

УДК 621.315.592

Диффузия хрома в GaAs при равновесном давлении паров мышьяка© С.С. Хлудков[¶], О.Б. Корецкая, Г.Р. Бурнашова

Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова при Томском государственном университете, 634050 Томск, Россия

(Получена 11 января 2006 г. Принята к печати 24 января 2006 г.)

Исследована диффузия хрома в GaAs при равновесном давлении паров мышьяка. Определена температурная зависимость коэффициента диффузии и растворимости хрома в GaAs. Температурная зависимость коэффициента диффузии и растворимости хрома описывается уравнением Аррениуса с параметрами для коэффициента диффузии: $D_0 = 3.1 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{с}$, $E = 3.2 \pm 0.4 \text{ эВ}$; для растворимости: $N_S = 2.1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$, $E_S = 1.0 \pm 0.3 \text{ эВ}$. Полученные экспериментальные результаты сравниваются с ранее опубликованными данными по диффузии хрома при большом давлении паров мышьяка и анализируются с позиций диссоциативного механизма миграции атомов хрома в GaAs.

PACS: 66.30.-h, 81.05.Ea

Структуры на основе GaAs, легированного хромом в процессе диффузии, используются для изготовления ряда приборов: переключающих лавинных S -диодов, фотоприемников, детекторов высокоэнергетических излучений [1]. По диффузии хрома в GaAs имеется ряд работ [2–8]. Однако литературные данные отличаются большим разбросом значений коэффициента диффузии хрома, что, видимо, обусловлено разными условиями проведения диффузии, которые при этом часто приводятся не полностью. Имеет место и неоднозначная трактовка полученных результатов. В настоящей работе получены новые данные по диффузии хрома в GaAs при равновесном давлении паров мышьяка, соответствующем давлению диссоциации GaAs на галлиевой стороне диаграммы состояния Ga–As при строго контролируемых условиях проведения диффузии. Результаты интерпретируются на основе представлений о диссоциативном механизме миграции атомов хрома в GaAs и могут быть использованы при разработке приборных структур на основе GaAs с глубокими центрами.

Диффузия хрома проводилась в откачанных ампулах в n -GaAs из слоя диффузанта толщиной 30 нм, напыленного на поверхность GaAs (что соответствует случаю диффузии из неограниченного источника), при температуре 850–1050°С с интервалом изменения 25°С. Коэффициент диффузии хрома определяли по методике, изложенной в [8]: по данным измерения толщины высокоомных слоев, возникающих в процессе диффузии в n -GaAs акцепторной примеси хрома с глубоким энергетическим уровнем. Диффузия хрома проводилась одновременно в три пластины GaAs, выращенного методом Чохральского, концентрация электронов n в котором изменялась в пределах $(1–8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. В ампулу не помещался элементарный мышьяк, и в процессе отжига устанавливалось давление паров мышьяка, соответствующее давлению диссоциации. При этом строго контролировались все условия проведения диффузии, в

том числе объем ампул, который составлял $\sim 60 \text{ см}^3$ и суммарная площадь пластин GaAs в ампуле $\sim 15 \text{ см}^2$.

В результате диффузии хрома в пластинах GaAs со стороны напыленного хрома создавались высокоомные слои с удельным сопротивлением $\rho = 10^8–10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и толщиной 70–200 мкм. Толщину высокоомного слоя d определяли по анодному окислению поперечного скола пластины GaAs и по измерению на косом шлифе напряжения пробоя прижимного точечного контакта металл–полупроводник. Полученные значения $d = f(n)$ представляют собой концентрационные профили электрически активных атомов хрома в GaAs ($N_{Cr} = f(x)$). Полагали, что концентрационный профиль для каждой температуры описывается функцией ошибок (диффузия хрома осуществлялась из неограниченного источника):

$$N(x) = N_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right), \quad (1)$$

где x — координата, N_0 — поверхностная концентрация электрически активных атомов хрома, D — коэффициент диффузии хрома в GaAs, t — время проведения диффузии. Из концентрационного профиля определяли аргументы N_0 и $2\sqrt{Dt}$, и из последнего определяли D для каждой температуры. На рис. 1 приведена температурная зависимость коэффициента диффузии хрома в GaAs. Полученная зависимость хорошо описывается уравнением Аррениуса:

$$D = D_0 \exp \left(\frac{-E}{kT} \right), \quad (2)$$

где предэкспоненциальный множитель $D_0 = 3.1 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{с}$, энергия активации диффузии $E = 3.2 \pm 0.4 \text{ эВ}$. На рис. 2 приведена температурная зависимость предельной растворимости электрически активных атомов хрома в GaAs. За предельную растворимость хрома при каждой температуре взяты значения поверхностной концентрации хрома N_0 . Полученная зависимость также может быть описана уравнением

[¶] E-mail: kanc@spti.tsu.ru

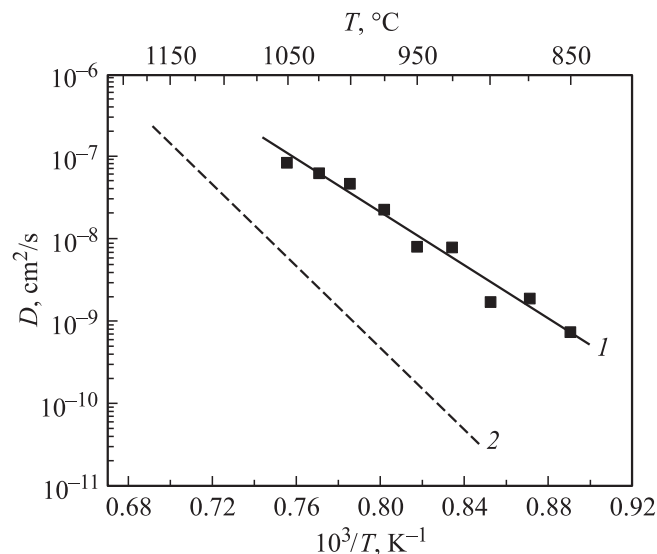


Рис. 1. Температурная зависимость коэффициента диффузии хрома в GaAs: 1 — при равновесном давлении паров мышьяка, 2 — при $P_{As_4} = 1$ атм [8].

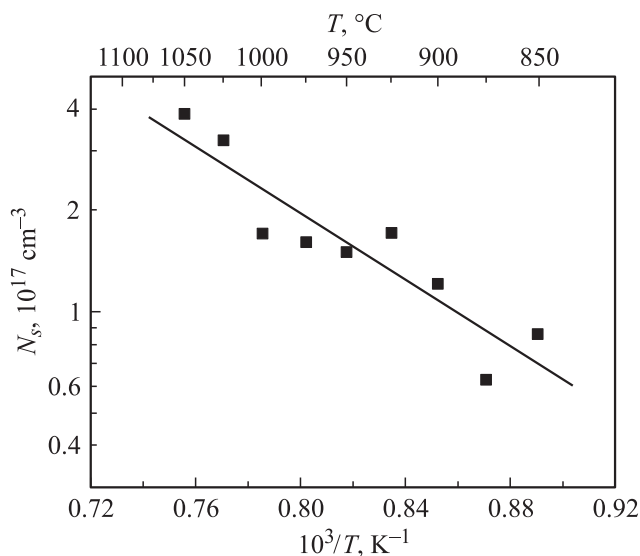


Рис. 2. Температурная зависимость растворимости хрома в GaAs.

Аррениуса:

$$N_s = N_s^0 \exp\left(\frac{-E_s}{kT}\right), \quad (3)$$

со следующими параметрами $N_s^0 = 2.1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$, $E_s = 1.0 \pm 0.3 \text{ эВ}$.

Сравним данные по температурной зависимости коэффициента диффузии хрома, полученные в настоящей работе при равновесном давлении паров мышьяка, с ранее опубликованными нашими данными [8] (приведены на рис. 1 пунктиром), определенными при большом давлении паров мышьяка ($P_{As_4} = 1$ атм), но при прочих условиях, полностью соответствующих условиям эксперимента данной работы. Экспериментальные

значения коэффициента диффузии хрома, полученные в настоящей работе и работе [8], отличаются как по величине D , так и энергии активации: при $P_{As_4} = 1$ атм D меньше, чем при равновесном давлении: на высокотемпературной границе примерно на порядок, на низкотемпературной — на 2 порядка, а энергия активации выше (при 1 атм $E = 4.9$ эВ, при равновесном давлении $E = 3.2$ эВ). Это различие объяснимо с позиций диссоциативного механизма диффузии примеси хрома, согласно которому основной диффузионный поток осуществляется по мездоузлиям. В случае диссоциативного механизма диффузии, согласно [3,9,10], концентрация межузельных атомов N_i и соответственно коэффициент диффузии хрома в GaAs описываются выражениями:

$$N_i \propto N_V^{-1} \propto P_{As_4}^{-1/4}, \quad (4)$$

$$D \propto D_i \frac{N}{N_V} \propto P_{As_4}^{-1/4}, \quad (5)$$

где D_i — коэффициент диффузии примеси по междоузлиям, N — концентрация примеси в узлах, N_V — концентрация вакансий галлия, P_{As_4} — парциальное давление паров четырехатомных молекул мышьяка. Таким образом, в случае диссоциативного механизма коэффициент диффузии должен определяться концентрацией вакансий галлия, которая в свою очередь определяется температурой и парциальным давлением паров мышьяка. Приведем значения парциальных давлений четырехатомных молекул мышьяка и концентраций вакансий галлия, соответствующих равновесному давлению мышьяка на галлиевой стороне диаграммы состояния Ga-As для 850 и 1050°C (границы исследованного нами температурного диапазона). По данным [3], при 850°C P_{As_4} составляет $\sim 3 \cdot 10^{-8}$ атм и в пределах области гомогенности возрастает до ~ 15 атм (на мышьяковой стороне диаграммы состояния), при 1050°C $P_{As_4} \approx 10^{-4} - 20$ атм. При этом концентрация вакансий галлия на галлиевой стороне диаграммы состояния при изменении температуры от 850 до 1050°C возрастает от $\sim 2 \cdot 10^{15}$ до $\sim 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Концентрация вакансий, соответствующая стехиометрическому составу ($V = (V_{As} \cdot V_{Ga})^{1/2}$), при 850°C составляет $\sim 3 \cdot 10^{16}$, при 1050°C — $\sim 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Отметим, что величины концентраций вакансий, по данным других авторов (например, [11]), отличаются не более чем на порядок от данных работы [3]. Таким образом, при переходе от давления паров мышьяка, соответствующего давлению диссоциации, к высокому давлению 1 атм, P_{As_4} возрастает от $\sim 10^{-4}$ атм (на 4 порядка) при 1050°C и от 10^{-8} до 1 атм (на 8 порядков) при 850°C. Соответственно, согласно выражению (5), коэффициент диффузии хрома при переходе от низкого давления паров мышьяка к высокому должен уменьшаться при 1050°C на порядок, а при 850°C на 2 порядка, что находится в хорошем согласии с экспериментальными данными. Соответственно изменяется и наклон температурной зависимости коэффициента диффузии ($D = f(1/T)$), определяющий энергию активации процесса диффузии, которая в данном случае является некоторой эффективной величиной.

Таким образом, определенная в данной работе температурная зависимость коэффициента диффузии хрома в GaAs при равновесном давлении паров мышьяка согласуется с ранее полученными результатами и хорошо объясняется с позиций диссоциативного механизма миграции атомов хрома в кристаллической решетке GaAs, согласно которому коэффициент диффузии существенно зависит от парциального давления паров мышьяка.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 04-02-17486).

Список литературы

- [1] С.С. Хлудков. Вестн. Томск. гос. ун-та. Сер. Физика, № 285, 84 (январь 2005).
- [2] С.С. Хлудков, Г.А. Приходько, Т.Н. Карелина. Изв. АН СССР. Неорг. матер., **8** (6), 1044 (1972).
- [3] Х. Кейзи. В кн.: *Атомная диффузия в полупроводниках* (М., Мир, 1975).
- [4] Н.В. Гонтарь, Л.Б. Городник, А.В. Емельянов, Д.Н. Нишанов, В.В. Старостин, А.Н. Шокин. В сб.: *Свойства легированных полупроводников* (М., Наука, 1977) с. 31.
- [5] В. Tuck, A. Adegboye. J. Phys. D, **12** (11), 1895 (1979).
- [6] J. Kasahara, N. Watanabe. Jap. J. Appl. Phys., **19** (3), L15 (1980).
- [7] M.D. Deal, D.A. Stevenson. J. Appl. Phys., **59** (7), 2398 (1986).
- [8] С.С. Хлудков, О.Б. Корецкая, А.В. Тяжев. ФТП, **38** (3), 274 (2004).
- [9] Б.И. Болтакс. *Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках* (Л., Наука, 1972).
- [10] Т.Д. Джафаров. *Дефекты и диффузия в эпитаксиальных структурах* (Л., Наука, 1978).
- [11] В.Т. Бублик, М.Г. Мильвидский, В.Б. Освенский. Изв. вузов. Физика, **23** (1), 7 (1980).

Редактор Л.В. Беляков

Diffusion of chromium in GaAs under an equilibrium pressure of arsenic vapours

S.S. Khludkov, O.B. Koretskaya, G.B. Burnashova

Kuznetsov Siberian Physicotechnical Institute,
Tomsk State University,
634050 Tomsk, Russia

Abstract The diffusion of chromium in GaAs under an equilibrium pressure of arsenic vapours has been investigated. The temperature dependence of a diffusion coefficient and the solubility of chromium in GaAs was defined. The dependence of the diffusion coefficient and the solubility on temperature is described by Arrhenius equation with the following parameters for the diffusion: $D_0 = 3.1 \cdot 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$, $E = 3.2 \pm 0.4 \text{ eV}$, the solubility $N_S = 2.1 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, $E_S = 1.0 \pm 0.3 \text{ eV}$. Experimental results obtained are compared with earlier obtained data under large pressure of arsenic vapours and interpreted in terms of a dissociative migration mechanism of chromium in GaAs.