

06;11;12

## Ненапряженные эпитаксиальные пленки $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , полученные на пористом GaAs

© Ф.Ю. Солдатенков, В.П. Улин, А.А. Яковенко,  
О.М. Фёдорова, С.Г. Конников, В.И. Корольков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

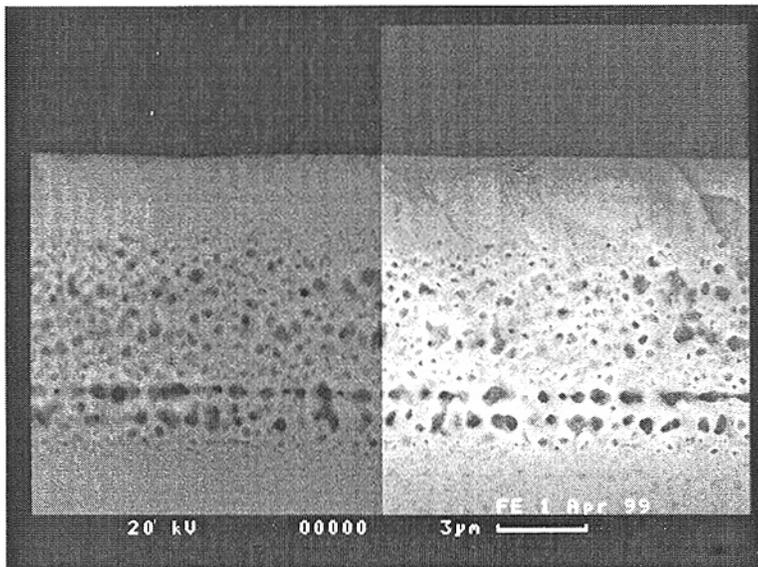
Поступило в Редакцию 9 июля 1999 г.

На пористых подложках GaAs (100) методом жидкофазной эпитаксии выращены эпитаксиальные слои твердых растворов InGaAs. Сравнение составов и толщин этих эпитаксиальных слоев с составами и толщинами слоев, полученных в тех же условиях на обычных монокристаллических подложках GaAs, дает основание рассматривать кристаллизацию эпитаксиальных слоев на пористых подложках как рост свободных ненапряженных пленок.

Использование в качестве подложек для эпитаксиального наращивания пористых монокристаллов  $\text{A}_{\text{III}}\text{B}_{\text{V}}$  открывает новые возможности для кардинального снижения уровня механических напряжений и плотности кристаллических дефектов релаксационного характера, индуцируемых в гетероэпитаксиальных структурах размерными несоответствиями решеток сопрягаемых материалов [1].

В настоящей работе методом жидкофазной эпитаксии были выращены эпитаксиальные слои твердого раствора  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с содержанием InAs до  $\sim 4\%$  на монокристаллических (сплошных) и пористых подложках GaAs. Использовались подложки GaAs  $n$ -типа проводимости, легированные оловом до концентрации  $(1-2) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , ориентированные в плоскости (100). Прослойки пористого материала ( $5-20 \mu\text{m}$ ) на данных подложках получали с помощью электрохимического травления в водных растворах, содержащих HF, по методике, описанной в [1].

Эпитаксиальное выращивание проводилось из раствора-расплава In-Ga-As при температурах начала кристаллизации  $710^\circ\text{C}$ . Для подавления процессов первичного подтравливания подложек при контакте с расплавом и проникновения его в объем пористого материала перед приведением в контакт с подложкой первоначально насыщенный расплав переохлаждался на  $5-7^\circ\text{C}$ . На рис. 1 приведена фотография



**Рис. 1.** Эпитаксиальный слой  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  на пористой подложке. Фотография сделана на электронном микроскопе: в отраженных электронах (левая часть снимка); в отраженных + вторичных электронах (правая часть снимка).

скола выращенной гетерокомпозиции эпитаксиальный слой  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ –пористый GaAs. Видно, что при данном типе пор и режиме выращивания расплав не проникает в объем пористого GaAs.

Полученные результаты сведены в таблицу.

Содержание InAs в эпитаксиальных слоях твердых растворов на монокристаллической ( $x_m$ ) и пористой ( $x_p$ ) подложках определялось по положению максимума краевой полосы фотолюминесценции при 77 К, а также по данным рентгеноспектрального микроанализа на установке "Сомебах" (значения в скобках). На некоторых образцах фотолюминесцентные измерения проводились как на поверхности слоя, так и вблизи границы раздела подложка–слой после травли подложки (образцы 4b и 4a соответственно). Толщины слоев ( $h_m$  — на монокристаллической,  $h_p$  — на пористой подложках) определялись по сколу на оптическом и электронном сканирующем микроскопах.  $h_{rel} = h_p/h_m$  — отношение толщины слоя,

№ опыта	Тип подложки	$x_m, x_p,$ mol.%	$h_m, h_p,$ $\mu m$	$h_{rel}$	$f \cdot 10^3$	$h_c, \mu m$	$\Delta T, ^\circ C$
1	Мон.	0.79(0.77)	1.8	1.22	0.56	80	0.25
	Пор.	1.08(0.89)	2.2		—	—	—
2	Мон.	1.46(1.45)	1.3	1.69	1.05	21	0.9
	Пор.	1.79(1.71)	2.2		—	—	—
3	Мон.	2.33	1.5	2.0	1.67	7.4	2.5
	Пор.	2.88	3.0		—	—	—
4 a	Мон.	3.35	2.9	1.21	2.41	3.3	5.8
	Пор.	4.26			3.5	—	—

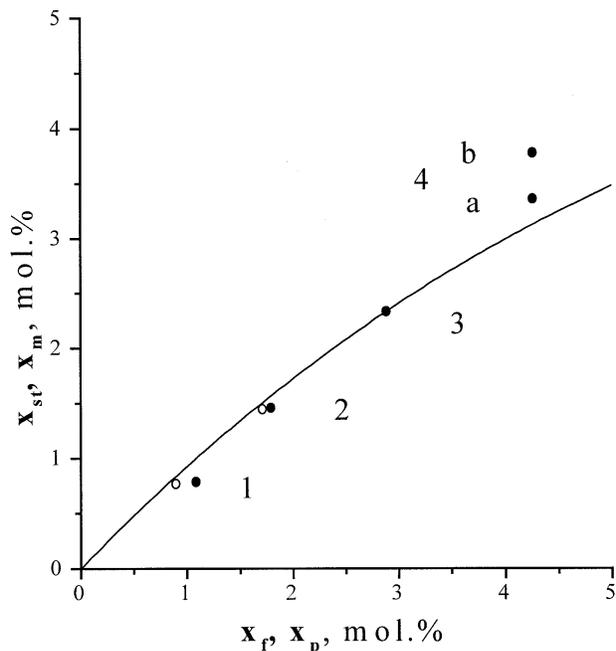
выросшего на подложке пористого GaAs, к толщине слоя, выращенного на монокристаллической (сплошной) подложке GaAs.  $f$  — относительное несоответствие решеток слоя и подложки,  $h_c$  — критическая толщина слоя данного состава (расчет по модели баланса энергий [2]).  $\Delta T$  — расчетная величина минимального переохлаждения, необходимого для начала эпитаксиального роста упругодеформированного слоя твердого раствора, псевдоморфной подложке GaAs (см. ниже).

Связь между составами слоев, выращенных на сплошных ( $x_m$ ) и пористых ( $x_p$ ) подложках, показана на рис. 2. Там же приведен график расчетной зависимости между равновесными составами свободнорастущего кристалла InGaAs ( $x_f$ ) и напряженного эпитаксиального слоя InGaAs ( $x_{st}$ ) на подложке GaAs (100).

Зависимость  $x_{st}$  от  $x_f$  и соответствующая величина  $\Delta T$  рассчитывались из соображений минимизации избыточной удельной свободной энергии ( $\delta G$ ) системы: исходная фаза, равновесная к твердому раствору  $In_xGa_{1-x}As$  ( $x = x_f$ ), — твердый раствор  $In_xGa_{1-x}As$  ( $x = x_{st}$ ) с тетрагонально искаженной кристаллической решеткой, псевдоморфной в плоскости (100) подложке GaAs [3].

$$\delta G = \left[ \frac{RT}{2x_f(1-x_f)} - \Omega \right] \cdot (x_{st} - x_f)^2 + \frac{\lambda_{(100)}N_A a(\Delta a)^2}{4} \cdot x_{st}^2. \quad (1)$$

Здесь  $\Omega = 15145$  Дж/моль — параметр взаимодействия в системе InAs–GaAs (в модели регулярного твердого раствора);



**Рис. 2.** Сплошная кривая, рассчитанная по формуле (2), дает связь между составами твердых растворов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  в условиях свободного роста ( $x_f$ ) и эпитаксиальной кристаллизации в виде слоев, псевдоморфных GaAs (100) ( $x_{st}$ ). Экспериментальные точки отражают корреляцию составов для пар слоев  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , выращенных в одном процессе из единого расплава на пористой ( $x_p$ ) и обычной ( $x_m$ ) подложках (см. таблицу); сплошные точки — по данным фотолюминесцентных измерений, полые точки — по данным рентгеноспектрального микроанализа.

$\lambda_{(100)}$  — приведенный модуль упругости твердого раствора;  
 $\lambda_{(100)} = C_{11} + C_{12} - 2 \cdot C_{12}^2 / C_{11}$ , где  $C_{ij}$  — матричные модули упругости слоя (все численные значения параметров взяты из [4]).  
 $N_A$  — число Авогадро;  $a$  — постоянная решетки твердого раствора;  
 $\Delta a$  — разница постоянных решетки ненапряженного слоя и подложки;  
 $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — температура, в К.

Первый член суммы учитывает изменение химической части свободной энергии системы в связи с вариацией состава твердого раствора от равновесного значения. Второй член суммы представляет собой удельную механическую энергию упругонапряженного слоя на подложке GaAs (100). Итак, из формулы (1) получаем:

$$x_{st} = x_f \cdot \left[ \frac{RT - 2\Omega x_f(1 - x_f)}{RT - \Omega x_f(1 - x_f) + \frac{\lambda_{(100)}}{2} N_A a (\Delta a)^2 x_f(1 - x_f)} \right]. \quad (2)$$

Величину  $\Delta T$  оценивали, используя зависимость  $x_{st}(x_f)$ , как  $\Delta T = \delta G/R$  (см. таблицу).

Из таблицы видно, что эпитаксиальные слои, выращенные на пористых подложках, систематически имеют бóльшую толщину и большее содержание InAs по сравнению со слоями на обычных подложках GaAs. Для эпитаксиальных слоев, имеющих толщины, значительно меньшие расчетных значений критических толщин начала релаксационного дефектообразования в псевдоморфных пленках, эти различия нарастают с увеличением концентрации InAs. Однако уже при росте на сплошной подложке эпитаксиальных слоев с содержанием InAs более 3% возникают изменения состава в сторону его увеличения к поверхности слоя. При этом уменьшается соотношение толщин слоев на пористой и сплошной подложке. Толщина эпитаксиального слоя, на которой наблюдались эти изменения, сравнима с критической толщиной  $h_c$  для начального состава слоя, рассчитанной в модели баланса энергий [2], и многократно превышает критическую толщину, рассчитанную из условия механического равновесия слоя [5]. Поэтому отмеченные особенности можно объяснить началом процессов релаксации упругих напряжений в слое, растущем на сплошной подложке. Это в свою очередь приводит к снижению уровня свободной энергии кристаллизующегося твердого раствора и повышению эффективного пересыщения на фронте кристаллизации.

Таким образом, достигаемая при жидкофазной эпитаксии близость условий кристаллизации к состоянию межфазного равновесия сделана возможным проявление различий в составах и толщинах эпитаксиальных слоев, термодинамически обусловленных неодинаковостью их упругодеформированного состояния. Характер наблюдаемых различий для слоев  $In_xGa_{1-x}As$ , выращенных из единого раствора на пористых и сплошных подложках, свидетельствует о том, что еще до достижения

критической толщины слоя деформации, возникающие в гетероструктуре, локализуются в объеме пористой подложки, и рост на ней эпитаксиального слоя протекает, практически, как рост свободного, ненапряженного кристалла.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность С.И. Трошкову, В.М. Бусову и Т.Б. Поповой за помощь в проведении измерений; Е.Л. Портному — за внимание и помощь в проведении работы.

## Список литературы

- [1] Мамутин В.В., Улин В.П. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 1. С. 3–9.
- [2] People R., Vean J.C. // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 47. N 3. P. 322–324.; 1986. V. 49. N 4. P. 229.
- [3] Воронков В.В., Долгинов Л.М. и др. // Кристаллография. 1977. Т. 22. В. 2. С. 375–378.
- [4] Кузнецов В.В., Москвин П.П., Сорокин В.С. Неравновесные явления при жидкостной гетероэпитаксии полупроводниковых твердых растворов. М.: Металлургия, 1991. 175 с.
- [5] Matthews J.W., Blakeslee A.E. // J. Cryst. Growth. 1974. V. 27. P. 118–125.