 621.315.592

## Взаимодействие между медью и сурьмой в твердом растворе на основе германия с образованием заряженного комплекса

© В.М. Глазов, А.Я. Потемкин

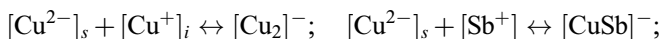
Московский государственный институт электронной техники (Технический университет),  
103498 Москва, Россия

(Получена 7 июля 1999 г. Принята к печати 22 октября 1999 г.)

Предложена схема взаимодействия между некоторыми легирующими элементами в твердых растворах на основе полупроводников, включающая реакцию образования заряженного комплекса при введении в раствор двухзарядных доноров или акцепторов. С использованием выражения для закона действующих масс реакций ионизации легирующих добавок и взаимодействия между ними, а также с учетом электронно-дырочного взаимодействия и условия электронейтральности полупроводника получены аналитические выражения зависимости растворимости доноров от содержания акцепторов, и наоборот. Полученные соотношения апробированы на примере системы  $\text{Ge-Cu-Sb}$ . Показано, что рассчитанные на основе развитой теории и экспериментальные значения растворимости хорошо согласуются между собой.

Ранее [1–4] нами была разработана теория образования заряженных комплексов при взаимодействии между легирующими элементами в твердом растворе на основе кремния. В настоящей работе дается анализ взаимодействия между медью и сурьмой в твердом растворе на основе германия с образованием заряженного комплекса.

Представленные в работах [1,5,6] экспериментальные данные позволяют сделать заключение о том, что при взаимодействии различно заряженных частиц возможно образование заряженных и нейтральных ассоциатов по схемам:

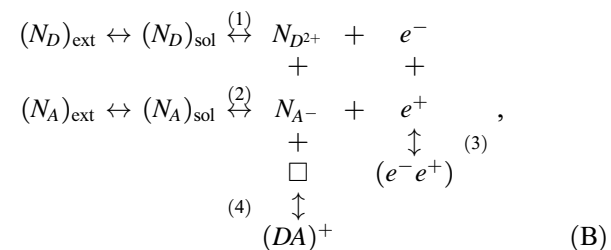
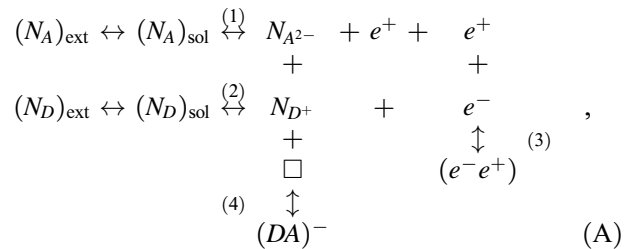


где  $[\text{Cu}^{2-}]_s$  и  $[\text{Cu}^+]_i$  — медь в узлах и междоузлиях соответственно.

Следует отметить, что процессы образования нейтральных комплексов  $[\text{Cu}_2\text{Sb}]^0$  и заряженных  $[\text{Cu}_2]^-$  обусловлены наличием межузельной меди, которой, согласно [5], почти на порядок меньше, чем меди, располагающейся в узлах кристаллической решетки. Поэтому решающим процессом донорно-акцепторного взаимодействия при сложном легировании германия медью и сурьмой является процесс образования заряженных комплексов  $[\text{CuSb}]^-$ . Очевидно, результатами остальных реакций можно пренебречь.

В связи с изложенным целесообразно на базе реально обоснованной модели взаимодействия между медью и сурьмой в германии рассмотреть в общем виде влияние образования заряженных донорно-акцепторных комплексов на совместную растворимость доноров и акцепторов в полупроводниках. При подходе к решению задачи воспользуемся общей методологией, обоснованной и развитой в работах Райсса с соавторами [7–9], а также в наших работах [10–13], и представим процессы ионизации и взаимодействия между заряженными частицами в виде следующих двух систем реакций, отвечающих

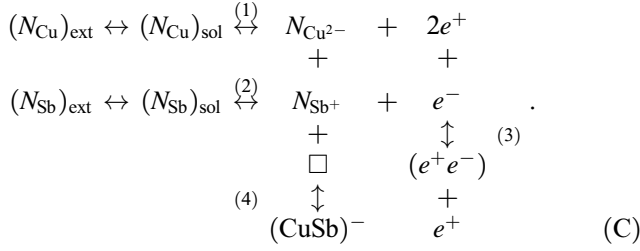
соответственно случаям легирования полупроводника двухзарядными акцепторами (A) и двухзарядными донорами (B):



где  $(N_A)_{\text{ext}}$  и  $(N_D)_{\text{ext}}$  — концентрации соответственно акцепторов и доноров во внешней фазе (например, в жидкой),  $(N_A)_{\text{sol}}$  и  $(N_D)_{\text{sol}}$  — концентрации соответственно акцепторов и доноров в твердом полупроводниковом растворе.

Реальность приведенных схем (A) и (B) подтверждается экспериментально, так как в полупроводниках  $\text{Ge}(\text{Si})$  при сложном легировании одновременно с образованием комплексов  $(DA)^-$  наблюдается преобладание дырочной проводимости и, наоборот, при наличии комплексов  $(DA)^+$  — преобладание электронной проводимости. Конкретизируем приведенные равновесия (A) и (B), сопровождающиеся образованием заряженных комплексов, применительно к конкретной системе  $\text{Ge-Cu-Sb}$ . Очевидно, в соответствии с данными о количественном состоянии растворимости межузельной меди и меди,

находящейся в узлах кристаллической решетки германия, речь может идти о системе реакций растворения и ионизации доноров и акцепторов, приводящих к образованию заряженных комплексов  $(\text{CuSb})^-$ , т.е. речь идет о привлечении системы реакций (А).



Анализируя систему равновесий (1)–(4) в цепочках реакций схемы (С), мы можем заключить, что образование трудно диссоциирующих электронно-дырочных пар, согласно реакции (3), и заряженных донорно-акцепторных комплексов по реакции (4) должно приводить к сдвигу равновесий (1) и (2) вправо, а это означает, что растворимость акцепторов в присутствии доноров должна возрастать и растворимость доноров в присутствии акцепторов также должна расти. Для количественного рассмотрения эффекта двойного легирования полупроводника, сопровождающего образование заряженных комплексов, мы использовали закон действующих масс и условие сохранения общего количества частиц легирующих элементов, а также условие электронейтральности полупроводника, что позволило для каждой системы реакций составить соответствующие системы уравнений, отвечающие системам равновесий (А) и (В) соответственно.

В дальнейшем при составлении равновесий и уравнений, вытекающих из них, используются принятые обозначения для концентрации дефектов в твердых растворах:  $n, p$  — электронов и дырок,  $\square$  — вакансий,  $N_{D^{2+}}, N_{A^{2-}}$  — двухзарядных ионов (доноров и акцепторов),  $N_{D^+}, N_{A^-}$  — однозарядных ионов (доноров и акцепторов),  $N_{(DA)^-}, N_{(DA)^+}$  — отрицательно и положительно заряженных комплексов. Кроме того, через  $K_0, K_D^*, K_A^*, K_{DA}^*$  обозначены константы в соответствующих уравнениях при использовании закона действующих масс.

В дальнейшем при выполнении различных преобразований рассматривается только совокупность уравнений, получающихся на основе схемы (А), которой соответствует схема образования отрицательно заряженных комплексов  $(DA)^-$ , так как все необходимые преобразования для системы реакций (В) будут аналогичны приведенным для системы (А). Систему уравнений (А) разделим на две группы. К первой группе (I) отнесем все те уравнения, которые соответствуют процессам, связанным с изменением растворимости в германии акцепторного элемента  $N_A$  при увеличении содержания донорного  $N_D$ , а ко второй группе (II) — все уравнения, которые связаны с процессами изменения растворимости донорного элемента  $N_D$  под влиянием добавок акцепторного  $N_A$ .

В результате оказалось, что системы (I) и (II) отличаются друг от друга только первыми уравнениями и параметрами  $K_{DA}^A, K_{DA}^D$ . Системы уравнений обеих групп представим в параметрической форме, принимая в первой группе (I) за основную переменную концентрацию дырок  $p$ , а во второй (II) — концентрацию электронов  $n$ , и тогда получим

$$\begin{array}{l}
 \text{(I)} \left\{ \begin{array}{l}
 N_{A^{2-}} = K_A^*/p^2, \quad (1) \\
 n = K_0/p, \quad (2) \\
 N_{(DA)^-} = \frac{2K_A^*p^{-2} + K_0p^{-1} - 2p}{K_{DA}^A(K_A^*)^{-1}p^2 - 1}, \quad (3) \\
 N_{D^+} = \frac{K_{DA}^A}{K_A^*}p^2 \frac{2K_A^*p^{-2} + K_0p^{-1} - 2p}{K_{DA}^A(K_A^*)^{-1}p^2 - 1}, \quad (4) \\
 N_A = \frac{K_A^*p^{-2} + K_0p^{-1} - 2p + K_{DA}^A}{K_{DA}^A(K_A^*)^{-1}p^{-2} - 1}, \quad (5) \\
 N_D = \left(1 + \frac{K_{DA}^A}{K_A^*}p^2\right) \frac{2K_A^*p^{-2} + K_0p^{-1} - 2p}{K_{DA}^A(K_A^*)^{-1}p^2 - 1}. \quad (6)
 \end{array} \right. \\
 \text{(II)} \left\{ \begin{array}{l}
 N_{D^+} = K_D^*/n, \quad (7) \\
 p = K_0/n, \quad (8) \\
 N_{(DA)^-} = \frac{(K_D^* + 2K_0)n^{-1} - n}{1 + 2K_{DA}^D(K_A^*)n}, \quad (9) \\
 N_{A^{2-}} = \frac{K_{DA}^D}{K_D^*}n \frac{(K_D^* + 2K_0)n^{-1} - n}{1 + 2K_{DA}^D(K_D^*)^{-1}n}, \quad (10) \\
 N_D = \frac{2(K_0 + K_D^*)n^{-1} - n + 2K_{DA}^D}{1 + 2K_{DA}^D(K_D^*)^{-1}n}, \quad (11) \\
 N_A = \left(1 + \frac{K_{DA}^D}{K_D^*}n\right) \frac{(K_D^* + 2K_0)n^{-1} - n}{1 + 2K_{DA}^D(K_D^*)^{-1}n}. \quad (12)
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

Уравнения (5) и (6) системы (I) позволяют получить зависимость между концентрациями доноров  $N_D$ , акцепторов  $N_A$  и дырок  $p$  в виде равенства

$$N_D = 2N_A + \frac{K_0}{p} - 2p \quad (13)$$

и уравнение 4-й степени относительно  $1/p$

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{1}{p}\right)^4 + \frac{K_0}{K_A^*} \left(\frac{1}{p}\right)^3 + \frac{N_A + K_{DA}^A}{K_A^*} \left(\frac{1}{p}\right)^2 \\
 - \frac{2}{K_A^*} \left(\frac{1}{p}\right) - \frac{K_{DA}^A N_A}{(K_A^*)^2} = 0. \quad (14)
 \end{aligned}$$

Наибольший вещественный положительный корень, существование которого можно установить по распределению знаков между действительными коэффициентами уравнения (14), определяется методом Феррари [14] по

формуле

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{K_0^2}{4(K_A^*)^2} + 2y - \frac{N_A + K_{DA}^A}{K_A^*} - \frac{K_0}{2K_A^*}} + \left[ \left( \sqrt{\frac{K_0^2}{4(K_A^*)^2} + 2y - \frac{N_A + K_{DA}^A}{K_A^*} - \frac{K_0}{2K_A^*}} \right)^2 + 4 \sqrt{y^2 + \frac{N_A K_{DA}^A}{(K_A^*)^2} - y} \right]^{1/2} \right\}. \quad (15)$$

После подстановки этого выражения в зависимость (13) получим аналитическое уравнение изотермы  $N_D = f(N_A)$  в случае преобладания акцепторов,  $N_D \leq N_A$ , в таком виде:

$$N_D = 2N_A + \frac{K_0}{2} \left\{ \sqrt{\frac{K_0^2}{4(K_A^*)^2} + 2y - \frac{N_A + K_{DA}^A}{K_A^*} - \frac{K_0}{2K_A^*}} + \left[ \left( \sqrt{\frac{K_0^2}{4(K_A^*)^2} + 2y - \frac{N_A + K_{DA}^A}{K_A^*} - \frac{K_0}{2K_A^*}} \right)^2 + 4 \sqrt{y^2 + \frac{N_A K_{DA}^A}{(K_A^*)^2} - y} \right]^{1/2} - 4 \left\{ \sqrt{\frac{K_0^2}{4(K_A^*)^2} + 2y - \frac{N_A + K_{DA}^A}{K_A^*} - \frac{K_0}{2K_A^*}} + \left[ \left( \sqrt{\frac{K_0^2}{4(K_A^*)^2} + 2y - \frac{N_A + K_{DA}^A}{K_A^*} - \frac{K_0}{2K_A^*}} \right)^2 + 4 \sqrt{y^2 + \frac{N_A K_{DA}^A}{(K_A^*)^2} - y} \right]^{1/2} \right\}^{-1}. \quad (16)$$

В равенстве (15) и уравнении изотермы (16) используется вещественный корень резольвенты уравнения (14), который определяется методом Ферро-Гарталья-Кардано [15] по формуле

$$y = \frac{N_A + K_{DA}^A}{6K_A^*} + \frac{1}{2K_A^*} x, \\ x = \left\{ -\frac{a}{2} \sqrt{\frac{a^2}{4} + \left[ \frac{2}{3}(2N_A K_{DA}^A - K_0) - \frac{1}{9}(N_A + K_{DA}^A)^2 \right]^3} \right\}^{1/3} - \left\{ \frac{a}{2} + \sqrt{\frac{a^2}{4} + \left[ \frac{2}{3}(2N_A K_{DA}^A - K_0) - \frac{1}{9}(N_A + K_{DA}^A)^2 \right]^3} \right\}^{1/3}, \quad (17)$$

где

$$a = \left\{ \frac{K_0^2 K_{DA}^A N_A}{K_A^*} - 4 \left[ K_A^* + N_A K_{DA}^A (N_A + K_{DA}^A) \right] - \frac{2}{27} (N_A + K_{DA}^A)^3 + \frac{2}{3} (N_A + K_{DA}^A) (2N_A K_{DA}^A - K_0) \right\}.$$

Уравнения (11) и (12) системы (II) позволяют получить между концентрациями доноров  $N_D$ , акцепторов  $N_A$  и электронов  $n$  следующую зависимость:

$$N_A = \frac{1}{2} N_D + \frac{K_0}{n} - \frac{1}{2} n \quad (18)$$

и квадратное уравнение относительно  $1/n$

$$2(K_0 + K_D^*) \left( \frac{1}{n} \right)^2 - (N_D - 2K_{DA}^D) \left( \frac{1}{n} \right) - \left( 1 + 2 \frac{K_{DA}^A}{K_D^*} N_D \right) = 0. \quad (19)$$

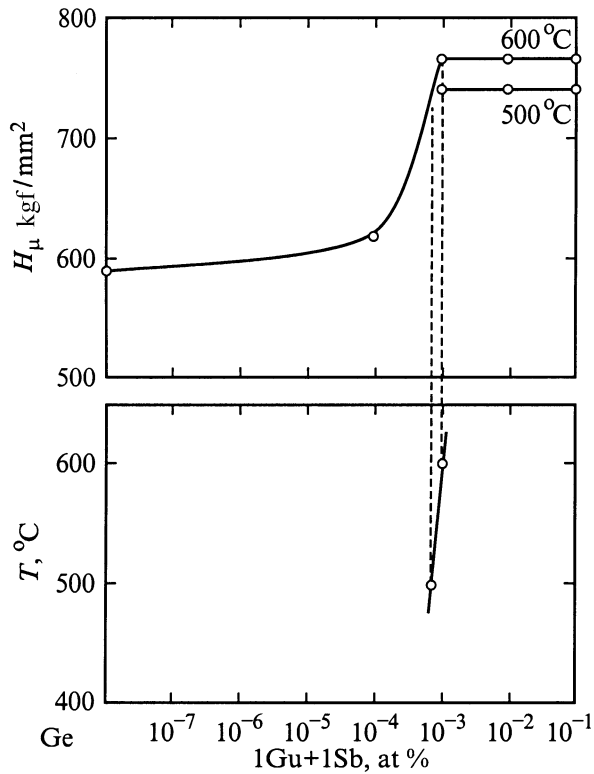
Подставляя положительный корень уравнения (19) в зависимость (18), получим аналитическое уравнение изотермы  $N_A = f(N_D)$  для случая преобладания доноров,  $N_A \leq N_D$ , в виде

$$N_A = \frac{1}{2} N_D + \frac{K_0}{4(K_0 + K_D^*)} \times \left[ N_D + \sqrt{(N_D - 2K_{DA}^D)^2 + 8(K_0 + K_D^*) \left( 1 + \frac{K_{DA}^D}{K_D^*} N_D \right) - 2K_{DA}^D} \right] - 2(K_0 + K_D^*) \times \left[ N_D + \sqrt{(N_D - 2K_{DA}^D)^2 + 8(K_0 + K_D^*) \left( 1 + \frac{K_{DA}^D}{K_D^*} N_D \right) - 2K_{DA}^D} \right]^{-1}. \quad (20)$$

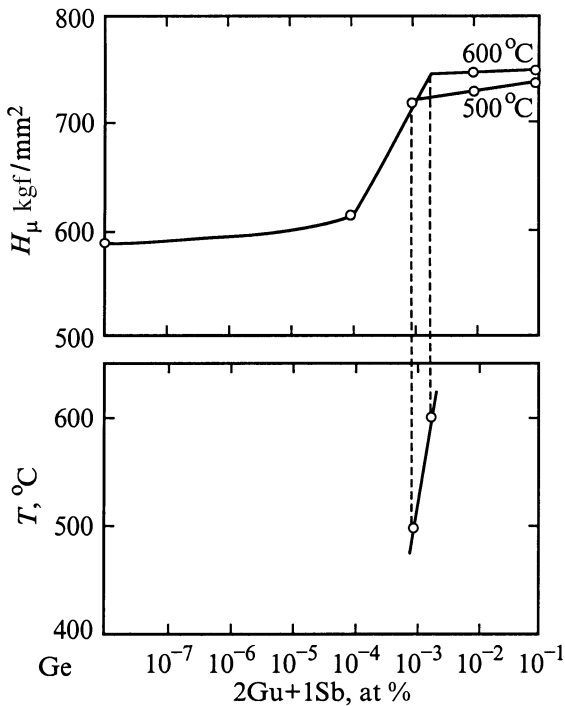
Для того чтобы можно было использовать функциональные зависимости  $N_D = f(N_A)$  и  $N_A = f(N_D)$  между концентрациями доноров и акцепторов, полученные на основе модели образования отрицательно заряженных комплексов, для количественных расчетов предельных значений совместной растворимости донорных и акцепторных элементов при сложном легировании германия, необходимо для каждой температуры эксперимента знать величины параметров  $K_0$ ,  $K_A^*$ ,  $K_{DA}^A$ ,  $K_D^*$ ,  $K_{DA}^D$ . Используя двойные системы Ge-A, Ge-D с концентрациями  $N_D = N_D^0$ ,  $N_A = N_A^0$  и эквипотенциальный разрез  $[D] : [A] = 1 : 1$  с концентрациями  $N_D = N_A$ , можно с помощью аналитических уравнений  $N_D = f(N_A)$ ,  $N_A = f(N_D)$  и систем (I) и (II) получить формулы для указанных констант, которые и позволяют вычислять параметры изотерм через экспериментальные значения растворимостей  $N_A^0$ ,  $N_A$ ,  $N_D^0$ ,  $N_D$  и коэффициент  $K_0$ . Величину коэффициента  $K_0$  можно выразить как функцию температуры  $T$ :

$$K_0 = 32 \left( \frac{\pi m_0 k}{h^2} \right)^3 (\sqrt{m_n^* m_p^*})^3 T^3 \exp \left( -\frac{\Delta E}{kT} \right), \quad (21)$$

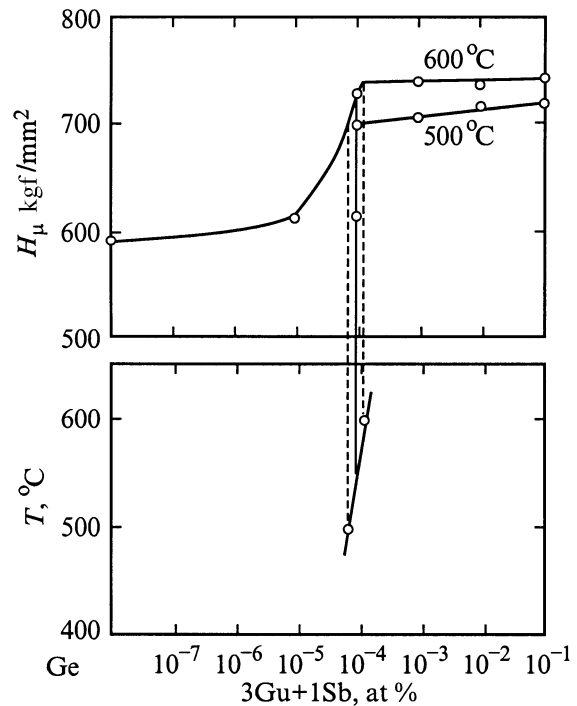
где  $m_0$  — масса покоя электрона,  $k$  — постоянная Больцмана,  $h$  — постоянная Планка;  $m_n^*$ ,  $m_p^*$  — относительные эффективные массы электронов и дырок,



**Рис. 1.** Зависимость микротвердости кристаллов твердого раствора  $H_\mu$  от состава сплава и участок кривой сольвуса для разреза 1 : 1 в системе Ge–Cu–Sb.



**Рис. 2.** Зависимость микротвердости кристаллов твердого раствора  $H_\mu$  от состава сплава и участок кривой сольвуса для разреза 2 : 1 в системе Ge–Cu–Sb.



**Рис. 3.** Зависимость микротвердости кристаллов твердого раствора  $H_\mu$  от состава сплава и участок кривой сольвуса для разреза 3 : 1 в системе Ge–Cu–Sb.

$\Delta E$  — ширина запрещенной зоны полупроводника для заданной температуры и расположения примесных уровней.

Развитые выше теоретические положения были использованы для анализа поведения меди и сурьмы при совместном легировании ими германия. В тройной системе Ge–Cu–Sb экспериментально было установлено [6,16] наличие отрицательно заряженного комплекса  $(DA)^-$ , образующегося при взаимодействии двухзарядного акцептора (меди) с однозарядным донором (сурьмой).

Ранее выполненные микроструктурные исследования сплавов этой системы позволили ориентировочно наметить границы областей гомогенности на основе германия при 500 и 600°C [17]. Для получения более строгих численных значений совместной растворимости меди и сурьмы в германии с целью использования их в расчетах в настоящей работе был применен метод измерения микротвердости, хорошо зарекомендовавший себя при решении подобных задач. Микротвердость  $H_\mu$  исследовали на сплавах, располагающихся по составу на лучевых разрезах с соотношением между атомными концентрациями сурьмы и меди 1 : 1, 1 : 2 и 1 : 3. Сплавы подвергали длительной гомогенизации при 500 и 600°C и закаливали в воде. Измерения проводили при нагрузке 50 г на приборе ПМТ-3 с автоматическим приложением нагрузки [18]. Полученные данные обрабатывались статистически путем построения частотных кривых. Оказалось, что эти кривые подчиняются нормальному рас-

пределению Лапласа–Гаусса. Максимумы на частотных кривых отвечают математическому ожиданию истинных значений микротвердости.

Анализ расположения частотных кривых по значениям микротвердости для сплавов различного состава показал, что оно имеет вполне закономерный характер. В пределах областей гомогенности с увеличением концентрации растворенных веществ максимумы сдвигаются в сторону более высоких значений микротвердости кристаллов твердого раствора, а при переходе в двухфазные области практически не изменяют своего положения в зависимости от состава сплавов. Используя значения микротвердости, отвечающие максимумам на частотных кривых, мы построили концентрационные зависимости микротвердости кристаллов твердого раствора меди и сурьмы в германии от состава сплава, которые приведены на рис. 1–3. Изломы на этих кривых отвечают границе насыщения раствора при заданной температуре. Значения растворимости меди и сурьмы в германии по указанным выше лучевым разрезам, полученные из анализа рис. 1–3, были нанесены на концентрационный треугольник Гиббса, и в результате построены изотермы растворимости при 500 и 600°C, представленные на рис. 4. Из рис. 4 следует, что растворимость меди в присутствии сурьмы резко возрастает, что, согласно результатам [7–14], свидетельствует о проявлении донорно-акцепторного взаимодействия. Численные значения совместной растворимости меди и сурьмы в германии при температурах 500 и 600°C приведены в табл. 1.

Используя значения отдельной растворимости меди и сурьмы, взятые из работы [1], и полученные в настоящей работе данные по совместной растворимости этих элементов на разрезе  $N_{Cu} : N_{Sb} = 1 : 1$  при 500 и 600° (см. табл. 1), а также значения  $K_0$  для этих температур, мы провели расчеты констант  $K_A^*$ ,  $K_D^*$ ,  $K_{AD}^D$ ,  $K_{AD}^A$ . Значения  $K_0$  вычислялись на основании уравнения (21), которое

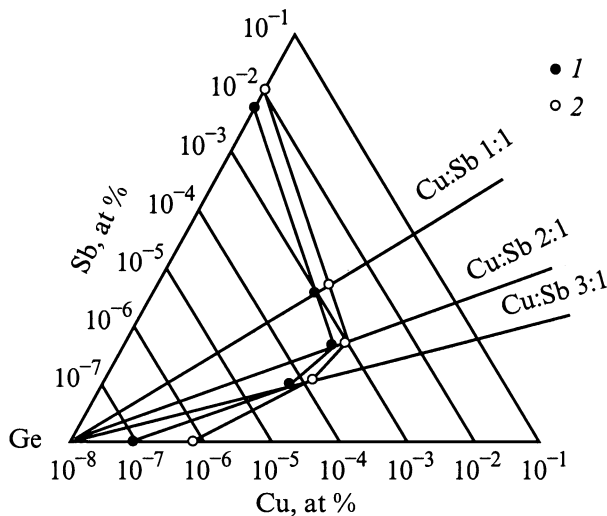


Рис. 4. Изотермы растворимости меди и сурьмы в германии при температурах 600 (1) и 500°С (2).

Таблица 1. Предельная растворимость меди и сурьмы при простом и сложном легировании германия

Температура, °С	Растворимость элементов, ат%				
	раздельная		совместная $N_{Cu} + N_{Sb}$		
	$N_{Sb}^0$	$N_{Cu}^0$	3 + 1	2 + 1	1 + 1
500	$6.6 \cdot 10^{-3}$	$8.85 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
600	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$6.63 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2. Значения параметров в уравнениях изотерм растворимости меди и сурьмы в германии

Температура, °С	$K_0$ , $10^{36} \text{ см}^6$	$K_A^*$ , $10^{50} \text{ см}^9$	$K_{DA}^A$ , $10^{10} \text{ см}^3$	$K_D^*$ , $10^{36} \text{ см}^6$	$K_{DA}^D$ , $10^{19} \text{ см}^3$
500	2.04	0.40	1.40	2.10	1.94
600	11.24	16.60	19.55	8.20	1.35

после подстановки численных значений констант  $h$ ,  $k$ ,  $m_0$  принимает вид

$$K_0 \approx 2.32 \cdot 10^{31} (\sqrt{m_n^* m_p^*})^3 T^3 \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right). \quad (22)$$

При расчетах учитывали зависимость ширины запрещенной зоны германия от температуры и концентрации, а также значения эффективных масс  $m_n^*$ ,  $m_p^*$  [19,20]. Значения всех полученных констант приведены в табл. 2. Дальнейшие расчеты выполнялись по формуле (16) для изотермы  $N_D = f(N_A)$ . При этом подставляли численные значения концентрации акцепторов  $N_A$  для разрезов 3 : 1, 2 : 1 и находили содержание донорного элемента  $N_D$ . При выполнении расчетов обнаружили, что для системы Ge–Cu–Sb в формуле (17) под знаком квадратного корня получилось отрицательное число, т. е.

$$\frac{a}{4} + \left[ \frac{2}{3}(2N_A K_{DA}^A - K_0) - \frac{1}{9}(N_A + K_{DA}^A)^2 \right]^3 < 0. \quad (23)$$

Поэтому формулу (17) можно представить в виде

$$y = \frac{1}{K_A^*} \left[ \frac{N_A + K_{DA}^A}{6} + \sqrt{\frac{2}{3}(K_0 - 2N_A K_{DA}^A) + \frac{1}{9}(N_A + K_{DA}^A)^2 \cos^2 \frac{\varphi}{3}} \right], \quad (24)$$

где

$$\cos \varphi = \left\{ \frac{1}{3}(K_0 - 2N_A K_{DA}^A)(N_A K_{DA}^A) + 2 \left[ K_A^* + N_A K_{DA}^A (N_A + K_{DA}^A) \right] + \frac{1}{27}(N_A + K_{DA}^A) - \frac{K_0^2 N_A K_{DA}^A}{2K_A^*} \right\} / \sqrt{\left[ \frac{2}{3}(K_0 - 2N_A K_{DA}^A) + \frac{1}{9}(N_A + K_{DA}^A)^2 \right]^3}. \quad (25)$$

**Таблица 3.** Экспериментальные и рассчитанные по изотерме заряженного комплекса значения растворимости донорного элемента в системе Ge–Cu–Sb

Температура, °С	Разрез на треугольнике Гиббса $N_A : N_D$	Растворимость $N_{Sb}, 10^{16} \text{ см}^{-3}$	
		эксперимент	расчет
500	3 : 1	0.11	0.18
	2 : 1	2.97	3.32
600	3 : 1	2.22	2.33
	2 : 1	14.83	18.54

Результаты выполненных расчетов в сопоставлении с экспериментальными данными помещены в табл. 3.

Строгая последовательность вывода уравнений изотерм  $N_D = f(N_A)$ ,  $N_A = f(N_D)$  вместе с хорошим совпадением результатов измерений и вычислений подтверждает адекватность предложенной модели взаимодействия донорных и акцепторных элементов при образовании заряженных комплексов в тройных твердых растворах рассмотренного типа. Уравнения изотерм  $N_D = f(N_A)$ ,  $N_A = f(N_D)$  позволяют теоретически, расчетным путем, проследить при сложном легировании германия совместную растворимость донорных и акцепторных элементов во всем диапазоне изменения температур и используемых концентраций.

## Список литературы

- [1] В.М. Глазов, В.С. Земсков. *Физико-химические основы легирования полупроводников* (М., Наука, 1967).
- [2] В.М. Глазов, А.Я. Потемкин, А.И. Киселев. ДАН СССР, **223** (2), 377 (1975).
- [3] В.М. Глазов, А.И. Киселев, А.Я. Потемкин. ЖФХ, **51** (11), 2788 (1977).
- [4] В.М. Глазов, А.И. Киселев, А.Я. Потемкин. Электрон. техн., сер. Материалы, № 9, 64 (1975).
- [5] Ф. Крегер. *Химия несовершенных кристаллов* (М., Мир, 1969).
- [6] Н.И. Шадеев, Т.И. Грехова, А.Я. Потемкин. Электрон. техн., сер. Материалы, № 3, 63 (1974).
- [7] Н. Reiss, C. Fuller. Phys. Rev., **97**, 559 (1956).
- [8] Н. Reiss, C. Fuller. J. Metals, **8**, 256 (1956).
- [9] Н. Reiss, C. Fuller, F. Morin. Bell Syst. Techn., **35**, 535 (1956).
- [10] В.М. Глазов, Г.Л. Малютина, А.И. Киселев. ЖФХ, **44**, 1051 (1970).
- [11] В.М. Глазов, Г.Л. Малютина, А.И. Киселев. Электрон. техн., сер. 14 Материалы, № 2, 53 (1968).
- [12] В.М. Глазов, А.И. Киселев. Электрон. техн., сер. 14 Материалы, № 2, 52 (1970).
- [13] В.М. Глазов, А.И. Киселев, В.Н. Черняев. Электрон. техн., сер. 14 Материалы, № 3, 37 (1970).
- [14] А.Г. Курош. *Курс высшей алгебры* (М., Наука, 1968).
- [15] Л.Н. Окунев. *Высшая алгебра* (М., Просвещение, 1966).
- [16] А.Я. Потемкин, В.И. Потапов. ФГТ, **2**, (1960).
- [17] А.Я. Потемкин, Е.В. Мельников. В сб.: *Легированные полупроводники* (М., Наука, 1975) с. 60.

- [18] В.М. Глазов, В.Н. Вигдорович. *Микротвердость металлов и полупроводников* (М., Металлургия, 1969).
- [19] А.С. Охотин, А.С. Пушкарский, В.В. Горбачев. *Терлофизические свойства полупроводников* (М., Атомиздат, 1972).
- [20] Г.Б. Боккий, А.Я. Угай и др. *Кристаллохимические, физико-химические, физические свойства полупроводников* (М., Изд-во стандартов, 1973).

Редактор Л.В. Шаронова

## Copper–antimony interaction in a germanium-based solid solution and subsequent formation of the charged complex

V.M. Glazov, A.Ya. Potemkin

Moscow State Institute for Electronic Engineering,  
103498 Moscow, Russia