

ПОВЕДЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ p -GaInSbAs

Воронина Т. И., Джуртанов Б. Е., Лагунова Т. С., Яковлев Ю. П.

Исследовались температурные зависимости коэффициента Холла, электропроводности и подвижности в твердых растворах $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Sb}_{1-y}\text{As}_y$ ($x \approx 0.1$), легированных примесями Ge, Cd, Zn и Te. Показано, что среди акцепторных примесей только Ge позволяет получить материал p -типа с высокой концентрацией дырок ($p \geq 10^{19} \text{ см}^{-3}$). Примеси Cd и Zn можно использовать только при низком уровне легирования (меньше чем $5 \cdot 10^{-5}$ мол%), так как при дальнейшем легировании они плохо растворяются. При легировании Te происходит перекомпенсация (при $5 \cdot 10^{-5}$ мол% Te в расплаве), имеется возможность получения материала n -типа в широком интервале концентраций ($n \leq 10^{18} \text{ см}^{-3}$) с малой степенью компенсации ($K < 0.1$).

Твердые растворы $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Sb}_{1-y}\text{As}_y$ ($x \leq 0.2$) перспективны для создания оптоэлектронных приборов для спектрального диапазона $1.5 \div 2.5 \text{ мкм}$ [1, 2]. Электрические параметры и энергетический спектр нелегированных твердых растворов исследованы нами в работах [3, 4]. Было показано, что наиболее чистый материал был дырочного типа и имел концентрацию носителей тока $p = (5 \div 10) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, концентрацию мелких акцепторов $N_{A1} = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ($E_{A1} \approx 0.01 \text{ эВ}$), концентрацию природных акцепторов $N_{A2} \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ($E_{A2} \approx 0.03 \text{ эВ}$).

В настоящей работе изучалось поведение примесей Ge, Cd, Zn и Te, которые вводились в такие твердые растворы в процессе выращивания из легированной жидкой фазы [5]. Для исследования использовался материал с $x \approx 0.1$, так как высокая температура жидкостной эпитаксии ($600 \text{ }^\circ\text{C}$) позволяла получать толстые эпитаксиальные слои (до 100 мкм) и затем удалить подложку. Исследовались температурные зависимости коэффициента Холла R , электропроводности σ и подвижности $\mu = R\sigma$ в интервале температур $77\text{--}300 \text{ К}$ с целью определения энергетического спектра вводимых примесей, их влияния на механизм рассеяния носителей тока и определения коэффициента сегрегации этих примесей.

При легировании примесями Ge, Cd и Zn исходный материал сохранял p -тип проводимости. На рис. 1 видно, что с ростом уровня легирования концентрация дырок в образцах с примесью Ge увеличивается до $p \geq 10^{19} \text{ см}^{-3}$, в образцах с примесью Zn — до $p \approx 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, а с примесью Cd — до $p \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. При легировании Te происходит перекомпенсация (материал переходит из p - в n -тип проводимости), при этом Te хорошо растворяется и позволяет получать слои с концентрацией носителей тока $n \leq 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

На рис. 2 представлена температурная зависимость коэффициента Холла. В исходном нелегированном материале (образец 1р) всегда проявляется два энергетических уровня: мелкий водородоподобный уровень с энергией активации $E_{A1} \approx 0.01 \text{ эВ}$ при $T < 200 \text{ К}$, определяемый неконтролируемыми примесями, и $E_{A2} \approx 0.03 \text{ эВ}$ при $T > 200 \text{ К}$, определяемый, так же как в p -GaSb, структурным дефектом $V_{\text{Ca}}\text{GaSb}$ [6]. При легировании примесями Ge, Cd, Zn наклоны на температурной зависимости коэффициента Холла при $T < 200 \text{ К}$ уменьшаются с ростом уровня легирования (см. образцы 2р, 3р, 6р, 7р, 8р), а затем вообще исчезает зависимость R от температуры (образцы 4р, 5р). Со-

гласно водородоподобной модели, это уменьшение энергии активации E_{A_1} связанное с перекрытием волновых функций примесных атомов, подчиняется закону $E_{A_1} = E_0(1 - \alpha N_{A_1}^{1/3})$, где $E_0 = 13.5 \frac{m^*}{z^2} = 0.02$ эВ. При этом в образцах с концентрацией $p > 10^{18} \text{ см}^{-3}$ происходит полное слияние примесных уровней с валентной зоной. При $T > 200 \text{ К}$ в образцах, легированных Ge и Cd (образцы 2p, 6p), уровень, связанный со структурным дефектом $E_{A_2} = 0.03$ эВ, исчезает, а появляется более мелкий примесный уровень $E'_{A_2} \approx 0.017$ эВ, который, возможно, связан с новым структурным дефектом типа V_{Ga} — примесь

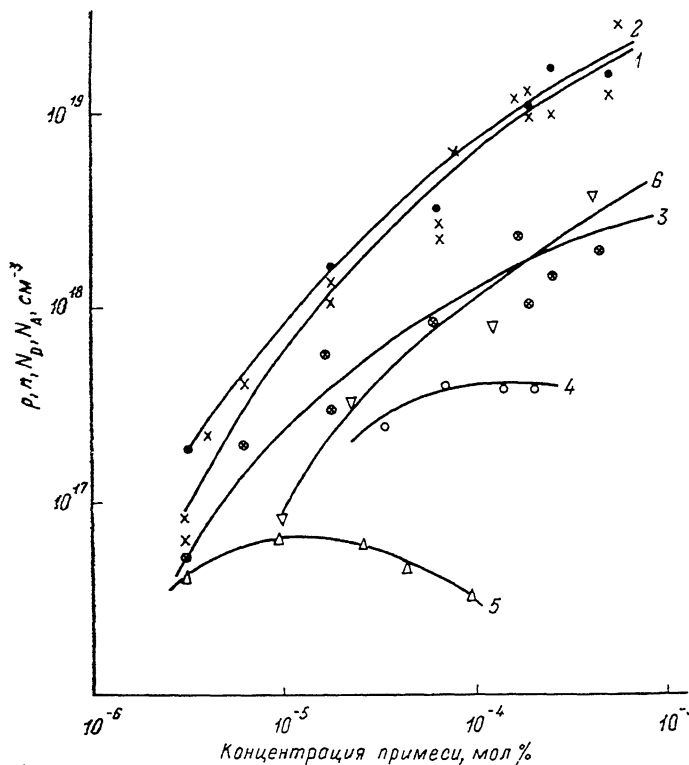


Рис. 1. Концентрация носителей тока p, n и примесей N_A, N_D в твердых растворах $Ga_{1-x}In_x Sb_{1-y}As_y$ ($x \approx 0.1$) в зависимости от дозы введенных примесей.

1—3 — p, N_A, N_D (примесь Ge); 4 — p (примесь Zn); 5 — p (примесь Gd); 6 — n (примесь Te).

(Ge, Cd). В образцах, легированных Zn (7p, 8p), наблюдаются сильные изменения R в области высоких температур, что указывает на появление в этих образцах дефектного уровня с большой энергией активации [$E'_{A_2} = (0.1 - 0.15)$ эВ].

При легировании Te происходит перекомпенсация примесей и в материале n -типа с концентрацией носителей $n = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (образец 1n) наблюдается два энергетических уровня: мелкий водородоподобный уровень $E_{D_1} \approx 0.005$ эВ, связанный (по аналогии с n -GaSb [7]) с примесями Te, и более глубокий уровень ($E_{D_2} = 0.04 - 0.05$ эВ), природа которого пока не ясна. При более высоком уровне легирования наблюдается рост коэффициента Холла с повышением температуры (образец 2n), связанный с заполнением второй зоны проводимости [8]. При $n = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (образец 3n) коэффициент Холла не зависит от температуры, так как уровень Ферми находится выше дна второй зоны проводимости.

Подвижность носителей тока представлена на рис. 3. В исходном материале и во всех образцах, легированных Ge и Te, подвижность обусловлена только рассеянием на ионах примеси u_I и колебаниях решетки u_R . В имеющихся в нашем распоряжении образцах, легированных Zn (образцы 7p, 8p) и Cd (образец 6p), подвижность занижена во всем интервале температур. По всей вероятности, в этих образцах имеет место скопление примесей Zn и Cd, связан-

ное с высоким уровнем легирования, что приводит к дополнительному механизму рассеяния: $u_S \sim T^{-1}$.

Выделив понную составляющую подвижности u_I и используя формулы Брукса—Херринга для рассеяния на ионах примеси как для невырожденного электронно-дырочного газа:

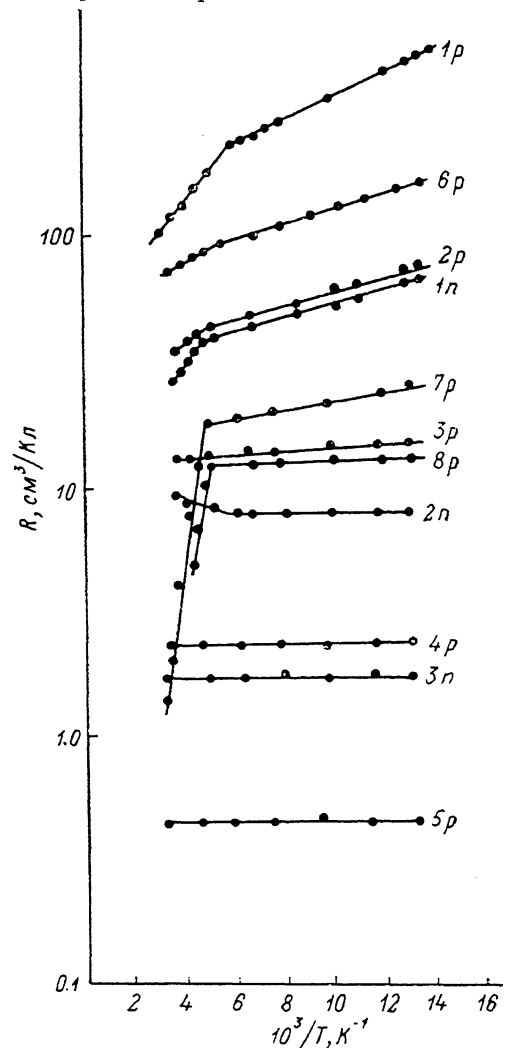


Рис. 2. Зависимость коэффициента Холла от температуры для образцов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Sb}_{1-y}\text{As}_y$ ($x \approx 0.1$), легированных различными примесями.

Нумерация кривых соответствует номерам образцов в таблице.

$$u_I = \frac{3.2 \cdot 10^{15} \left(\frac{m}{m_{n,p}^*} \right)^{1/2} x^2 T^{3/2}}{N_I \left[\ln(1+b) - \frac{b}{b+1} \right]}, \quad b = 1.3 \cdot 10^{14} x \frac{m_{n,p}^*}{m} \frac{T^2}{n(p)},$$

так и для вырожденного:

$$u_I = 0.2 x^2 \left(\frac{m}{m_{n,p}^*} \right)^2 \frac{n(p)}{N_I \left[\ln(1+b) - \frac{b}{b+1} \right]}, \quad b = 5.1 \cdot 10^{-8} x \frac{m}{m_{n,p}^*} [n(p)]^{1/3},$$

определили концентрации ионов примесей N_I , доноров N_D и акцепторов N_A . В образцах с примесью Ge с ростом уровня легирования растет концентрация

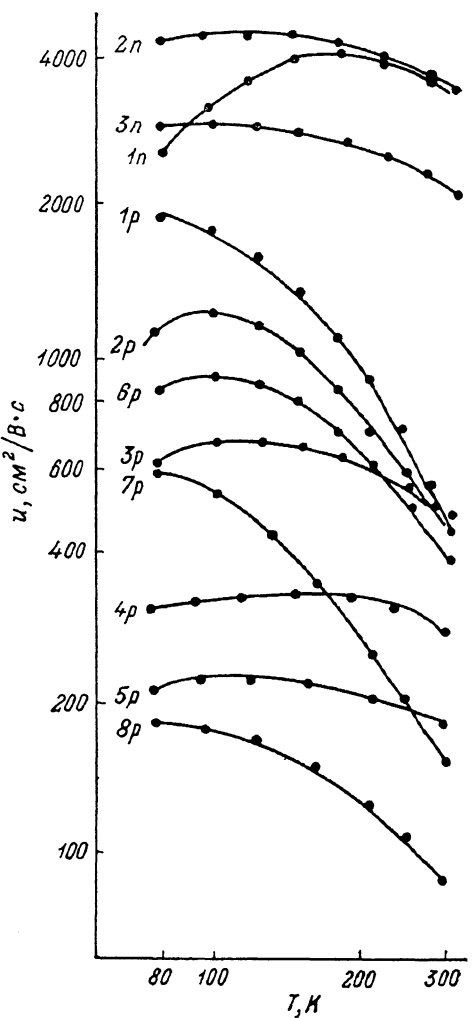


Рис. 3. Зависимость подвижности от температуры для образцов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Sb}_{1-y}\text{As}_y$ ($x \approx 0.1$), легированных различными примесями.

Нумерация кривых та же, что на рис. 2.

как акцепторов, так и доноров (см. рис. 1 и таблицу), т. е. Ge проявляет амфотерные свойства с преобладающим встраиванием его, как акцепторная примесь. При этом полная концентрация примесей растет, а степень компенсации $K = N_D/N_A$ непрерывно уменьшается. В образцах, легированных Cd и Zn, с ростом уровня легирования растет только концентрация акцепторов, а в образцах, легированных Te, — только концентрация доноров ($N_A = N_D^0 + p$, $N_D = N_A^0 + n$, где N_A^0 — концентрация акцепторов и N_D^0 — концентрация доноров в исходном материале).

| № образца | Примесь | Мол% | T = 77 К | | N_D , см ⁻³ | N_A , см ⁻³ | $K = \frac{N_A^0 D}{N_D(A)}$ |
|-----------|---------|---------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|
| | | | n, p , см ⁻³ | u , см ² /В · с | | | |
| 1p | — | — | $1.5 \cdot 10^{16}$ | 1870 | $1.7 \cdot 10^{16}$ | $4.4 \cdot 10^{16}$ | 0.4 |
| 2p | Ge | $3 \cdot 10^{-6}$ | $6.5 \cdot 10^{16}$ | 1150 | $5 \cdot 10^{16}$ | $1.9 \cdot 10^{17}$ | 0.3 |
| 3p | Ge | $6 \cdot 10^{-6}$ | $4.2 \cdot 10^{17}$ | 450 | $2 \cdot 10^{17}$ | $6.4 \cdot 10^{17}$ | 0.3 |
| 4p | Ge | $1.5 \cdot 10^{-5}$ | $2.8 \cdot 10^{18}$ | 247 | $6 \cdot 10^{17}$ | $3.4 \cdot 10^{18}$ | 0.18 |
| 5p | Ge | $4.5 \cdot 10^{-4}$ | $1.3 \cdot 10^{19}$ | 230 | $2 \cdot 10^{18}$ | $1.6 \cdot 10^{19}$ | 0.12 |
| 6p | Cd | $3 \cdot 10^{-6}$ | $3.9 \cdot 10^{16}$ | 850 | $2 \cdot 10^{16}$ | $9 \cdot 10^{16}$ | 0.2 |
| 7p | Zn | $6.7 \cdot 10^{-5}$ | $2.5 \cdot 10^{17}$ | 620 | $2 \cdot 10^{16}$ | $4.2 \cdot 10^{17}$ | 0.05 |
| 8p | Zn | $1.9 \cdot 10^{-4}$ | $3.7 \cdot 10^{17}$ | 186 | $2 \cdot 10^{16}$ | $6.2 \cdot 10^{17}$ | 0.03 |
| 1n | Te | $1 \cdot 10^{-5}$ | $8 \cdot 10^{16}$ | 2800 | $2.5 \cdot 10^{17}$ | $5 \cdot 10^{16}$ | 0.2 |
| 2n | Te | $1.6 \cdot 10^{-4}$ | $7.9 \cdot 10^{17}$ | 4400 | $8.5 \cdot 10^{17}$ | $5 \cdot 10^{16}$ | 0.06 |
| 3n | Te | $4 \cdot 10^{-4}$ | $3.7 \cdot 10^{18}$ | 2800 | $4 \cdot 10^{18}$ | $5 \cdot 10^{16}$ | 0.01 |

Полученные результаты позволяют определить коэффициент сегрегации $C = C_{тв}/C_{ж}$ примесей Ge, Cd, Zn и Te в твердых растворах GaInSbAs. Концентрация атомов в твердой фазе $C_{тв} = N_A - N_A^0$ или $C_{тв} = N_D - N_D^0$. Концентрация атомов в жидкой фазе $C_{ж} = \frac{N}{V}$ (N — концентрация атомов примесей в навеске, V — объем навески). Расчет показал, что $C_{Ge} \approx 0.2$; $C_{Cd} \approx 0.03$; $C_{Zn} \approx 0.04$; $C_{Te} \approx 0.7$.

Таким образом, исследование твердых растворов GaInSbAs, легированных примесями Ge, Cd, Zn и Te, показало, что среди акцепторных примесей только Ge позволяет получить материал p -типа с высокой концентрацией дырок ($p \geq 10^9$ см⁻³), и, несмотря на амфотерность Ge, степень компенсации в таком материале $K = N_D/N_A \leq 0.3$. Примеси Cd и Zn можно использовать только при низком уровне легирования (меньше чем $5 \cdot 10^{-5}$ мол%), так как при дальнейшем легировании они плохо растворяются. При легировании Te перекомпенсация происходит при $5 \cdot 10^{-5}$ мол% Te в расплаве. Имеется возможность получения материала n -типа в широком интервале концентраций ($n \leq 10^{18}$ см⁻³) с малой степенью компенсации ($K = N_A/N_D \leq 0.1$), что позволяет использовать этот материал для производства приборов.

Список литературы

- [1] Баранов А. Н., Джуртанов Б. Е., Именков А. Н., Шерстнев В. В., Яковлев Ю. П. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 12. С. 2217—2221.
- [2] Андаслаева А., Баранов А. Н., Гусейнов А., Именков А. Н., Литвак А. М., Филаретова Г. М., Яковлев Ю. П. // Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 9. С. 845—849.
- [3] Баранов А. Н., Дахно А. Н., Джуртанов Б. Е., Лагунова Т. С., Сиповская М. А., Яковлев Ю. П. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 1. С. 98—103.
- [4] Баранов А. Н., Воронина Т. И., Дахно А. Н., Джуртанов Б. Е., Лагунова Т. С., Сиповская М. А., Яковлев Ю. П. // ФТП. 1990. Т. 24. С. 6. С. 920—925.
- [5] Джуртанов Б. Е. // Автореф. канд. дисс. Л., 1989.
- [6] Баранов А. Н., Воронина Т. И., Лагунова Т. С., Тимченко И. Н., Чугуева З. И., Шерстнев В. В., Яковлев Ю. П. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 5. С. 780—786.
- [7] Вуль А. Я., Бир Г. Л., Шмарцев Ю. В. // ФТП. 1970. Т. 4. В. 12. С. 2331—2346.
- [8] Маделунг О. Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп. М., 1967. 482 с.