

05; 06; 12

ПЕРЕХОДНЫЕ СЛОИ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ AlGaAs/GaAs , ВЫРАЩИВАЕМЫХ ПУТЕМ КОНТАКТНОЙ СМЕНЫ РАСТВОРОВ

ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Ю. Б. Болховитянов, Л. М. Логвинский, Н. С. Рудая

Теоретически и экспериментально исследован метод смены растворов над подложкой арсенида галлия путем выталкивания раствора Ga—As жидкой фазой Al—Ga—As в процессе жидкофазной эпитаксии гетероструктуры GaAlAs/GaAs . Показано, что одним из основных факторов, влияющих на начальные стадии роста пленки AlGaAs , является опережающая диффузия алюминия в оставшийся после смены растворов тонкий слой жидкой фазы Ga—As (по сравнению с уходом из этого слоя избыточного мышьяка) вследствие соотношения $D_{\text{Al}} > D_{\text{As}}$ (D — коэффициент диффузии элемента в жидкой фазе Al—Ga—As). В результате в слое остаточного раствора Ga—As возникает существенное пересыщение, определяющее кинетику образования переходных слоев в гетероструктуре AlGaAs/GaAs . При интенсивной смене растворов переходные слои в этой гетероструктуре были получены такой же величины, как и при обычной технологии жидкофазной эпитаксии, — менее 20 нм.

Введение

При выращивании многослойных гетероструктур на основе системы AlGaAs из жидкой фазы широко используется метод смены растворов путем выталкивания одной фазы другой. Для этого метода разработаны специальные конструкции аппаратуры [1, 2]. Однако начальные стадии образования пленок при такой технологии практически не исследовались, в частности до сих пор нет данных о возможностях управления протяженностью переходных слоев (ПС) между соседними пленками гетероструктуры.

На толщину переходного слоя должны влиять: температура процесса, степень пересыщения (или недосыщения) обоих смешивающихся растворов, количество промывающего раствора, скорость промывки и некоторые другие параметры, в частности конструктивные особенности лодочки, в которой осуществляется процесс. Ясно, что вследствие большого количества параметров, влияющих на размеры ПС, установить точные количественные закономерности между условиями проведения эксперимента и свойствами ПС вряд ли возможно. Однако для целенаправленного выращивания гетероструктур необходимо знать хотя бы тенденции влияния основных условий формирования гетероструктуры на параметры переходных слоев в системе AlGaAs/GaAs . Выяснению этих тенденций и посвящена настоящая работа.

I. Качественная модель смены растворов

Важнейшим промежуточным параметром в этой технологии является толщина слоя оставшегося раствора h . Действительно, начальный этап роста новой пленки в значительной степени будет определяться процессами, происходящими при смешении старого, оставшегося и нового растворов.

При вытеснении одного раствора другим граница раздела между ними изменяется во времени так, как показано на рис. 1, а. Так как жидкости 1-го и 2-го растворов близки по величинам плотности и кинематической вязкости, то остаточный слой раствора похож по конфигурации на прилипший пограничный слой (ППС) (заштрихован на рис. 1, б), теория которого хорошо разработана (например, [3]). Поэтому в литературе прослеживаются попытки (например, [4]) оценить толщину остаточного слоя с помощью выражения, выведенного для ППС

$$h = k \sqrt{\frac{\nu x}{u}}, \quad (1)$$

где ν — кинематическая вязкость жидкости, x — расстояние вдоль пластины, u — скорость движения жидкости.

На самом деле это выражение является весьма грубым приближением для рассматриваемого случая, так как отражает стационарную часть ППС однородной по составу жидкости, движущейся с постоянной скоростью. Толщина такого ППС оценивается по потере скорости при приближении к неподвижной пластине. При контактной смене растворов происходит смыв первичного раствора, его толщина непрерывно уменьшается во времени за счет конвективного обмена на границе соприкосновения жидкостей (показано изогнутыми стрелками на рис. 1, б). Область конвективного обмена представляет собой турбулентную зону перемешивания, ширина которой возрастает по направлению движения струи жидкости [3] (этот эффект схематически отмечен на рис. 1, б увеличением диаметра изогнутых стрелок).

Ясно, что в течение времени промывки толщина остаточного слоя уменьшается непрерывно и практически может быть сведена к нулю, в то время как, согласно выражению (1), толщина ППС неизменна во времени. Таким образом, модель, характеризующая смену одного раствора другим, оказывается гораздо более сложной, чем предполагается в [4], вследствие а) присутствия двух жидкостей с похожими гидродинамическими свойствами, б) нестационарности процесса. Мы оценивали толщину остаточного слоя по конечным результатам, о чем будет сказано ниже.

II. Диффузионные процессы вблизи границы раздела твердое—жидкое. Расчет

Рассмотрим систему, состоящую из двух жидких фаз различного состава: 1) остаточный слой первичного раствора Ga—As толщиной h , 2) новая жидкая фаза Al—Ga—As толщиной $l-h$, причем $l \gg h$. Здесь l — общая толщина слоя раствора на подложке. Эти две жидкости ограничены непроницаемыми для диффузии стенками. После «запуска» времени отсчета из слоя 1 начнется диффузия мышьяка в слой 2, так как имеется существенная разница в концентрациях As в этих двух растворах. В качестве модели для расчета использовано выражение для диффузии элемента из ограниченного источника толщиной h в полуограниченное пространство [5]

$$C/C_0 = 1/2 \left\{ \operatorname{erf} \frac{h-y}{2\sqrt{D_{As}t}} + \operatorname{erf} \frac{h+y}{2\sqrt{D_{As}t}} \right\}, \quad (2)$$

где y — текущая координата.

Так как растворы Al и As в галлии являются разбавленными ($X_{Al}^L \leq 0.0045$ и $X_{As}^L \leq 0.014$), то взаимным влиянием этих элементов на их диффузию в жид-

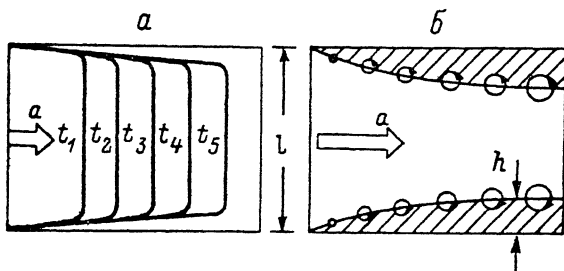


Рис. 1. Схема процесса вытеснения одного раствора другим.

а — начальная стадия, б — установившийся процесс. Стрелки а — направление движения промывающего раствора.

ной фазе можно пренебречь. Отношение C/C_0 в (2) может быть выражено через концентрацию мышьяка в жидкой фазе

$$C/C_0 = (X_{As}^{L_2} - X_{As}^{L_1}) / (X_{As}^{L_1} - X_{As}^{L_2}), \quad (3)$$

где $X_{As}^{L_1}$ и $X_{As}^{L_2}$ — равновесные концентрации мышьяка в 1-м и 2-м растворах соответственно.

Одновременно начнется диффузия алюминия из раствора 2 в раствор 1, в котором этот элемент отсутствует. Здесь наиболее подходящей моделью для расчета является выражение для диффузии из одного ограниченного в другой ограниченный объем. Соответствующее выражение, взятое из [6] и модифицированное для нашего случая, выглядит следующим образом:

$$C/C_0 = \frac{l-h}{l} + \frac{2}{\pi} \sum_1^{\infty} \frac{1}{n} \exp\left[-\frac{D_{Al} n^2 \pi^2 t}{l^2}\right] \cos \frac{n\pi y}{l} \sin \frac{n\pi(l-h)}{l}, \quad (4)$$

где $C | C_0 = X_{Al}^L | X_{Al}^{L_1}$.

Зная конкретные значения X_{Al}^L и X_{As}^L в каждой точке в окрестности остаточного слоя раствора, можно, используя расчетные фазовые диаграммы для системы AlGaAs, определить степень

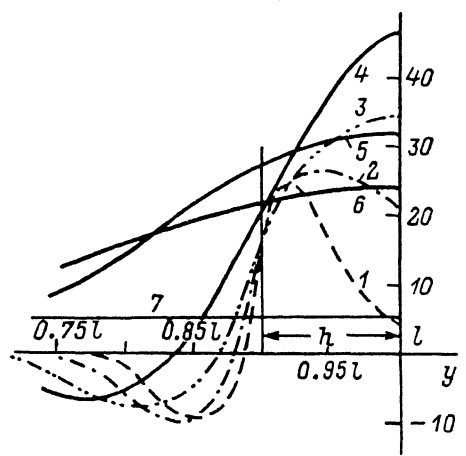


Рис. 2. Пространственное распределение пересыщения по мышьяку в жидкой фазе в области смешения ($h=10^{-2}$ см).

t , с: 1 — 0.1, 2 — 0.25, 3 — 0.5, 4 — 1, 5 — 8, 6 — 16, 7 — ∞ .

превышения концентрации мышьяка над ее равновесным значением в каждой точке пространства. На рис. 2 представлена система таких зависимостей, из которых видно следующее. Сразу же после начала контакта вследствие диффузионного обмена атомами мышьяка и алюминия между 1-м и 2-м растворами в области границы раздела этих жидких фаз образуется довольно существенная по амплитуде волна пересыщения (что связано с разницей в величинах коэффициентов диффузии алюминия и мышьяка $D_{Al} > D_{As}$ [7]), продвигающаяся в сторону подложки. Именно с таким высоким пересыщением в жидкой фазе можно связать наблюдавшийся нами эффект образования дефектов на подложке, находящейся над раствором: образующиеся в слое максимального пересыщения центры новой фазы всплывают, прикрепляются к поверхности подложки и дают начало образованию дефектов (пирамид), ухудшающих морфологию поверхности растущей пленки. Как видно из рис. 2, в области, прилегающей к границе смешения со стороны раствора Al—Ga—As, образуется волна недосыщения, так как скорость ухода из этой области алюминия превышает скорость прихода мышьяка. Таким образом, процесс смены одного раствора другим оказывается гораздо более сложным, чем это представлено в [8], где диффузия мышьяка не учитывается.

Отметим еще одну особенность, наблюдаемую на рис. 2. Несмотря на довольно большую выбранную для расчета толщину остаточного слоя h (10^{-2} см), пересыщение на правой стенке (т. е. подложке) достигает больших величин за малые времена (~ 1 с), сравнимые со временем смены растворов. Связано это с быстрой диффузией алюминия: время релаксации при выбранной толщине $\tau = h^2/D = 1$ с.

Изменение пересыщения δ во времени в плоскости l для разных толщин остаточного слоя h представлено на рис. 3. Видно, что с уменьшением h изменение пересыщения в плоскости l , обусловленное диффузионным смешением растворов 1 и 2, становится существенно резкой зависимостью от времени на начальном этапе контакта. 1-я фаза контакта — быстрое нарастание δ — определяется

диффузией алюминия в слой толщиной h . 2-я фаза контакта — медленное спадание δ — определяется «размазыванием излишка» мышьяка, находившегося первоначально в слое h , по всей толщине слоя раствора l .

На рис. 4 представлены зависимости, отражающие возрастание концентрации алюминия в жидкой фазе во времени в плоскости l для разных толщин слоя остаточного раствора h . Видно, что одинаковая концентрация $X_{\text{АТ}}^L$ достигается за время, пропорциональное квадрату h . Соотнесем быстроту нарастания концентрации алюминия в жидкой фазе в плоскости l для разных h с толщиной образовавшейся пленки $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, т. е. оценим величину переходного слоя по алюминию в зависимости от h . Предположим, что величина кинетического коэффициента K ($v=K\delta$, где v — скорость роста пленки) не зависит от состава сопрягающихся фаз $\text{Al}-\text{Ga}-\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Рассмотрим участки рассчитанных

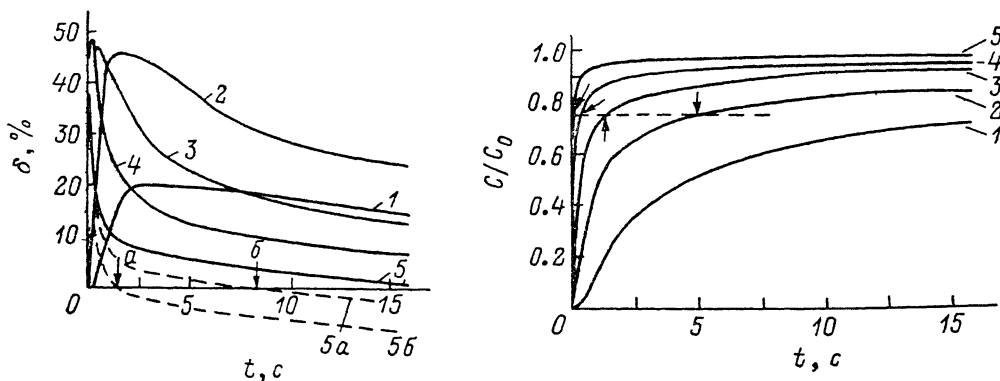


Рис. 3. Пересыщение в плоскости $y=l$ как функция времени.

h , см: 1 — $2 \cdot 10^{-2}$, 2 — $1 \cdot 10^{-2}$, 3 — $5 \cdot 10^{-3}$, 4 — $2.5 \cdot 10^{-3}$, 5 — 10^{-3} . 1-5 — начальное пересыщение обоих растворов отсутствует ($\delta_0=0$); 5а, 5б — начальное пересыщение для $\text{Al}-\text{Ga}-\text{As}$ ($\delta_0=-4, -10\%$ соответственно).

Рис. 4. Возрастание концентрации алюминия в жидкой фазе во времени в плоскости l .

h : 1 — $0.2 l$, 2 — $0.1 l$, 3 — $0.05 l$, 4 — $0.025 l$, 5 — $0.01 l$. Стрелками показаны точки пересечения кривых 5, 4, 3, 2 уровнем концентрации $0.75 C_0$ при $t=0.1, 0.6, 2.4, 9.7$ с.

и приведенных на рис. 3 зависимостей $\delta(t)$ для разных h в их начальной, восходящей, части. Здесь $\delta \sim \alpha_h t$, а $\alpha_h \sim 1/h^2$. Тогда

$$d = \int_0^t v dt \sim \int_0^t \frac{1}{h^2} t dt \sim t^2/h^2.$$

Как видно из рис. 4, время, за которое жидкая фаза в плоскости l достигает того же состава по алюминию, пропорционально h^2 . Тогда

$$d|_{c/c_0=\text{const}} \sim h^2, \quad (5)$$

т. е. протяженность переходного слоя по алюминию приближенно квадратично связана с толщиной слоя остаточного раствора. Отсюда следует, что кратность промывки, осуществленной в течение короткого времени, при котором рост слоя в процессе промывки можно пренебречь, через величину слоя остаточного раствора влияет на протяженность ПС.

Так как переходной слой в гетероструктуре $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ формируется на начальном этапе смешения растворов $\text{Al}-\text{Ga}-\text{As}$ и $\text{Ga}-\text{As}$ вследствие опережающей диффузии алюминия в жидкую фазу $\text{Ga}-\text{As}$, прилегающую к подложке, то степень пересыщения или недосыщения промывающего раствора, выражающаяся в колебании в нем концентрации мышьяка в пределах нескольких процентов, должна слабо влиять на протяженность ПС.

Следует отметить, что, как только пересыщение на фронте кристаллизации (плоскость l) становится больше нуля, на практике начинается рост слоя AlGaAs и отток мышьяка и алюминия из рассмотренного ранее в расчетах объема жид-

кой фазы толщиной l . Поэтому значения δ будут отличаться в плоскости l в меньшую сторону по сравнению с расчетными. То же можно сказать и о зависимостях, приведенных на рис. 3. Поэтому проделанные расчеты следует считать приближенными, помогающими оценить тенденции в протекании процессов во время смешения растворов 1 и 2.

III. Методика эксперимента

Процесс смены растворов осуществлялся в аппаратуре, описанной в [2]. Строго насыщенный при 760 °C раствор Ga—As (использовался контакт с подложкой — источником GaAs) заливался на подложку GaAs (100) и выдерживался там 10 с. Затем осуществлялось вытеснение этого раствора жидкой фазой Al—Ga—As такого состава, равновесный которому твердый раствор $Al_xGa_{1-x}As$ имел $x=0.55$. Кратность промывки изменялась от 1 до 4, скорость промывки 10—35 см/с. После осуществления смены раствор Al—Ga—As выдерживался на подложке в течение времени 1—30 с, а затем сдвигался механически.

Выросшие за время контакта пленки AlGaAs были зеркальными и имели толщину от 50 нм до 1 мкм в зависимости от условий проведения эксперимента. Пленки анализировались с помощью «химического клина» (растяжка толщины слоя в плоскости подложки составляла от 300 до 2000), анодного окисления поверхности с наблюдением в оптическом микроскопе, а также методами электронной оже-спектроскопии (ЭОС) на установке LAS-3000 фирмы «Рибер».

Профили распределения алюминия по толщине твердого раствора были получены регистрацией изменения интенсивности оже-линии Al_{LMM} как при послыном травлении пленки ионами аргона (Ar^+ , 1.5 кэВ, угол падения 15°), так и в режиме сканирования по поверхности «химического клина».

IV. Результаты экспериментов

1. Оценка толщины слоя остаточного раствора

Если раствор Al—Ga—As приводится в контакт непосредственно с подложкой GaAs (без вытеснения промежуточной жидкой фазы Ga—As, которая отсутствует), то в случае его недосыщенного состояния поверхность подложки после контакта приобретает характерную шероховатую поверхность даже при весьма малых недосыщениях Al—Ga—As ($\delta \sim -3\%$ [9]), обусловленную особенностями контакта недосыщенной трехкомпонентной жидкой фазы Al—Ga—As и бинарной подложки GaAs [10]. Поэтому, если осуществить вытеснение раствора 1 (Ga—As) недосыщенным раствором 2 (Al—Ga—As), можно найти условия, при которых поверхность GaAs начнет растворяться.

На рис. 5 представлены зависимости пространственного распределения пересыщения в области перед подложкой для различных моментов времени для случая, когда промывочный раствор Al—Ga—As недосыщен на 30 %, а $h=10^{-2}$ см. Видно, что с течением времени область недосыщения достигает подложки. Видно также, что это время для $h=10^{-2}$ см достаточно велико и составляет около 30 с. Определив экспериментально интервал времени, по истечении которого область недосыщения достигает поверхности твердой фазы, т. е. рост AlGaAs сменяется его растворением, по возникновению характерной для растворения GaAs в недосыщенной жидкой фазе Al—Ga—As шероховатой поверхности можно оценить толщину слоя оставшегося раствора h .

На рис. 3 показано изменение пересыщения δ на поверхности твердой фазы для $h=10^{-3}$ см во времени при введении начального недосыщения раствора Al—Ga—As на 4 и 10 % (кривые 5a и 5b). Видно, что эти зависимости пересекают ось t (точки b и a) и $\delta|_{y=l}$ становится отрицательным при временах 8 и 1.5 с соответственно. Эксперименты показали, что контакт в течение 1—3 с после четырехкратной смены растворов с использованием жидкой фазы Al—Ga—As, недосыщенной на 10 и 4 %, в обоих случаях создавал поверхность твердой фазы, имевшую четкие следы растворения. Следовательно, толщина остаточного слоя раствора при четырехкратной промывке не превышала 10^{-3} см.

Аналогичные эксперименты были проведены при двухкратной промывке раствором Al—Ga—As. Оказалось, что при времени контакта 1—3 с и $\delta_0 = -10\%$ наблюдалось частичное растворение поверхности подложки: около двух третей поверхности по ходу раствора имели следы растворения, а далее обнаруживался сплошной слой толщиной ~ 100 нм. Можно предположить, что (рис. 3, кривая 5б) слой остаточного раствора имел толщину около 10^{-3} см, причем эта толщина была разной и возрастала по ходу раствора (так и должно быть, рис. 1, б). Уменьшение времени контакта приводило к возрастанию площади, занимаемой сплошной пленкой AlGaAs.

Следует отметить, что поверхность подложки GaAs, находившаяся между областями сплошного растворения и сплошной пленкой AlGaAs, имела ячеистый характер, отражающий, по-видимому, турбулентную природу перемешивания растворов в области их соприкосновения (изогнутые стрелки на рис. 1, б).

Таким образом, по нашим оценкам, величина слоя остаточного раствора оказалась приблизительно в 20 раз меньше, чем рассчитанная по выражению (1), которое использовали в [4].

Эти результаты позволяют предположить, что в ранее описанных оценочных экспериментах с использованием четырехкратной промывки толщина остаточного слоя была существенно меньше 10^{-3} см. Таким образом, с помощью метода контактной смены растворов, используя интенсивную промывку, удастся обеспечить смену растворов практически без промежуточного их смешения. В результате мы имеем эквивалент технологии жидкофазной гетерозитаксии с механическим сдвигом растворов, но лишенный ее существенного недостатка — контакта с атмосферой ампулы поверхностей промежуточных пленок гетероструктуры.

2. Переходные слои

Известно, что в системе AlGaAs/GaAs, когда пересыщенный раствор Al—Ga—As кратковременно контактирует с подложкой GaAs, протяженность переходных слоев редко достигает ~ 10 нм, находясь обычно в пределах 15—30 нм [11, 12]. Как видно из раздела II, присутствие остаточного раствора на подложке GaAs должно уширать ПС. На рис. 6, а приведен профиль ПС, измеренный на образце, выращенном с помощью контактной смены растворов с четырехкратной промывкой. Видно, что величина ПС попадает в диапазон, отмеченный выше, для технологии, в которой смешение растворов не используется. Этот факт свидетельствует в пользу того, что в методе контактной смены растворов действительно реально достижимыми являются такие условия, при которых слой остаточного раствора пренебрежимо мал, т. е. подтверждается оцененная выше чрезвычайно малая толщина слоя оставшегося первичного раствора.

Изменение условий роста в направлении увеличения толщины слоя остаточного раствора, судя по оценочным расчетам раздела II, должно привести к возрастанию протяженности ПС. На рис. 6, б показан профиль распределения алюминия по толщине пленки, выросшей в результате смешения растворов после однократной промывки жидкой фазы Ga—As. Видно, что величина ПС гораздо больше, чем у пленки, профиль распределения алюминия в которой показан на рис. 6, а.

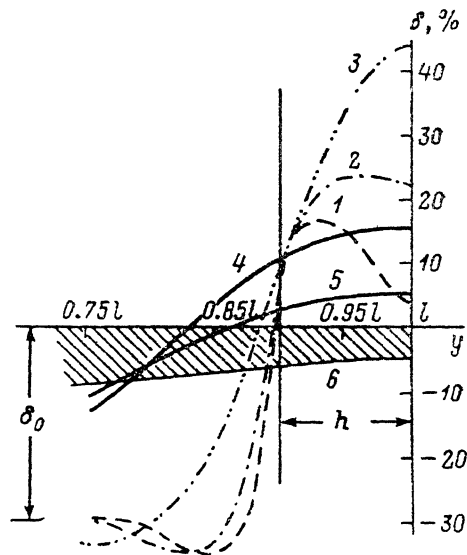


Рис. 5. Пространственное распределение пересыщения по мышьяку в жидкой фазе в области смешения ($\delta_0 = -30\%$).
 $t, c: 1 - 0.1, 2 - 0.25, 3 - 1, 4 - 8, 5 - 16,$
 $6 - 32.$

Чем больше толщина остаточного слоя раствора Ga—As, тем больше средняя пересыщенность в жидкой фазе после смешения растворов, тем больше должна быть полная толщина пленки AlGaAs при прочих равных условиях. Большая общая толщина пленки на рис. 6, б по сравнению с рис. 6, а и является результатом того, что толщина остаточного слоя раствора Ga—As h при однократной промывке больше.

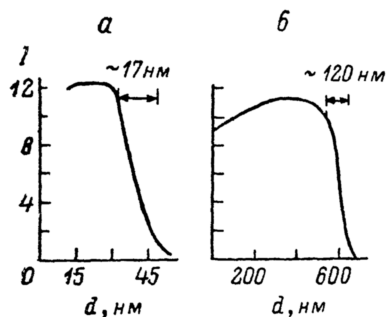


Рис. 6. Профили распределения оже-линии Al_{LMM} по толщине пленок $Al_xGa_{1-x}As$.

а — ионное травление, б — сканирование по клину.

Замедление скорости промывки (например, в 10 раз) эквивалентно многократной, но многократной промывке, что должно привести к ступенчатому нарастанию концентрации алюминия в переходном слое, и этот эффект наблюдался нами на практике.

3. Влияние морфологии поверхности твердой фазы

В условиях, при которых промывка может обеспечить малую остаточную толщину вымываемого раствора, большое значение приобретает величина шероховатости поверхности твердой фазы, по которой производится смыв, так как может повлиять на толщину оставшегося раствора GaAs. Это в свою очередь

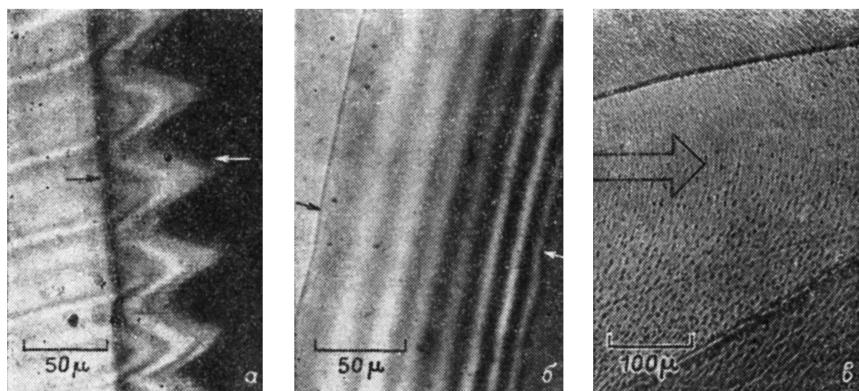


Рис. 7. Микрофотографии поверхностей образцов после смены растворов.

может явиться причиной неоднородности как ПС, так и толщины слоя AlGaAs, выросшего в процессе контакта.

Для подтверждения сказанного на рис. 7, а представлена фотография поверхности образца, стравленного на клин и покрытого анодным окислом. Стрелками отмечена пленка AlGaAs. Справа темного цвета — арсенид галлия. В данном случае смена растворов осуществлялась после того, как был выращен слой GaAs толщиной 6 мкм. Поверхность этого слоя имеет некоторую шероховатость. Пленка $Al_{0,55}Ga_{0,45}As$ толщиной 1000—200 Å покрыта интер-

Если слой остаточного раствора Ga—As имеет относительно большую величину, то доля AlAs в однородной части слоя $Al_xGa_{1-x}As$ будет меньше, чем в твердом растворе, равновесном используемой для промывки жидкой фазе Al—Ga—As, вследствие того что количество алюминия в жидкой фазе после смешения уменьшается

$$\bar{X}_{Al}^L / X_{Al}^{L_2} = (l - h) l. \quad (6)$$

Путем сравнения составов (рис. 4) также можно оценивать величину h , однако надежно уменьшение количества AlAs и AlGaAs может быть установлено только при больших h ($h > 0.1l$).

перпендикулярными полосами, вытянутыми в направлении движения раствора (стрелка *a*), отражающими линии равной толщины. Видно, что флуктуации толщины этой пленки имеют регулярный характер. Для сравнения на рис. 7, *б* приведена фотография поверхности пленки также после химического клина и анодного окисления, но изготовленной по методике, описанной в разделе III, т. е. без предварительного выращивания слоя GaAs. Промывка проводилась по полированной поверхности подложки GaAs. Наблюдается практически полная плоскопараллельность слоя AlGaAs.

С другой стороны, даже при гладкой поверхности образца неоднородное движение потока раствора, связанное с особенностями гидродинамики конкретной лодочки, может также привести к неоднородному распределению как ПС, так и толщины слоя AlGaAs по поверхности образца. На рис. 7, *в* приведена фотография поверхности подложки, морфология которой является результатом растворения GaAs в недосыщенной жидкой фазе Al—Ga—As ($\delta_0 = -4\%$, четырехкратная промывка плюс выдержка в течение 3 с). Вдоль направления движения промывочного раствора (стрелка *a*) образовались гребни (на рис. 7, *в* изображена часть поверхности подложки, близкая к одному из краев шайбы), разделяющие различные потоки раствора. Видно, что от одного участка к другому характер шероховатости закономерно меняется, отражая, по-видимому, степень промывки и соответственно степень растворения поверхности.

Выводы

1. Показано, что с помощью методики смены одного раствора другим в системе AlGaAs/GaAs можно получать переходные слои по алюминию столь же малые, как и при использовании отдельных растворов без смешения.

2. Теоретически и экспериментально показано, что протяженность ПС возрастает при уменьшении кратности промывки и скорости движения жидкой фазы.

3. Теоретически показано, что при смешении растворов Al—Ga—As и Ga—As внутри жидкой фазы за счет опережающей диффузии алюминия возникает существенное пересыщение, превышающее метастабильное пересыщение жидкой фазы Al—Ga—As и приводящее к гомогенному образованию центров новой фазы.

4. Степень пересыщения или недосыщения промываемого раствора Al—Ga—As должна слабо влиять на величину переходного слоя, если его образование определяется процессами, происходящими при смешении растворов.

В заключение авторы благодарят С. И. Чикичева за полезное обсуждение работы.

Литература

- [1] *Alferov Zh. I., Andreyev V. M., Konnikov S. G. et al.* // Krist. und Techn. 1976. Bd 11. N 10. S. 1013—1020.
- [2] *Bolkhovityanov Yu. B., Bolkhovityanova R. I., Hair E. H. et al.* // Cryst. Res. and Techn. 1982. Vol. 17. N 12. P. 1491—1499.
- [3] *Шлихтин Г.* Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.
- [4] *Горшков В. П., Галченко Д. В., Бондарь С. А. и др.* // Электронная техника. Сер. 6. Материалы, 1987. Вып. 2 (223). С. 48—53.
- [5] *Crank J.* The mathematics of diffusion. Oxford: Clarendon Press, 1956. 347 p.
- [6] *Карслоу Г., Эгер Д.* Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 487 с.
- [7] *Dutarte D.* // J. Cryst. Growth. 1983. Vol. 64. N 2. P. 268—274.
- [8] *Галченко Д. В., Понов В. П., Зотов Л. П.* // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. 1987. Вып. 3 (224). С. 39—41.
- [9] *Bolkhovityanov Yu. B., Bolkhovityanova R. I.* // Phys. St. Sol. (a). 1987. Vol. 99. N 1. P. 159—164.
- [10] *Bolkhovityanov Yu. B., Bolkhovityanova R. I., Vaulin Yu. D. et al.* // J. Cryst. Growth. 1986. Vol. 78. N 1. P. 335—341.
- [11] *Garner C. M., Su C. I., Shen I. D. et al.* // J. Appl. Phys. 1979. Vol. 50. N 5. P. 3383—3389.
- [12] *Hayakawa T., Miyauchi N., Suyama T. et al.* // J. Appl. Phys. 1984. Vol. 56. N 11. P. 3088—3095.

Институт физики полупроводников
СО АН СССР
Новосибирск

Поступило в Редакцию
12 июня 1987 г.
В окончательной редакции
28 сентября 1988 г.