

Используя критерий Рауса—Гурвица [11] и тот факт, что параметры a , a_1 , b , c , s , β положительные, получим, что стационарное решение будет неустойчивым в следующей области параметров:

$$c\beta > s(a + a_1 + b) + ba. \quad (6)$$

В терминах исходной задачи получим следующее условие, при выполнении которого возникает неустойчивость:

$$\beta > [s(a/\gamma + M - m_s + Q_s + n_s) + a(Q_s + n_s)] / (Q_s' m_s). \quad (7)$$

Таким образом, при напряженности поля, превосходящей E_{xp} , наступает неустойчивость

$$E_{xp}^2 = \frac{\rho c_v [s(a/\gamma + M - m_s + Q_s + n_s) + a(Q_s + n_s)]}{e\mu Q_s' m_s}. \quad (8)$$

В области неустойчивости рост величин n , m , T со временем приводит к тому, что задача становится нелинейной. В результате этого должны возникать нелинейные колебания, поскольку данная задача эквивалентна случаю, рассмотренному в работе [10]. Электрический джоулев пробой возникает при больших значениях приложенного электрического поля, когда температура достигает такого значения, что становится необходимым учитывать тепловой переход электронов из валентной зоны в зону проводимости.

Список литературы

- [1] Кэррол Дж. СВЧ генераторы на горячих электродах. М., 1972. 382 с.
- [2] Волков А. Ф., Коган Ш. М. // УФН. 1968. Т. 96. В. 4. С. 633—672.
- [3] Басс Ф. Г., Бочков В. С., Гуревич Ю. Г. // ЖЭТФ. 1970. Т. 58. В. 5. С. 1814—1824.
- [4] Бараненков А. И., Осипов В. В. // Микроэлектроника. 1972. Т. 1. В. 1. С. 63—66.
- [5] Чайка Г. Е. // ФТП. 1972. Т. 6. В. 1. С. 142—147.
- [6] Чайка Г. Е. // ФТП. 1974. Т. 8. В. 4. С. 646—651.
- [7] Глущенко А. А., Жук В. Л., Чайка Г. Е. // Электронное моделирование. 1981. В. 2. С. 99—100.
- [8] Глущенко А. А., Чайка Г. Е., Жук В. Л. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 5. С. 935—937.
- [9] Тагер А. С., Вальд-Перлов В. М. Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ. М., 1968. 480 с.
- [10] Vinetskii V. L., Shaknovtsova S. I., Konozenko I. D. // Phys. St. Sol. 1970. V. 42. N 1. P. 95—103.
- [11] Кострикин А. И. Введение в алгебру. М., 1977. 289 с.

Одесский электротехнический институт связи
им. А. С. Попова

Получено 8.08.1989
Принято к печати 10.09.1990

ФТП, том 25, вып. 2, 1991

ДЕФЕКТЫ С ГЛУБОКИМИ УРОВНЯМИ В GaAs, ВЫРАЩЕННОМ ИЗ РАСТВОРА-РАСПЛАВА Ga—Bi

Брунков П. Н., Гайбуллаев С., Конников С. Г., Никитин В. Г.,
Папенцев М. И., Соболев М. М.

За последнее время вышло немало работ [1—3], посвященных выращиванию эпитаксиальных слоев GaAs из раствора-расплава в висмуте, что связывается в основном с возможностью этой технологии по снижению концентрации фоновой примеси. Было установлено, что эффект «очистки» GaAs от мелких примесей зависит от количества Bi (x_{Bi}^0 , ат. доли) в составе растворителя. Однако в литературе отсутствуют данные о влиянии висмута на состав и концентрацию дефектов с глубокими уровнями. Проведение такой работы особенно важно

для GaAs, полученного методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), так как известно, что при выращивании GaAs из раствора-расплава в Ga образуются только две дырочные ловушки A и B [4] (HL2 и HL5 [5]). Природа этих собственных дефектов до сегодняшнего дня не ясна. Авторы работы [6], используя результаты фотоемкостных измерений, сделали вывод о связи уровней HL2 и HL5 с двумя различными зарядовыми состояниями изолированного antisite-дефекта Ga_{As}. Впоследствии это было опровергнуто [7] и высказано предположение о том, что эти уровни соответствуют разным комплексам дефектов, включающих Ga_{As}. В работе [8] было показано, что уровни HL2 и HL5 принадлежат разным дефектам, так как их концентрации по-разному зависят от скорости роста эпитаксиальных слоев.

В данной работе исследовались слои GaAs, выращенные методом ЖФЭ при изменении атомной доли Bi в составе растворителя от $x_{Bi}^{\text{р}}=0$ до $x_{Bi}^{\text{р}}=1.0$ ат.

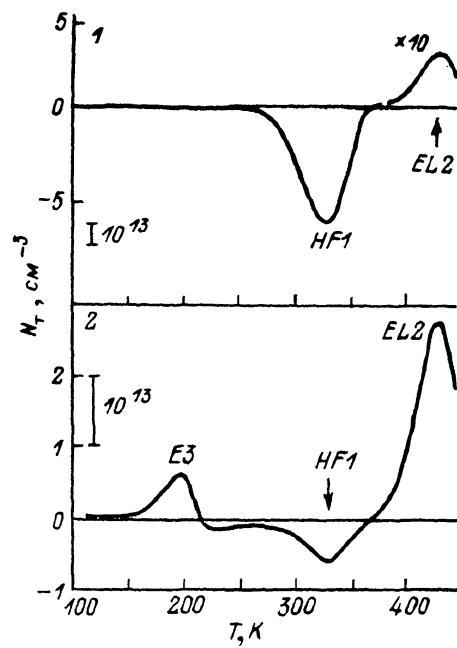
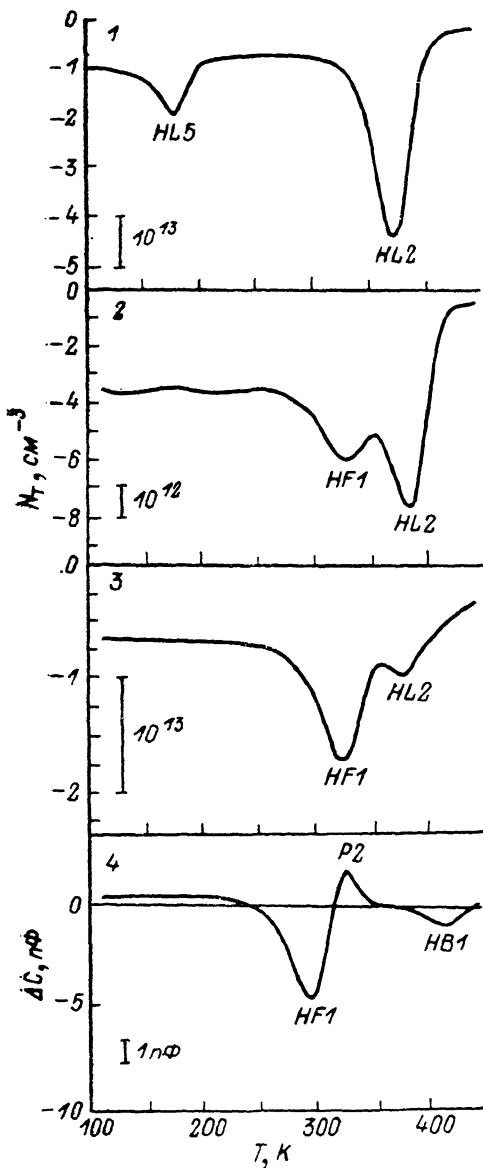


Рис. 1.

а) DLTS-спектры, полученные на эпитаксиальных слоях GaAs, выращенных при $T_{\text{н кр}}=760$ °C для разных составов раствора-расплава Ga-Bi, ат. доли: 1 - $x_{Bi}^{\text{р}}=0$, 2 - $x_{Bi}^{\text{р}}=0.8$, 3 - $x_{Bi}^{\text{р}}=0.9$, 4 - $x_{Bi}^{\text{р}}=1.0$. Окно темпов - 200 с⁻¹.

б) DLTS-спектры, полученные на эпитаксиальных слоях GaAs, выращенных при $T_{\text{н кр}}=700$ °C для $x_{Bi}^{\text{р}}=1.0$ ат. доли, до (1) и после (2) отжига при $T_0=500$ °C в течение 30 мин в потоке Ar.

доли. Показано, что помимо снижения концентрации ($N_d - N_a$) (где N_d, N_a - концентрации мелких донорных и акцепторных примесей) происходит также уменьшение концентрации глубоких уровней HL2 (A) и HL5 (B). При $x_{Bi}^{\text{р}} > 0.6$ ат. доли наблюдается образование новой дырочной ловушки, названной нами HF1, концентрация которой растет при приближении $x_{Bi}^{\text{р}}$ к 1.

Нелегированные эпитаксиальные слои выращивались на подложках GaAs: Sn n^+ -типа ($n^+ \approx 2.0 \cdot 10^{17}$ см⁻³) с ориентацией <100>. Температура начала кри-

стабилизации $T_{\text{нкр}}$ изменялась от 650 до 800 °С. Толщины слоев составляли 15–20 мкм. Для получения $p^+ - n$ -перехода на n -слое сверху эпитаксиально наращивался p^+ -слой GaAs, который легировался Ge [$p^+ \approx (1-3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$]. $C-V$ и DLTS-измерения проводились на частоте 1 МГц с помощью спектрометра DL4600 фирмы «BIO-RAD».

В DLTS-спектрах эпитаксиальных n -слоев GaAs, выращенных при $T_{\text{нкр}} = 760 \text{ °С}$ с $x_{\text{Bi}}^{\text{ж}} \leq 0.4$ ат. доли [рис. 1, а (спектр I)], наблюдалось два пика, связанных с ловушками неосновных носителей и расположенных в нижней половине запрещенной зоны. Идентификация по линии Аррениуса (см. таблицу) показала, что мы наблюдали известные ловушки *HL2* и *HL5* [5]. Концентрация

уровня *HL2*, определенная из DLTS-измерений, при всех значениях $x_{\text{Bi}}^{\text{ж}}$ была примерно в 2 раза больше концентрации уровня *HL5*. С ростом содержания Bi в жидкой фазе $x_{\text{Bi}}^{\text{ж}}$ от 0 до 0.9 ат. доли (рис. 2) происходило линейное (более чем на порядок) уменьшение концентрации уровней *HL2* и *HL5*, тогда как концентрация ($N_d - N_a$) сократилась только в 5 раз. Ранее в работе [1] уже наблюдали

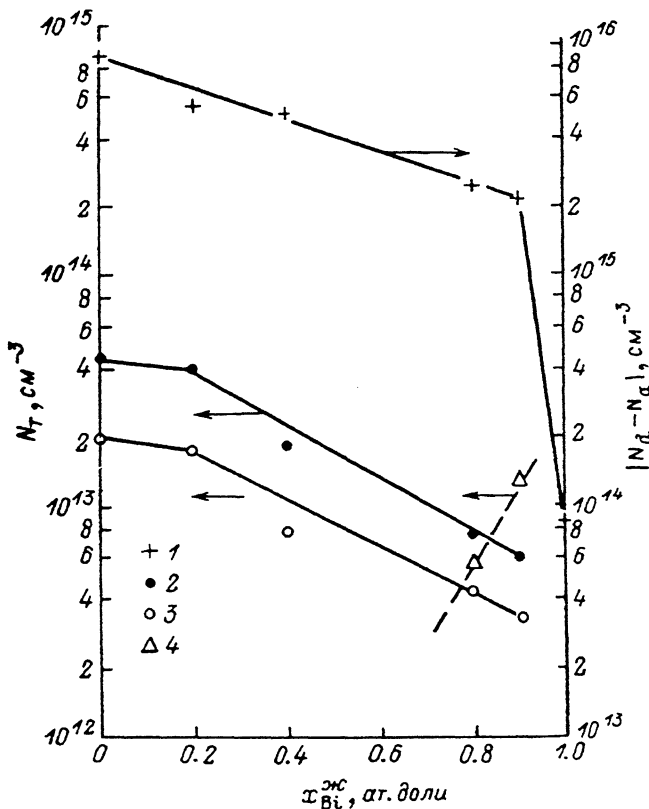


Рис. 2. Зависимость концентрации свободных носителей ($N_d - N_a$) (1) и концентрации глубоких уровней *HL2* (2), *HL5* (3) и *HFI* (4) в эпитаксиальных слоях GaAs, выращенных при $T_{\text{нкр}} = 760 \text{ °С}$, от состава раствора-расплава $x_{\text{Bi}}^{\text{ж}}$.

сближение концентрации фоновой примеси с ростом $x_{\text{Bi}}^{\text{ж}}$ в составе растворителя. Авторы [1] связывали эффект очистки с повышением содержания мышьяка в жидкой фазе по отношению к галлию, что должно приводить к уменьшению концентрации вакансий мышьяка V_{As} . Отсюда следует, что уровни *HL2* и *HL5* могут быть связаны с комплексами собственных дефектов, в состав которых входит V_{As} .

В образцах, выращенных в области составов расплава с $x_{\text{Bi}}^{\text{в}} > 0.6$ ат. доли, наблюдается появление новой дырочной ловушки *HF1* [рис. 1, а (спектры 2—4)], параметры которой приведены в таблице. Ранее мы уже наблюдали этот уровень в эпитаксиальных слоях GaAs, выращенных при $x_{\text{Bi}}^{\text{в}}=1.0$ ат. доли в составе жидкой фазы [9], а также в нелегированном GaAs после термообработки при температуре $T=950$ °С в потоке водорода. Энергия оптической активации, полученная из спектральной характеристики этого уровня [9], равнялась $E_0=0.36$ эВ. Концентрация уровня *HF1* резко возрастала при увеличении содержания висмута в составе раствора-расплава (рис. 2) и при $x_{\text{Bi}}^{\text{в}}=1.0$ ат. доли сравнивалась с концентрацией (N_a-N_d). В эпитаксиальном слое GaAs происходило образование *i*-области толщиной 13—14 мкм, компенсация которой определялась уровнем *HF1*, что не позволило определить точную концентрацию этого уровня из DLTS-измерений. При $x_{\text{Bi}}^{\text{в}} > 0.9$ ат. доли и $T_{\text{н.кр}} > 700$ °С в DLTS-спектре [рис. 1, а (спектр 4), 1, б (спектр 1)] наблюдалось появление двух электронных ловушек, близких по параметрам к дефектам *EL2* [11] и *P2* [12], а также дырочной ловушки *HBI*, которая связывалась с примесью Cr [5]. Уменьшение температуры начала кристаллизации $T_{\text{н.кр}} < 700$ °С приводило к снижению концентрации уровней *EL2* и *HF1* до $N_{\text{EL2}}=3.0 \cdot 10^{12}$ и $N_{\text{HF1}}=1.1 \cdot 10^{14}$ см⁻³ [рис. 1, б (спектр 1)], одновременно происходило исчезновение компенсированной *i*-области. При $T_{\text{н.кр}} \approx 650$ °С и $x_{\text{Bi}}^{\text{в}}=1.0$ ат. доли наблюдалась инверсия типа проводимости: вырастал *p*-слой с $(N_a-N_d) = (3 \div 4) \cdot 10^{14}$, $N_{\text{HF1}}=4.0 \cdot 10^{13}$ и $N_{\text{EL2}}=1.5 \cdot 10^{13}$ см⁻³. Приведенные выше данные подтверждают вывод работы [2] о том, что инверсия типа проводимости связана с изменением коэффициента сегрегации мелких примесей, а не с увеличением концентрации акцепторных дефектов с ГУ.

Для исследования термостабильности ГУ был проведен отжиг образцов, выращенных из чистого Ga и Bi раствора-расплава при $T_{\text{н.кр}} > 700$ °С. Образцы обкладывались сверху и снизу пластинами GaAs. Отжиг проводился в потоке Ar в течение 30 мин, после чего происходило медленное охлаждение в режиме выключенной печи (около 30 мин) до температуры $T=100$ °С. При отжиге $T_0 > 400$ °С в GaAs, выращенном при $x_{\text{Bi}}^{\text{в}}=1.0$ ат. доли, произошло образование ловушки основных носителей [рис. 1, б (спектр 2)], которая близка по параметрам (см. таблицу) уровням *E3* [10] и *EL5* [11]. Уровень *E3* образуется при радиационном облучении и связывается с комплексом $V_{\text{As}}-\text{As}_i$. В GaAs, выращенном при $x_{\text{Bi}}^{\text{в}}=0$ ат. доли, уровень *EL5* также был обнаружен после отжига. Появление этого уровня в обоих образцах, по-видимому, может быть связано с улетом As. В образцах GaAs, выращенных из висмутитового угла, после термообработки наблюдались одновременные уменьшение концентрации уровня *HF1* и рост *EL2* [рис. 1, б (спектр 2)]. Появление уровня *HF1*, так же как и *EL2*, может быть связано с изменением состава расплава в сторону увеличения содержания As по отношению к Ga, которое приводит к спаду концентраций уровней *HL2* и *HL5*. На основании этого можно предположить, что в образовании дефекта *HF1* должна принимать участие V_{Ga} , а может быть и As_i . Проведенная термообработка показывает, что природа его близка к природе дефекта *EL2*.

Таким образом, в результате проведенной работы установлено влияние содержания Bi в растворе-расплаве при выращивании GaAs методом ЖФЭ на концентрацию собственных дефектов *HL2* и *HL5*, а также обнаружена новая дырочная ловушка *HF1*, образование которой связывается с V_{Ga} .

Список литературы

- [1] Бирюлин Ю. Ф., Воробьева В. В., Голубев В. Г., Иванов-Омский В. И., Новиков С. В., Осугин А. В., Савельев И. Г., Чалдышев В. В., Шмарцев Ю. В., Ярошевич О. В. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 12. С. 2204—2207.
- [2] Бирюлин Ю. Ф., Никитин В. Г., Нугманов Д. Л., Чалдышев В. В. // Письма ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 20. С. 1255—1259.
- [3] Якушева Н. А., Журавлев К. С., Шегай О. А. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 11. С. 2083—2086.
- [4] Lang D. V. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 7. P. 3023—3032.
- [5] Mitonneau A., Martin G. M., Mircea A. // Electron. Lett. 1977. V. 13. N 13. P. 666—668.
- [6] Wang Zhan-Guo, Ledebro L.-A., Grimmeiss H. G. // J. Phys. C. 1984. V. 17. P. 259—272.

- [7] Nouailhat A., Bremond G., Guillot G. // Semicond. Sci. Technol. 1986. V. 1. N 1. P. 275—279.
- [8] Zou Yuanxi, Zhou Jicheng, Lu Yian, Wang Kuangyu, Hu Binghua, Lu Bingfang, Li Cuncai, Li Liansheng, Shao Jiuan // Mater. XIII Int. Conf. Def. Semicond. / Ed. by L. C. Kimerling, J. M. Pursey. Colorado, California, 1984. P. 1021—1027.
- [9] Соболев М. М., Брунков П. Н., Конников С. Г., Степанова М. Н., Никитин В. Г., Улин В. П., Долбая А. Ш., Камушадзе Т. Д., Маисурадзе Р. М. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 6. С. 1058—1065.
- [10] Pons D., Bourgoin J. C. // J. Phys. C. 1985. V. 18. P. 3839—3871.
- [11] Martin G. M., Mitonneau A., Mircea A. // Electron. Lett. 1977. V. 13. N 7. P. 191—193.
- [12] Pons D., Mircea A., Bourgoin J. C. // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. N 8. P. 4150—4157.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получено 7.08.1990
Принято к печати 18.09.1990

ФТП, том 25, вып. 2, 1991

ВЛИЯНИЕ Tm НА СВОЙСТВА ТЕЛЛУРИДА СВИНЦА

Акимов Б. А., Коробейникова Е. Н., Рябова Л. И., Тамм М. Е.

Использование редкоземельных (РЗЭ) элементов как легирующих добавок в PbTe и создание твердых растворов на основе теллурид свинца—теллурид РЗЭ позволяют изменять в широких пределах концентрацию носителей заряда, варьировать параметры энергетического спектра и магнитные характеристики исходного соединения $[1-3]$.

Сведений об использовании Tm как легирующей примеси и попытках синтезировать твердые растворы $Pb_{1-x}Tm_xTe$, насколько нам известно, до настоящего времени не имелось.

Для выбора условий роста монокристаллов $Pb_{1-x}Tm_xTe$ были исследованы растворимость тулия в теллуриде свинца по разрезу PbTe—TmTe, а также температура плавления сплавов в этой системе в области составов 0—13 мол% TmTe. В качестве шихты использовалась смесь теллурида свинца и монотеллурида тулия. TmTe представлял собой однофазный кристаллический слиток с параметром кубической ячейки $a = (6.33 \pm 0.03) \text{ \AA}$. Синтез TmTe осуществлялся по трехстадийной методике, описанной в работе [4].

Использованный для синтеза монокристаллический PbTe имел проводимость p -типа и концентрацию дырок $p \approx 1.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Полученные сплавлением поликристаллические образцы $Pb_{1-x}Tm_xTe$ отжигались при температуре 750 °С в течение 120 ч. С помощью рентгенодифрактометрического анализа установлено, что растворимость TmTe в PbTe не превышает 7—8 мол%.

Синтез монокристаллов PbTe(Tm) осуществлялся методами направленной кристаллизации расплава (НК) и из пара по механизму пар—жидкость—кристалл (ПЖК). Все полученные образцы обладали проводимостью n -типа. Электрофизические параметры, определенные с помощью эффекта Холла, приведены в таблице. Содержание Tm в кристаллах установлено химическими аналитическими методами, ошибка анализа составляла 10 %.

Характеристики исследованных образцов ($T = 4.2 \text{ K}$)

№ образца	Метод синтеза	Состав шихты, вес%	C_{Tm} , ат%	$n, \text{ см}^{-3}$	ρ , Ом·см	$\mu = R \chi / \rho$, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
1	НК	95 % PbTe + 5 % TmTe	3	$4.8 \cdot 10^{20}$	$2.1 \cdot 10^{-4}$	60
2	ПЖК	То же	0.8	$1.6 \cdot 10^{19}$	$8.8 \cdot 10^{-6}$	$4.4 \cdot 10^4$
3	ПЖК	85 % PbTe + 10 % TmTe + 5 % Te	2.8	$1.0 \cdot 10^{19}$	$5.7 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^4$
4	ПЖК + отжиг	То же	2.8	$3.0 \cdot 10^{18}$	$9.8 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^4$