

©1994 г.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ GaAlSb И GaAlSbAs

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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021, Санкт-Петербург, Россия  
(Получена 29 апреля 1994 г. Принята к печати 10 мая 1994 г.)

Исследованы электрические свойства эпитаксиальных пленок твердых растворов  $\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{Sb}$  и  $\text{Ga}_{0.66}\text{Al}_{0.34}\text{SbAs}$ , выращенных на подложках  $n\text{-GaSb}$ . Показано, что как тройные, так и четверные твердые растворы имеют  $p$ -тип проводимости ( $p \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 77 \text{ К}$ ). При легировании твердых растворов германием можно получить материал с концентрацией  $p \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , несмотря на аморфные свойства германия. Определен коэффициент сегрегации германия, который составляет  $\approx 0.2$ .

Интерес к исследованию изопериодных твердых растворов GaAlSb и GaAlSbAs обусловлен тем, что эти материалы широко используются при создании оптоэлектронных приборов в инфракрасной области спектра (1.3–2.5 мкм), в том числе лазеров [1], светодиодов [2], быстродействующих фотодиодов [3], лавинных фотодиодов [4] и др. Для разработки таких приборов необходимо знание оптических и электрических свойств данных твердых растворов и их зависимость от состава. Оптические свойства GaAlSbAs детально изучались, например, в [5]. Однако сообщения об исследовании электрических свойств многокомпонентных твердых растворов GaAlSb и GaAlSbAs в литературе практически отсутствуют.

В данной работе исследуются электрические свойства эпитаксиальных пленок твердых растворов состава  $\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{Sb}$  и  $\text{Ga}_{0.66}\text{Al}_{0.34}\text{SbAs}$  выращенных на подложках  $n\text{-GaSb}$ . Толщина пленок GaAlSbAs составляла 7–10 мкм, а GaAlSb — до 100 мкм. Пленка от подложки была изолирована потенциальным барьером или подложка удалялась. Измерялись коэффициент Холла  $R$ , электропроводность  $\sigma$ , подвижность  $u = R\sigma$  в интервале температур 77–300 К как в чистых нелегированных образцах, так и в образцах, легированных германием. Параметры образцов приведены в таблице.

Нелегированные как тройные, так и четверные твердые растворы имели  $p$ -тип проводимости. При  $T = 77 \text{ К}$  концентрация дырок в GaAlSb составляла  $p = 8.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , подвижность  $u = 2600 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ;

Основные параметры исследованных образцов

№ образца	Ge мол %	T = 300 K		T = 77 K		N <sub>I</sub> , см <sup>-3</sup>	N <sub>Al</sub> , см <sup>-3</sup>	N <sub>D</sub> , см <sup>-3</sup>	K = N <sub>D</sub> /N <sub>A</sub>
		p, см <sup>-3</sup>	u, см <sup>2</sup> /B·с	p, см <sup>-3</sup>	u, см <sup>2</sup> /B·с				
GaAlSb									
1	-	5.6 · 10 <sup>16</sup>	670	8.2 · 10 <sup>15</sup>	2600	2.7 · 10 <sup>16</sup>	1.7 · 10 <sup>16</sup>	1 · 10 <sup>16</sup>	0.58
2	1.5 · 10 <sup>-3</sup>	1.3 · 10 <sup>17</sup>	575	6.9 · 10 <sup>16</sup>	1090	1.5 · 10 <sup>17</sup>	1.1 · 10 <sup>17</sup>	4 · 10 <sup>16</sup>	0.36
3	2.9 · 10 <sup>-2</sup>	2.5 · 10 <sup>18</sup>	314	2.6 · 10 <sup>18</sup>	340	2.8 · 10 <sup>18</sup>	2.7 · 10 <sup>18</sup>	1 · 10 <sup>17</sup>	0.04
4	3.1 · 10 <sup>-2</sup>	2.8 · 10 <sup>18</sup>	240	3.6 · 10 <sup>18</sup>	208	4.4 · 10 <sup>18</sup>	4 · 10 <sup>18</sup>	4 · 10 <sup>17</sup>	0.1
5	1.1 · 10 <sup>-1</sup>	1.3 · 10 <sup>19</sup>	180	1.3 · 10 <sup>19</sup>	214	1.36 · 10 <sup>19</sup>	1.3 · 10 <sup>19</sup>	6 · 10 <sup>17</sup>	0.05
6	1.1 · 10 <sup>-1</sup>	1.3 · 10 <sup>19</sup>	145	1 · 10 <sup>19</sup>	240	1 · 10 <sup>19</sup>	9 · 10 <sup>18</sup>	5 · 10 <sup>17</sup>	0.06
7	1.4 · 10 <sup>-1</sup>	9 · 10 <sup>18</sup>	195	9 · 10 <sup>18</sup>	244	9 · 10 <sup>18</sup>	8.4 · 10 <sup>18</sup>	6 · 10 <sup>17</sup>	0.05
8	2.2 · 10 <sup>-1</sup>	1.3 · 10 <sup>19</sup>	210	1.3 · 10 <sup>19</sup>	233	1.3 · 10 <sup>19</sup>	1.3 · 10 <sup>19</sup>	6 · 10 <sup>17</sup>	0.05
GaAlSbAs									
9	-	6 · 10 <sup>16</sup>	300	1.5 · 10 <sup>16</sup>	1130	1 · 10 <sup>17</sup>	5.7 · 10 <sup>16</sup>	1.3 · 10 <sup>16</sup>	0.75
10	2.2 · 10 <sup>-3</sup>	9.3 · 10 <sup>16</sup>	290	1.6 · 10 <sup>16</sup>	1090	1.1 · 10 <sup>17</sup>	4.6 · 10 <sup>16</sup>	6.4 · 10 <sup>16</sup>	0.72
11	4.4 · 10 <sup>-3</sup>	3.4 · 10 <sup>17</sup>	220	6.9 · 10 <sup>16</sup>	670	2.1 · 10 <sup>17</sup>	1.4 · 10 <sup>17</sup>	7 · 10 <sup>16</sup>	0.5
12	3 · 10 <sup>-2</sup>	1.8 · 10 <sup>18</sup>	178	1.8 · 10 <sup>18</sup>	190	4.6 · 10 <sup>18</sup>	3.2 · 10 <sup>18</sup>	1.4 · 10 <sup>18</sup>	0.3
13	7 · 10 <sup>-2</sup>	3.7 · 10 <sup>18</sup>	160	3.7 · 10 <sup>18</sup>	196	7.3 · 10 <sup>18</sup>	5.5 · 10 <sup>18</sup>	1.8 · 10 <sup>18</sup>	0.32
14	1.4 · 10 <sup>-1</sup>	6.7 · 10 <sup>18</sup>	134	6.7 · 10 <sup>18</sup>	163	1.2 · 10 <sup>19</sup>	9.5 · 10 <sup>18</sup>	2.5 · 10 <sup>18</sup>	0.26

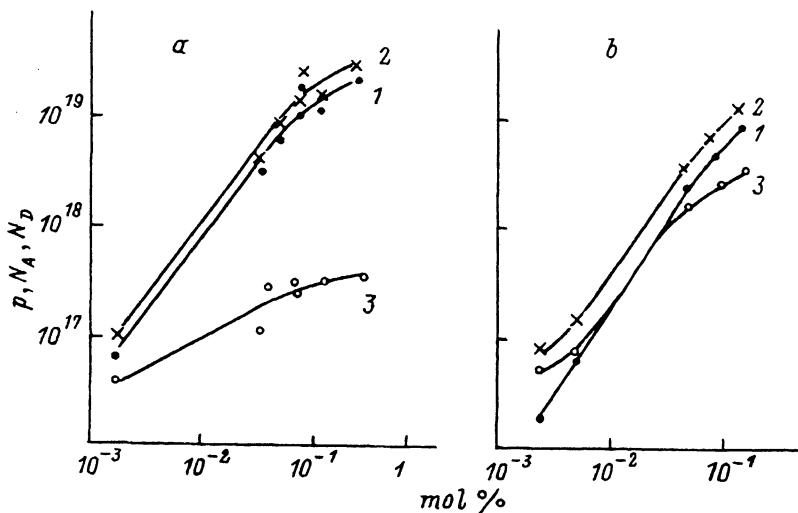


Рис. 1. Зависимость концентрации дырок  $p$  при  $T = 77$  К (1) акцепторов  $N_A$  (2) и доноров  $N_D$  (3) от степени легирования германием; а — GaAlSb, б — GaAlSbAs.

в GaAlSbAs  $p = 1.5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>,  $u = 1100$  см<sup>2</sup>/В·с. При легировании германием тип проводимости сохранялся, а с ростом уровня легирования концентрация дырок непрерывно увеличивалась и могла достигать значений  $p \approx 10^{19}$  см<sup>-3</sup> (рис. 1).

На рис. 2 представлена температурная зависимость коэффициента Холла. В исходных нелегированных образцах 1 и 9 четко видны два экспоненциальных наклона, соответствующих энергиям активации: при низких температурах в диапазоне  $T = (77-180)$  К  $E_{A1} = 0.009-0.01$  эВ, при  $T > 180$  К  $E_{A2} \approx 0.03$  эВ. Точно такие же наклоны в температурной зависимости  $R$  наблюдались также для  $p$ -GaSb [6] и связывались с мелкими водородоподобными уровнями неконкурируемых примесей с энергией активации  $E_{A1}$ , а уровни с энергией  $E_{A2}$  — со структурными дефектами типа «вакансия галлия и галлий на месте сурьмы» [ $V_{Ga}GaSb$ ]. Можно предполагать, что природа наблюдаемых энергетических уровней в GaAlSb и GaAlSbAs одинаковая, так как в основе состава твердого раствора преобладают компоненты Ga и Sb.

При легировании германием наклоны в низкотемпературной области уменьшаются и при  $p \approx 10^{18}$  см<sup>-3</sup> вообще исчезает зависимость  $R$  от  $T$ . Уменьшение  $E_{A1}$  с ростом концентрации акцепторов  $N_A$ , согласно водородоподобной модели, связано с перекрытием волновых функций примесных атомов и подчиняется закону:  $E_{A1} = E_0(1 - \alpha N_A^{1/3})$ , где энергия активации  $E_0 = 13.5 m_p^* / \kappa^2 m_0$  (эВ);  $m_p^*$  — эффективная масса дырок,  $\kappa$  — диэлектрическая постоянная. В  $p$ -GaAlSb и GaAlSbAs величина  $E_0$ , определенная из зависимости  $E_{A1}$  от концентрации акцепторов, так же как в  $p$ -GaSb [6], оказалась близкой к 0.02 эВ. Полагая, что  $\kappa = 15.7$  (аналогично GaSb), по значениям  $E_0$  можно оценить величину эффективной массы дырок  $m_p^* = 0.4 m_0$  в  $p$ -GaAlSb и в  $p$ -GaAlSbAs. Эти значения эффективной массы были использованы при анализе подвижности носителей тока.

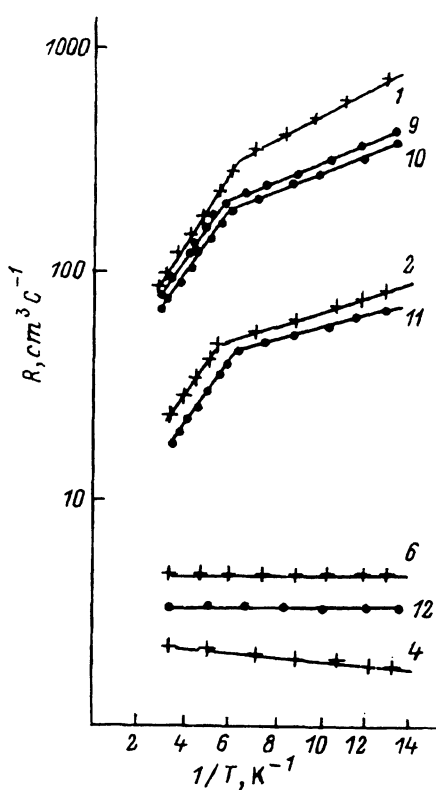


Рис. 2. Зависимость коэффициента Холла от температуры в твердых растворах GaAlSb и GaAlSbAs. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

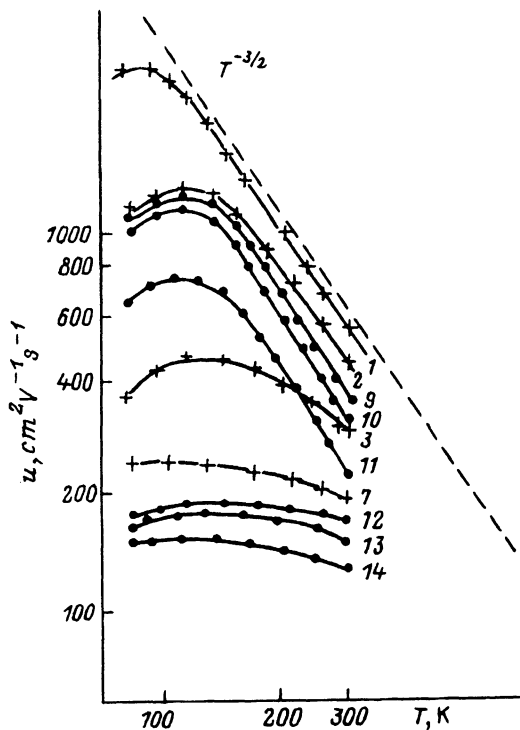


Рис. 3. Зависимость подвижности от температуры в твердых растворах GaAlSb и GaAlSbAs. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

Подвижность носителей тока в зависимости от температуры представлена на рис. 3. В исходных нелегированных образцах 1 и 9 при  $T > 150$  К подвижность падает с ростом температуры  $\sim T^{-3/2}$ , что может быть связано с рассеянием носителей тока на колебаниях решетки. Если считать, что полная экспериментальная подвижность  $u_{\text{exp}}$  при более низких температурах определяется только рассеянием на ионах примеси и решетке  $1/u_{\text{exp}} = 1/u_I^{\text{exp}} + 1/u_L$ , то можно выделить ионную составляющую подвижности  $u_I^{\text{exp}}$  при  $T = 77$  К.

Сопоставляя ее с теоретической подвижностью Брукса-Херринга [7]

$$u_I = 3.2 \cdot 10^{15} (m_0/m_p^*)^{1/2} \kappa^2 T^{3/2} / N_I [\ln(1+b) - b/(b+1)];$$

$$b = 1.3 \cdot 10^{14} \kappa m_p^* T^2 / m_0 p, \quad (1)$$

можно определить полную концентрацию ионов примесей  $N_I = u_I p_{77} / u_I^{\text{exp}}$ , где  $p_{77}$  — концентрация дырок при  $T = 77$  К, а из уравнений  $N_I = N_A + N_D$  и  $p_{77} = N_A - N_D$  найти отдельно концентрацию акцепторов  $N_A$ , доноров  $N_D$  и степень их компенсации  $K = N_D/N_A$  (см. таблицу).

При слабом легировании германием характер зависимости  $u(T)$  сохраняется (образцы 2, 3, 10, 11), однако значения подвижности занижены во всем интервале температур, что может быть связано со скоплениями примесей и дефектов [8]. Полагая, что при  $T = 300$  К вклад ионной составляющей в подвижность, согласно формуле (1), незначителен, и сопоставлял экспериментальную подвижность с подвижностью для рассеяния на колебаниях решетки, можно выделить влияние на подвижность этих скоплений и учесть их при определении ионной составляющей подвижности при  $T = 77$  К. Так же, как в нелегированных образцах, можно определить  $N_I$ ,  $N_A$ ,  $N_D$  и  $K$  (см. таблицу).

При высоком уровне легирования, когда концентрация дырок  $p > 10^{18}$  см $^{-3}$ , подвижность слабо зависит от температуры (образцы 3-7 и 12-14), что связано с вырождением электронно-дырочного газа. В этих образцах была использована формула Брукса-Херринга для вырожденного электронно-дырочного газа:

$$u_I = 0.2\chi^2(m_0/m_p^*)^2 p/N_I[\ln(1+b) - b/(b+1)],$$

$$b = 5.1 \cdot 10^{-8} \chi m_0/m_p^* p^{1/3}. \quad (2)$$

Аналогично были определены значения  $N_I$ ,  $N_A$ ,  $N_D$  и  $K$  (см. таблицу).

В таблице и на рис. 1 видно, что германий в твердых растворах GaAlSb и GaAlSbAs проявляет амфотерные свойства: одновременно с преобладающим ростом концентрации акцепторов растет и концентрация доноров, причем только при сильном уровне легирования ( $p > 10^{18}$  см $^{-3}$ ) начинается замедление роста концентрации доноров. Такое же поведение германия наблюдалось в четверном твердом растворе  $p$ -GaInSbAs, выращенном на подложках  $n$ -GaSb [9].

Полученные данные позволяют определить коэффициент сегрегации  $C = C_{\text{sol}}/C_{\text{liq}}$  германия в твердых растворах GaAlSb и GaAlSbAs. Концентрация атомов в твердой фазе  $C_{\text{sol}} = (N_A - N_A^0) + (N_D - N_D^0)$  ( $N_A^0$  и  $N_D^0$  — концентрации акцепторов и доноров в исходном материале), в жидкой фазе —  $C_{\text{liq}} = N/V$  ( $N$  — концентрация атомов примеси  $V$  — объем). Коэффициент сегрегации оказался равным  $C = 0.15-0.2$  для GaAlSb и GaAlSbAs и приблизительно такой же, как и в твердом растворе GaInSbAs [9].

Таким образом, полученные результаты указывают на общность электрических свойств тройных и четверных твердых растворов, близких по составу к GaSb:

- 1) все они имеют, как и бинарный GaSb,  $p$ -тип проводимости;
- 2) концентрация дырок уменьшается при включении в систему Al или In;
- 3) во всех соединениях сохраняется структурный дефект  $[V_{\text{Ga}}\text{GaSb}]$ ;
- 4) германий хорошо растворяется в твердых растворах и позволяет получать материалы с высокой концентрацией дырок ( $p \approx 10^{19}$  см $^{-3}$ ).

## Список литературы

- [1] А.Н. Баранов, Б.Е. Джуртанов, А.Н. Именков, Ю.М. Шерняков, Ю.П. Яковлев. Письма в ЖТФ, **12**, 557 (1986).
- [2] А.А. Андаспаева, А.Н. Баранов, А.А. Гусейнов, А.Н. Именков, Н.М. Колчанова, Е.А. Сидоренкова, Ю.П. Яковлев. Письма в ЖТФ, **15**, 71 (1989).
- [3] И.А. Андреев, А.Н. Баранов, М.З. Шингарев, В.И. Корольков, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев. ФТП, **19**, 1605 (1985).
- [4] И.А. Андреев, М.А. Афрайлов, А.Н. Баранов, С.Г. Конников, М.А. Мирсагатов, М.П. Михайлова, О.В. Салата, В.Е. Уманский, Г.М. Филаретова, Ю.П. Яковлев. Письма в ЖТФ, **15**, 15 (1989).
- [5] S. Adachi. J. Appl. Phys., **61**, 4869 (1987).
- [6] А.Н. Баранов, Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, И.Н. Тимченко, З.И. Чугуева, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **23**, 780 (1989).
- [7] Ф. Блатт. *Теория подвижности электронов в твердых телах* (М., Физматгиз, 1963).
- [8] А.Н. Дахно, О.В. Емельяненко, Т.С. Лагунова, С.П. Старосельцева. ФТП, **13**, 1788 (1979).
- [9] Т.И. Воронина, Б.Е. Джуртанов, Т.С. Лагунова, Ю.П. Яковлев. ФТП, **25**, 283 (1991).

Редактор Т.А. Полянская

---