

## ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ GaAs : In, ПОЛУЧЕННЫХ ХЛОРИДНЫМ МЕТОДОМ

Быковский В. А., Кольченко Т. И., Ломако В. М.

Нелегированные и легированные индием слои арсенида галлия ( $[In] \leq 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ), полученные хлоридным методом, исследовались с помощью измерений низкотемпературной фотолюминесценции.

Установлено, что в ходе изовалентного легирования наблюдаются существенные изменения концентрации мелких примесей и степени компенсации эпитаксиальных слоев, хотя смены типа основной акцепторной примеси не происходит. Полученные данные анализируются с учетом результатов предшествующих исследований GaAs : In.

Вопрос о влиянии изовалентных примесей на свойства GaAs имеет важное научное и практическое значение [1]. Однако, как свидетельствуют литературные данные, характер этого влияния зависит не только от природы изовалентной примеси, но и от метода выращивания кристаллов и слоев. Наиболее изученными в этом отношении являются эпитаксиальные слои GaAs, выращенные методом жидкофазной эпитаксии [2]. Слоям, полученным в процессе газофазной эпитаксии, посвящены лишь единичные работы [3-5]. Представляло интерес проанализировать свойства пленок GaAs : In, выращенных хлоридным методом, с помощью фотолюминесцентных измерений.

Нелегированные и легированные индием слои GaAs толщиной  $\sim 5$  мкм были выращены на подложках  $n^+$ -GaAs(Те) ориентации  $\langle 100 \rangle$ . Концентрация индия изменялась от  $2 \cdot 10^{17}$  до  $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  путем введения в источник галлия соответствующих количеств индия. Температуры источника и подложки составляли соответственно 830 и 740 °С. Концентрация электронов в слоях в зависимости от содержания In изменялась от  $10^{14}$  до  $4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) снимались при  $T=4.5$  К. Возбуждение образцов осуществлялось аргоновым лазером. Измерения в диапазоне 800—960 нм (1.55—1.29 эВ) выполнялись на спектрометре Ramalog фирмы «Srex». В качестве фотоприемного устройства использовался ФЭУ R-928 фирмы «Hamamatsu», работающий в одноэлектронном режиме.

Типичный спектр ФЛ контрольного образца GaAs, не легированного In, представлен на рис. 1, а. В спектре имеются две основные полосы — краевая (А) и акцепторная (В). В спектре А-полосы преобладают экситонные переходы, связанные с нейтральными ( $D^0$ , X; 1.5142 эВ) и ионизированными донорами ( $D^+$ , X; 1.5137 эВ). Существенно ниже интенсивность экситонных переходов, связанных с нейтральными акцепторами ( $A^0$ , X; 1.5125 эВ) [6].

В спектре В-полосы ФЛ четко выделяются две основные составляющие — В1 (1.4890 эВ) и В2 (1.4862 эВ). Известно, что в этой области энергий возможны донорно-акцепторные (D, A) и зонно-акцепторные (e, A) переходы, обусловленные примесями цинка, магния и углерода [7]. Для идентификации акцепторных переходов были проанализированы спектры ФЛ в интервале  $T=4.5-20$  К. Установлено, что по мере повышения температуры измерений наблюдается заметный спад интенсивности полосы В2 по отношению к В1. Это позволило заключить, что полоса В1 обусловлена (e, A)-, а полоса В2 — (D, A)-переходами с участием примесей в Ga-подрешетке (Zn, Mg). Разделить вклады этих примесей не удалось, поскольку энергии соответствующих переходов очень близки

[при  $T=5$  К переходу ( $e-Zn_{Ga}$ ) соответствует  $h\nu=1.4888$ , а переходу ( $e-Mg_{Ga}$ )— $h\nu=1.4911$  эВ [7]].

В области энергий  $h\nu \sim 1.4825$  эВ обнаружен также относительно слабый пик  $B3$ , обусловленный суперпозицией примесных ( $e, A$ )- и междоимесных ( $D, A$ )-переходов с участием акцепторов кремния  $Si_{As}$ .

Анализ совокупности спектров ФЛ слоев GaAs : In показал, что по мере изовалентного легирования наблюдается сдвиг краевой ( $A$ ) и акцепторной ( $B$ ) полос в низкоэнергетическую сторону, заметно изменяются также интенсивности обеих полос и полуширина  $A$ -полосы.

На рис. 2 показано изменение энергетического положения  $D^0, X$ -составляющей экситонной полосы по мере изовалентного легирования. Аналогичный сдвиг

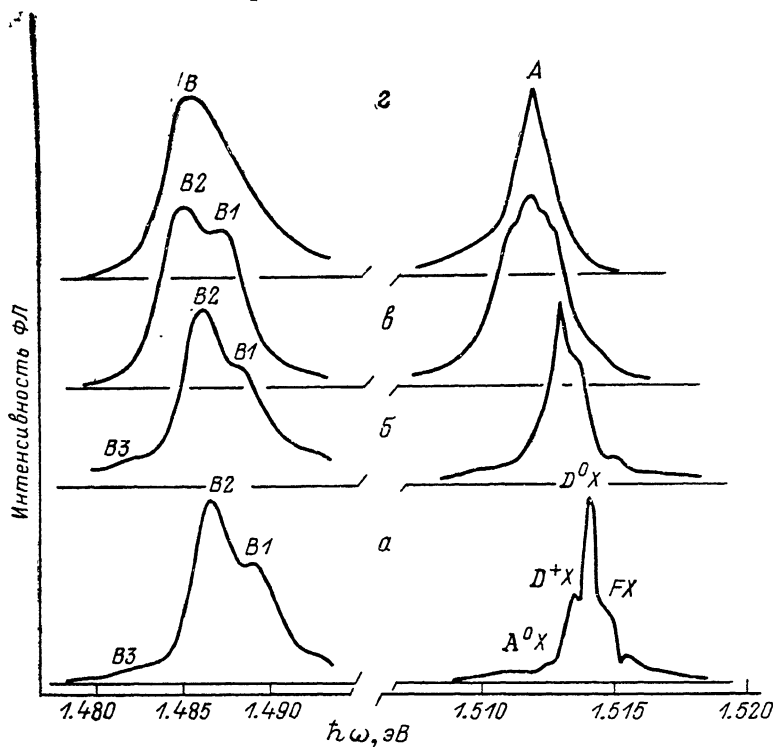


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции слоев GaAs (а) и GaAs : In (б—з) при  $T=4.5$  К.

Концентрация In,  $см^{-3}$ : б —  $2 \cdot 10^{17}$ , в —  $8 \cdot 10^{18}$ , з —  $2 \cdot 10^{19}$ .

наблюдался и для обеих составляющих  $B$ -полосы спектра. Установлено, что смещение полос ФЛ примерно соответствует изменению ширины запрещенной зоны при переходе от бинарного соединения GaAs к твердому раствору InGaAs, которое может быть представлено выражением [8, 9]

$$E_g(\text{GaAs : In}) = E_g(\text{GaAs}) - b[\text{In}],$$

где  $b=0.7 \cdot 10^{-19}$  мэВ/ $см^3$ . Этот результат хорошо согласуется с данными по сдвигу полос ФЛ в объемном GaAs : In [10] и эпитаксиальных слоях GaAs : In, выращенных МОС гидридным методом [11]. Отсутствие существенных отклонений экспериментальных данных от расчетных значений, по-видимому, свидетельствует о малости упругих напряжений в исследованных слоях GaAs с концентрацией  $[\text{In}] \leq 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

Для исследуемых слоев по мере изовалентного легирования In наблюдался монотонный рост интенсивности  $A$ -полосы ФЛ. Известно, что в GaAs на интенсивность полос ФЛ, обусловленных мелкими донорами (акцепторами), в значительной степени влияет концентрация легирующей примеси, и при  $N_d < 2 \cdot 10^{18}$ ,  $N_a < 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  величина интенсивности растет линейно с ростом  $N_d$ ,  $N_a$  [12]. Наблюдаемый характер изменения интенсивности экситонной по-

досы в нашем случае, по-видимому, является следствием монотонного роста концентрации мелких доноров. Анализ  $C-V$ -характеристик структур с барьером Шоттки, изготовленных на основе исследуемых слоев GaAs : In, показал, что концентрация электронов в них по мере изovalентного легирования, как правило, возрастает. Исключение составили слои с  $[In] \approx 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , для которых наблюдалось уменьшение  $n_0$  примерно до уровня  $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .<sup>1</sup> Такие слои характеризовались максимальными значениями интенсивности  $B$ -полосы ФЛ и отношения интенсивностей  $J_B/J_A$  (рис. 3). Приведенные факты позволили предположить, что концентрация акцепторов в слоях GaAs : In меняется немонотонно и имеет вид кривой с максимумом. С ростом концентрации индия до значения  $\sim 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  концентрация акцепторов, по-види-

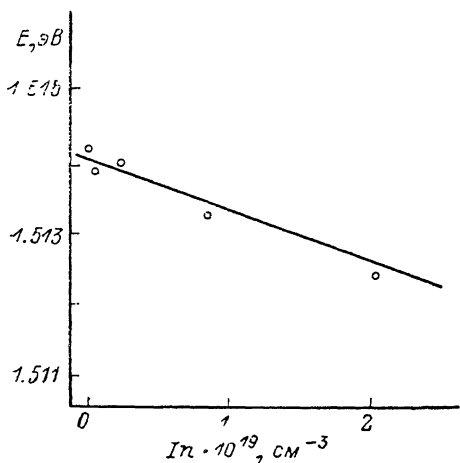


Рис. 2. Энергетическое положение  $D^0$ , X-составляющей A-полосы в слоях GaAs с различным содержанием In.

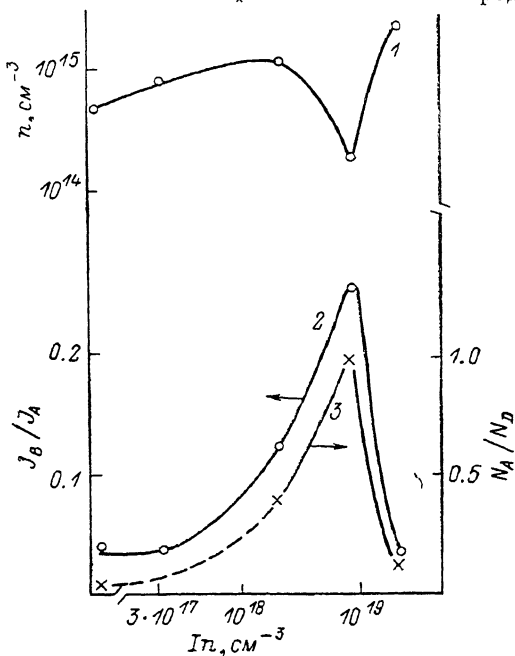


Рис. 3. Зависимость концентрации электронов (1), отношения интенсивностей полос фотолюминесценции ( $J_B/J_A$ ) (2) и степени компенсации  $k$  (3) от концентрации индия в слоях GaAs.

мому, растет, а затем спадает почти до исходного значения. Об увеличении относительного вклада акцепторов при  $[In] = 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  свидетельствовало и наблюдаемое в этом случае значительное расширение экситонной полосы ФЛ в область низких энергий (рис. 1).

Таким образом, из приведенных зависимостей  $n=f([In])$  и  $J_B/J_A=f([In])$  следует, что изovalентное легирование In, по-видимому, приводит к существенному изменению степени компенсации слоев GaAs. Это заключение подтверждается и данными холловских измерений, проведенных на слоях-спутниках, выращенных на полуизолирующих подложках. Так, из рис. 3 видно, что изменение степени компенсации слоев в ходе изovalентного легирования практически повторяет зависимость  $J_B/J_A=f([In])$ , т. е. изменения электрических и люминесцентных свойств GaAs : In хорошо коррелируют между собой.

Немонотонный характер изменения отношений  $J_B/J_A$  при легировании GaAs висмутом в процессе жидкофазной эпитаксии авторами [2] связывался с влиянием примеси Вi на ансамбль точечных дефектов, изменением отношения  $V_{As}/V_{Ga}$  и в конечном счете с изменением природы основных мелких акцепторных примесей (уменьшением концентрации  $C_{As}$ ,  $Si_{As}$  и ростом концентрации  $Zn_{Ga}$ ).

<sup>1</sup> Из-за резкого возрастания ширины области пространственного заряда (БШ) и приближения ее к толщине эпитаксиального слоя концентрацию электронов точно определить не удалось.

Анализ составляющих  $B$ -полосы показал, что в слоях  $\text{GaAs} : \text{In}$  ( $[\text{In}] \leq \leq 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ), выращенных хлоридным методом, как и в нелегированных слоях, основной акцепторной примесью является  $\text{Zn}$ , т. е. смены типа основного мелкого акцептора не происходит, но, как уже отмечалось, наблюдается существенное изменение его концентрации.

Для  $\text{GaAs} : \text{In}$ , выращенного МОС гидридным методом, в качестве возможных причин роста концентрации мелких примесей рассматриваются такие, как загрязнение реактора, усиление захвата примесей из-за присутствия индия на поверхности роста, переход части примеси из скоплений, преципитатов и т. п. в электрически активное состояние [13]. Для  $\text{GaAs}$ , выращенного хлоридным методом, по мере изовалентного легирования  $\text{In}$  ( $[\text{In}] < 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) наблюдалось снижение плотности дислокаций [3, 4], которые, как известно, могут выступать в качестве стоков для остаточных примесей. Не исключено, что именно этот фактор и обуславливает рост концентрации мелких доноров и акцепторов в нашем случае при  $[\text{In}] \leq 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Наблюдаемый в дальнейшем ( $[\text{In}] > 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) спад концентрации мелких акцепторов ( $\text{Zn}_{\text{Ga}}$ ), возможно, связан со снижением концентрации  $V_{\text{Ga}}$ . Так, измерения нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (НЕСГУ), проведенные ранее авторами [4] на исследуемых нами структурах, показали, что в ходе изовалентного легирования  $\text{In}$  наблюдается изменение концентрации глубоких центров  $E1$  и  $E2$ , связываемое с ростом отношения концентраций  $V_{\text{As}}/V_{\text{Ga}}$ . Совместное действие названных двух механизмов (снижение плотности дислокаций и уменьшение концентрации  $V_{\text{Ga}}$ ), по-видимому, и приводит к немонотонному изменению  $N_a = f([\text{In}])$ .

#### Список литературы

- [1] Баженов В. К., Фистуль В. И. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 8. С. 1345—1362.
- [2] Бирюлин Ю. Ф., Голубев Л. В., Новиков В. С., Чалдышев В. В., Шмарцев Ю. В. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 5. С. 949—952.
- [3] Lopez M., Abril E., Jimenez B., Aguilar M., Munoz E. // Def. Semicond. Mat. Sci. Forum. 1986. V. 10-12. P. 335—340.
- [4] Кольченко Т. И., Ломако В. М., Родионов А. В., Свешников Ю. Н. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 4. С. 626—629.
- [5] Laurenti J. P., Roentgen P., Wolker K., Seibert K., Kurz H., Camassel J. // Phys. Rev. B. Cond. Matter. 1988. V. 37. N 8. P. 4155—4163.
- [6] Heim U., Hiesinger P. // Phys. St. Sol. (b). 1974. V. 66. P. 461—470.
- [7] Берг А., Дин П. Светодиоды. М., 1979. 686 с.
- [8] Пихтин А. Н. // ФТП. 1977. Т. 11. В. 3. С. 425—455.
- [9] Бирюлин Ю. Ф., Ганина Н. В., Мильвидский М. Г., Чалдышев В. В., Шмарцев Ю. В. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 1. С. 108—114.
- [10] Kitahara K., Kodama K., Oseki M. // Japan. J. Appl. Phys. 1985. V. 24. Pt 1. N 11. P. 1503—1505.
- [11] Быковский В. А., Кольченко Т. И., Ломако В. М., Цыпленков И. Н., Чалдышев В. В., Шмарцев Ю. В. // Тез. докл. I Всес. конф. «Физические основы твердотельной электроники». 1989. Т. 13. С. 58—59.
- [12] Heuyen M., Balk P. // Progr. Cryst. Growth Charact. 1983. V. 6. N 3. P. 265—303.
- [13] Быковский В. А., Иванютин Л. А., Кольченко Т. И., Ломако В. М., Цыпленков И. Н., Чалдышев В. В., Шмарцев Ю. В. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 1. С. 77—81.

Научно-исследовательский институт  
прикладных физических проблем  
им. А. Н. Севченко  
БГУ им. В. И. Ленина  
Минск

Получена 3.07.1990  
Принята к печати 15.08.1990