

## 05.3

**ДИССИПАТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ  
И КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ СЛОЕВ GaAlAs,  
ПОЛУЧЕННЫХ МОС-ГИДРИДНЫМ СПОСОБОМ**

© Э.А.Ильичев, К.С.Максимов, С.К.Максимов,  
Э.А.Полторацкий, Д.Н.Суслов

Обнаружение двух типов диссипативных структур в эпитаксиальных слоях GaAlAs/GaAs: атомного упорядочения и автомодуляции <sup>[1,2]</sup> — и выдвигаемая в этих работах гипотеза о закономерностях возникновения композиционно-модулированных атомно-упорядоченных структур в GaAlAs требуют дополнительных аргументов.

Вывод о композиционной модуляции в <sup>[1,2]</sup> делался на основе закономерностей электронно-микроскопических изображений, обусловленных вариациями модуля дифракционного вектора. Однако изменения направления упорядочения также приводят к подобным вариациям <sup>[3]</sup>. В <sup>[1,2]</sup> показано, что области разного состава разделены границами, лежащими в плоскостях {110}. Между тем домены с различными направлениями упорядочения <100> также должны сопрягаться по плоскостям {110}, поскольку это ведет к минимизации упругих напряжений.

Данные о сосуществовании атомного упорядочения и композиционной модуляции в эпитаксиальных слоях A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> <sup>[4]</sup> относятся преимущественно к структурам GaInAs или GaInP. Доказательством композиционной модуляции в GaAlAs не может считаться существование прыжковой проводимости <sup>[5]</sup>. Слои формировались в проточной открытой системе <sup>[6]</sup>, были насыщены кислородом, и, хотя окисные преципитаты обнаружены не были, логично связывать эту проводимость с преципитатами, локализованными, например, по границам доменов. Модель роста <sup>[1,2]</sup> с элементами рельефа, ограниченными плоскостями {110}, представляется экзотической.

Поэтому целями настоящей работы были получение дополнительных результатов, подтверждающих факт композиционной модуляции.

Для исследований методом катодолюминесценции эпитаксиальные слои Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As/n-GaAs формировались в условиях, идентичных условиям <sup>[1,2,6]</sup>. Слои выращивались в едином технологическом процессе в проточном реакторе открытого типа по МОС-гидридной технологии из арсина

и алкильных соединений галлия и алюминия. Состав материнской фазы обеспечивал  $x = 0.28-0.32$ , что по данным [6] лежит в интервале концентраций со стабильными и воспроизводимыми электрофизическими характеристиками, зависящими исключительно от состава слоев. Слои имели толщину, превышающую 5 мкм, что исключало появление спектральных линий, обусловленных материалом подложки.

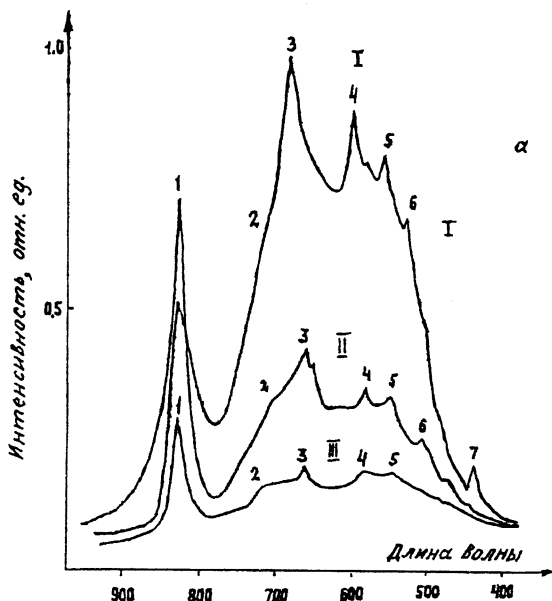
Катодолюминесценция слоев  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/n\text{-GaAs}$  с  $x$ , изменявшимся от 0.1 до 0.5, и их средний состав изучались на установке MS-46 Самеса. Средний состав определялся методом локального рентгеноспектрального анализа с относительной погрешностью 5%. Спектры катодолюминесценции исследовались при 80 К при абсолютной суммарной ошибке в измерении длины волны в 0.5 нм. Для детектирования спектра излучения использовалось ФЭУ-51, имеющее окно спектральной чувствительности в диапазоне 0.4–0.9 мкм. Структура образцов контролировалась методом электронографии “на отражение” на микроскопе CM 30 STEM Philips\*.

Ниже приведены результаты для образцов со средним составом  $x = 0.3$  (по данным рентгенофлуоресцентных измерений).

На электронограммах “на отражение” для этих образцов присутствовали: развитая система линий Кикучи и точечные рефлексы, имеющие сателлиты, смещенные относительно базисного рефлекса вдоль направлений [110] и [001] и связанные, по-видимому, с вариациями состава. Каких-либо признаков атомного упорядочения для областей у внешней поверхности эпитаксиального слоя не обнаружено.

Спектры катодолюминесценции, полученные для разных величин тока электронного зонда (см. рисунок), содержали линейчатую и сплошную компоненты. В них присутствовали линии с длинами волн  $\lambda = 0.85-0.87, 0.67, 0.56$  мкм, принадлежащие соответственно чистому GaAs,  $\approx \text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ ,  $\approx \text{Ga}_{0.36}\text{Al}_{0.64}\text{As}$  и свидетельствующие о расслоении слоя на фазы трех указанных составов, а также линии с  $\lambda = 0.69$  и  $0.59$  мкм, соответствующие межфазовым переходам  $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As} \rightarrow \text{GaAs}$ ,  $\text{Ga}_{0.36}\text{Al}_{0.64}\text{As} \rightarrow \text{GaAs}$ ,  $\text{Ga}_{0.36}\text{Al}_{0.64}\text{As} \rightarrow \text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$  (линия 0.69 мкм наиболее отчетливо выражена при малых “накачках”, см. рисунок). При увеличении тока зонда усиливается сплошная компонента спектра (объясняемая искажениями структуры энергетических зон вследствие зарядки примесных центров). Многолинейный спектр может вызывать недоумение, поскольку амплитуда вариаций состава ( $\Delta x \geq 0.3$ ) и характерное расстояние между областями разных составов (по данным электронной микроскопии  $\approx 10^{-6}$  см) должны вызывать

\* Электронографические исследования выполнены Е.Н. Нагдаевым.

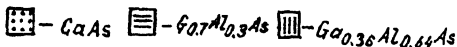
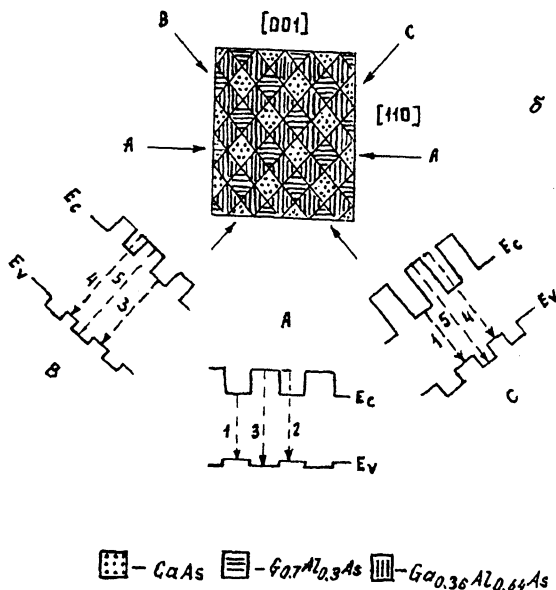


Спектр микрокатодолуминесценции эпитаксиального слоя GaAlAs со средней мольной долей AlAs 30% толщиной 5 мкм (а) и схематическое изображение энергетической диаграммы для модулированного по составу эпитаксиального слоя GaAlAs, обладающего этим спектром (б). I — ток зонда 150 нА; II — ток зонда 200 нА, III — ток зонда 250 нА. 1 —  $\lambda_1 = 0.85-0.87$  мкм,  $E_c(\text{GaAs}) \rightarrow E_v(\text{GaAs})$ ; 2 —  $\lambda_2 = 0.69$  мкм,  $E_c(\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}) \rightarrow E_v(\text{GaAs})$ ; 3 —  $\lambda_3 = 0.67$  мкм,  $E_c(\text{Ga}_{0.36}\text{Al}_{0.64}\text{As}) \rightarrow E_v(\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As})$ ; 4 —  $\lambda_4 = 0.59$  мкм,  $E_c(\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}) \rightarrow E_v(\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As})$ ; 5 —  $\lambda_5 = 0.56$  мкм,  $E_c(\text{Ga}_{0.36}\text{Al}_{0.64}\text{As}) \rightarrow E_v(\text{Ga}_{0.36}\text{Al}_{0.64}\text{As})$ .

“скатывание” электронов в потенциальные ямы за времена  $\approx 10^{-13}$  с и приводит к появлению одной линии, отвечающей наиболее узкозонному переходу. Ситуация объясняется заполнением состояний, которое для наиболее узкозонного перехода (GaAs) наблюдается при токе зонда  $\approx 50-100$  нА. Действительно, при токе зонда в 150 нА выражены только линии GaAs,  $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$  и  $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3} \rightarrow \text{GaAs}$ , а при увеличении тока зонда до 250 нА поочередно включаются более широкозонные переходы (см. рисунок).

Подробный анализ спектральной картины будет опубликован в ближайшем будущем, а для целей настоящей статьи первостепенную важность имеет тот факт, что спектры люминесценции подтверждают вывод, сделанный при изучении структуры слоев, о их композиционной модуляции.

Принципиальным также является вопрос о причинах автотомодуляции. В этих целях рассматривалась устойчивость



(Продолжение рисунка).

абсорбции из материнской фазы (МФ) при наличии буферного слоя (БС) в пренебрежении диффузией в кристалле (К) [7]. Было получено равенство, связывающее через коэффициенты абсорбции стационарный состав Л с составами МФ и БС, выполнение которого ведет к устойчивости процесса кристаллизации:

$$\frac{S_1^* S_2^* (C_{1b}^\# + C_{2b}^\#)}{S_1^* C_{2c} + S_2^* C_{1c}} = \frac{S_1^0 S_2^0 (C_{1m}^\# + C_{2m}^\#)}{S_1^0 C_{2c} + S_2^0 C_{1c}}, \quad (1)$$

где  $S_i^*$  — коэффициенты абсорбции  $i$ -го компонента в К;  $S_i^0$  — коэффициенты абсорбции этих компонент в БС;  $C_{ib}^\#$  — концентрации атомов  $i$ -го типа в БС на границе с К;  $C_{ic}$  — концентрации компонент в К;  $C_{im}^\#$  — концентрации компонент в МФ на границе с БС. Выражение (1) имеет очевидный физический смысл. Стационарный процесс реализуется при равенстве двух потоков: из МФ в БС и из БС на поверхность РК. В отсутствие БС состав К определяется составом МФ.

При наличии БС изменения в условиях абсорбции на одной из границ не могут автоматически сопровождаться адекватными изменениями на другой, и поэтому наличие БС может приводить к нестационарности, одним из проявлений которой является колебательный процесс.

## Список литературы

- [1] *Максимов С.К.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 19. С. 64–67.
- [2] *Максимов С.К.* // Кристаллография. 1996. (в печати).
- [3] *Амелинкс С.* // Прямые методы наблюдения дислокаций. М.: Мир, 1968. 440 с.
- [4] *Mañajan S.* // Materials Sci. & Engineering. 1995. V. 30. N 2–3. P. 187–199.
- [5] *Ильичев Э.А., Максимов С.К., Нагдаев Е.Н. и др.* // ЖТФ. 1986. Т. 56. С. 2245–2247.
- [6] *Ильичев Э.А., Масловский В.М., Полторацкий Э.А.* // ФТП. 1986. Т. 20. С. 594–602.
- [7] *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Сурис Р.А.* // Дефекты структуры в полупроводниках. Методы их исследования и влияние на свойства кристаллов и пленок. М.: МИЭТ, 1982. С. 3–12.

Московский институт  
электронной техники —  
Технический университет

Поступило в Редакцию  
6 декабря 1995 г.