

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°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

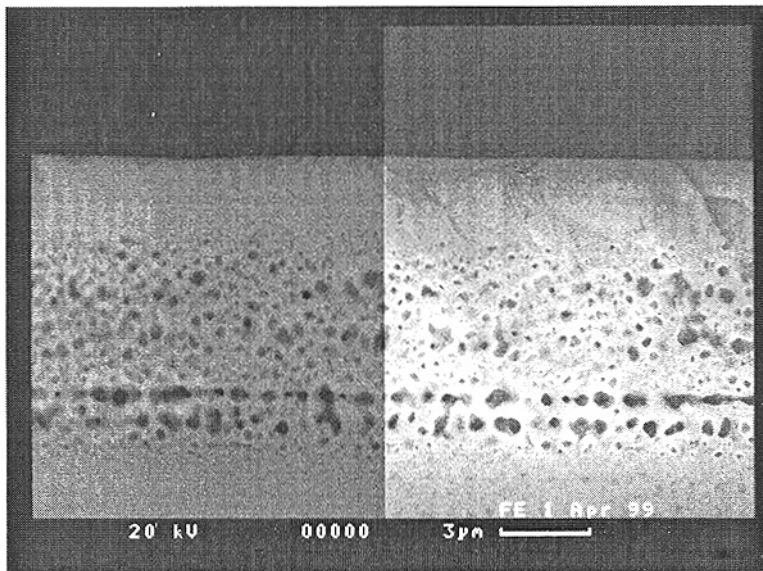


Рис. 1. Эпитаксиальный слой $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на пористой подложке. Фотография сделана на электронном микроскопе: в отраженных электронах (левая часть снимка); в отраженных + вторичных электронах (правая часть снимка).

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.%	$h_m, h_p,$ μm	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]). ΔT — 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 ΔT рассчитывались из соображений минимизации избыточной удельной свободной энергии (δG) 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);

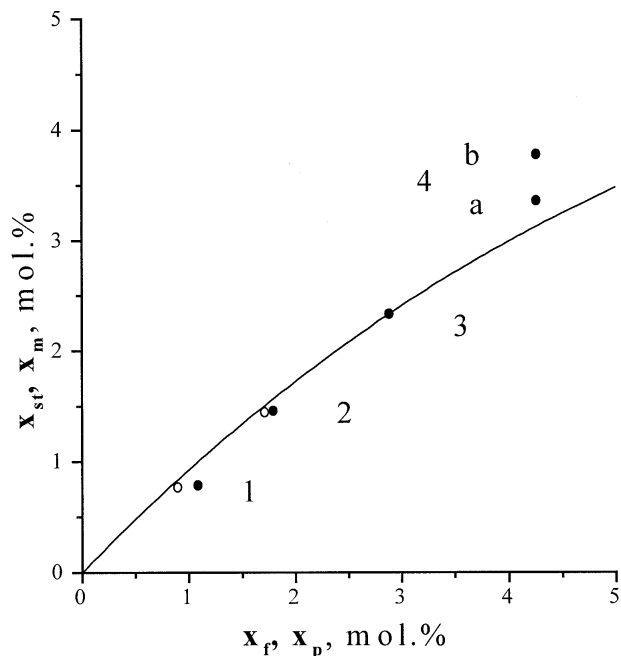


Рис. 2. Сплошная кривая, рассчитанная по формуле (2), дает связь между составами твердых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в условиях свободного роста (x_f) и эпитаксиальной кристаллизации в виде слоев, псевдоморфных GaAs (100) (x_{st}). Экспериментальные точки отражают корреляцию составов 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;
 Δa — 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 ΔT 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.