

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ РАСПЛАВА- РАСТВОРА ГАДОЛИНИЕМ И АЛЮМИНИЕМ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ GaSb

Виноградова Г. И., Гогаладзе Д. Т., Лошинский А. М.,
Соловьева Е. В., Долгинов Л. М.

Методами эффекта Холла и фотолюминесценции исследованы эпитаксиальные слои антимонида галлия, легированного примесями Gd и Al, а также нелегированные слои в зависимости от состава и отжига раствора-расплава. Показано, что во всех указанных случаях происходит уменьшение концентрации акцепторных центров с энергиями ионизации $E_1 \sim 0.035$ и $E_2 \sim 0.08$ эВ. Предлагаются две модели, позволяющие объяснить полученные результаты.

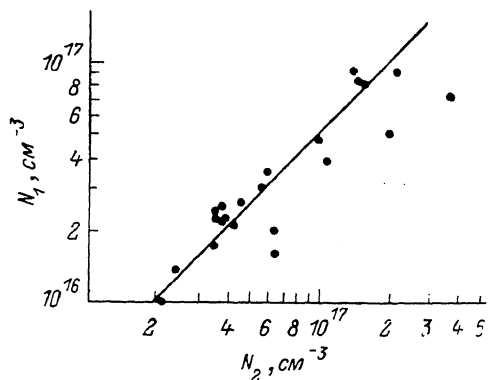
Высокая остаточная концентрация природных акцепторов в антимониде галлия существенно влияет на его люминесцентные и электрофизические свойства [1, 2]. Условиями проведения процесса жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) можно в значительной мере влиять на свойства получаемых эпитаксиальных слоев (ЭС). В частности, добавка в расплав изовалентных примесей приводит к изменению состава собственных точечных дефектов структуры кристаллов [3-6]. Возможно, что в этом направлении действует и добавка редкоземельных элементов [7, 8].

Цель настоящей работы — исследование влияния условий получения и легирования расплава галлий—сурьма гадолинием и алюминием на поведение электрически и рекомбинационно активных центров в ЭС GaSb. Исследовались также ЭС твердого раствора $Al_xGa_{1-x}Sb$, легированного гадолинием.

Слои выращивали методом ЖФЭ при разных температурах эпитаксии на подложках нелегированного p -GaSb, ориентированных в (100), из расплавов галлий—сурьма, обогащенных галлием, а для ряда экспериментов — из расплава, обогащенного сурьмой. Толщина ЭС составляла ~ 50 мкм. Электрические свойства слоев в интервале температур 77—500 К (эффект Холла, электропроводность) изучали после удаления подложки. Фотолюминесцентные исследования проводили при температурах 77 и 300 К по методике, изложенной в [4].

В исследованном диапазоне температур мелкий акцептор, характерный для нелегированного GaSb (энергия ионизации $E_a \sim 1.4 \cdot 10^{-2}$ эВ), экспериментально нами не наблюдался, так как он полностью ионизован. В этом температурном диапазоне имеет место ионизация двух более глубоких нескомпенсированных центров N_1 и N_2 с энергиями $E_1 \sim 0.035$ и $E_2 \sim 0.08$ эВ соответственно. Энергия ионизации этих центров определялась с использованием уравнения «мелкой ступеньки», полученного в [9]. Концентрация центров определялась по значениям концентраций на плато, и для специально не легированных слоев GaSb концентрация центров N_1 при комнатной температуре составляла $(2 \div 4) \times 10^{17}$ см $^{-3}$. Энергетические уровни E_1 и E_2 наблюдались ранее и предполагалось, что они являются уровнями некоторого двухзарядного центра [10, 11]. В этом случае следовало бы ожидать равенства концентраций $N_1 = N_2$. Как видно из рис. 1, во всех исследованных нами структурах $N_1 \approx 2N_2$, что противоречит предложенной модели.

В спектрах ФЛ нелегированных слоев GaSb при 77 К присутствовали две полосы излучения с максимумами $h\nu_{2-3} \sim 0.8$ эВ, обусловленным межзонной рекомбинацией, и $h\nu_1 \sim 0.78$ эВ, обусловленным рекомбинацией на центрах N_1 . Отношение интенсивностей этих полос I_A/I_{2-3} при 77 К и интенсивность ФЛ краевой полосы $I_{кр}$ при 300 К для нелегированных слоев, полученных при разных температурах эпитаксии (783—923 К), оставались практически без изменений, т. е. концентрации рекомбинационно активных центров N_1 и концентрации центров безызлучательной рекомбинации в этом случае не зависят от температуры эпитаксии.



Отсутствует также зависимость от температуры выращивания и электрических параметров нелегированных ЭС GaSb (см. таблицу).

Существенное изменение электрических и ФЛ свойств наблюдалось при исследовании слоев, выращенных из расплавов, легированных примесями Gd или Al. На рис. 2 представлены зависимости измеряемых параметров ρ ,

Рис. 1. Соотношение концентраций центров N_1 и N_2 .

N_1 , $I_{кр}$, I_A/I_{2-3} от содержания примеси в растворе-расплаве. Так, при концентрации Gd или Al в области 0.0025—0.005 мас % концентрация дырок p и центров N_1 уменьшается почти на порядок (до $2 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$). Заметим, что в [8] при тех же концентрациях Gd и температурах роста было достигнуто относительно более слабое подавление давления акцептора N_1 (до $9 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$). В то же время в ЭС твердого раствора $Al_xGa_{1-x}Sb$ ($x=0.06$), т. е. в слоях, содержащих Al, концентрация центров N_1 уже находится на уровне $2 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$, и добавление в расплав примеси Gd более концентрацию этих центров не снижает. Следовательно, совместное введение в расплав Gd и Al не приводит к усилению эффекта очистки матрицы от указанных центров. Необходимо отметить, что при легировании этими примесями, несмотря на уменьшение концентрации дырок, наблюдается рост интенсивности краевой полосы ФЛ при 300 К (рис. 2, кривая А). Это может свидетельствовать о том, что добавка таких примесей в расплав способствует очистке матрицы и от центров безызлучательной рекомбинации.

Электрические свойства нелегированного антимонида галлия, полученного при разных температурах эпитаксии

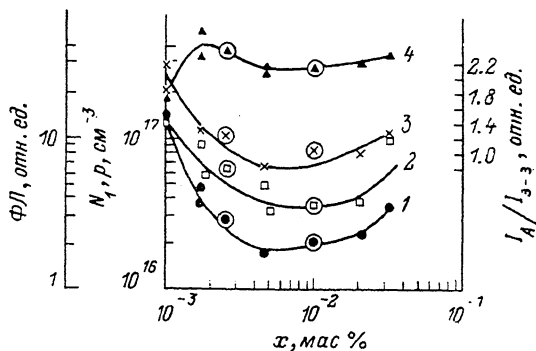
№ образца	300 К		77 К		Т _{эп} , К	Примечание
	p , 10^{17} см $^{-3}$	ρ , см 2 /В·с	p , 10^{16} см $^{-3}$	ρ , см 2 /В·с		
A-296	2.2	636	5.0	885	923	Обогащение по Sb
A-305	1.9	730	2.5	2730	923	
A-298	4.3	960	6.5	2870	923	
A-290	0.37	740	0.88	2120	843	
A-295	1.3	650	2.7	2950	843	
A-297	3.6	615	7.9	2620	843	
A-261	2.7	530	4.8	2700	783	
A-263	3.3	320	4.6	1490	783	
A-367	0.31	660	0.7	4670	783	

В слоях, выращенных из растворов-расплавов, прошедших длительный отжиг (~ 20 ч) перед эпитаксией, и в слоях, выращенных из растворов-расплавов, обогащенных сурьмой, также наблюдалось уменьшение концентрации центров N_1 , как и в случае ЭС, полученных из легированных расплавов, т. е. по влиянию на электрические и люминесцентные свойства антимонида галлия указанные технологические факторы идентичны.

Мы можем предположить существование по крайней мере двух моделей, позволяющих объяснить полученные результаты. Так, например, из данных работ [2-5] следует, что центры N_1 обусловлены дефектами структуры в анионной подрешетке соединения. Это предположение подтверждается результатами исследования ЭС, выращенных из расплавов, обогащенных сурьмой. Следовательно, уменьшение концентрации центров в наших случаях можно связывать с изменением состояния точечных структурных дефектов, как это предполагается в [8]. С другой стороны, известно, что длительный отжиг обогащенных галлием расплавов галлий—мышьяк для ЖФЭ GaAs приводит к снижению содержания кислорода в ЭС [12]. Известно также, что Gd

Рис. 2. Зависимость электрических и люминесцентных параметров от содержания примеси в расплаве.

1 — концентрация центров N_1 ; 2 — концентрация дырок p ($T=300$ К); 3 — отношение интенсивности ФЛ акцепторной линии к интенсивности линии межзонной рекомбинации I_A/I_{2-3} ($T=72$ К); 4 — интенсивность ФЛ межзонной полосы ($T=300$ К). Точки — Gd, точки в кружках — Al.



и Al обладают высоким сродством с кислородом. Поэтому снижение концентрации центров N_1 , наблюдавшееся в наших экспериментах, логично связывать с удалением кислорода из расплава или связыванием его в электрически неактивные комплексы.

Так или иначе результаты настоящей работы однозначно указывают на то, что использованные технологические факторы при ЖФЭ слоев антимолида галлия (легирование обогащенного галлием расплава галлий—сурьма алюминием или гадолинием, длительный отжиг расплавов, выращивание ЭС из расплавов галлий—сурьма, обогащенных сурьмой) снижают концентрацию центров N_1 . Конкретная же природа последних требует дальнейших исследований.

Авторы благодарят Л. В. Дружинину и А. Н. Пшеничную за предоставленные для исследований образцы.

Список литературы

- [1] Reid F. J., Baxter R. D., Millor S. C. // J. Electrochem. Soc. 1966. V. 113. N 7. P. 713—716.
- [2] Jokowetz W., Rühle W., Breuninger K., Pilkuhn M. // Phys. St. Sol. (a). 1972. V. 12. N 1. P. 169—174.
- [3] Woelk C., Benz K. W. // J. Cryst. Growth. 1974. V. 27. N 1. P. 177—182.
- [4] Бочкарев А. Э., Колесник Л. И., Лопинский А. М., Мильвидский М. Г. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 10. С. 1886—1888.
- [5] Бирюлин Ю. Ф., Гермогенов В. П., Отман Я. И. и др. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 6. С. 1118—1123.
- [6] Мильвидский М. Г., Рытова Н. С., Соловьева Е. В. // Проблемы кристаллографии. М., 1987. С. 215—232.
- [7] Гацоев К. А., Гореленок А. Т., Карченко С. Л. и др. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 12. С. 2148—2151.
- [8] Баграев Н. Т., Баранов А. Н., Воронина Т. И. и др. // Письма ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 2. С. 117—121.
- [9] Воронков В. В., Воронкова Г. И., Иглицын М. И. // ФТП. 1969. Т. 3. В. 11. С. 1720—1722.
- [10] Кюрегян А. С., Лазарева И. К., Стучебников В. М., Юнович А. Э. // ФТП. 1972. Т. 6. В. 2. С. 242—247.
- [11] Зимогорова Н. С., Крячко И. В., Маткова И. И. и др. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 3. С. 517—520.
- [12] Соловьева Е. В., Собанова Л. Д., Мильвидский М. Г. // ФТП. 1978. Т. 12. В. 2. С. 394—395.