

06; 12

© 1990 г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ МОДЕЛИ
РЕЛАКСАЦИОННОЙ ЖИДКОСТНОЙ ЭПИТАКСИИ
С ИНВЕРСИЕЙ МАССОПЕРЕНОСА,
ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ
СУПЕРТОНКИХ СЛОЕВ A^3B^5

В. Н. Бессолов, С. Г. Конников, М. В. Лебедев, К. Ю. Погребницкий,
Б. В. Царенков

Изложены результаты экспериментальной проверки (на примере выращивания слоев GaAs на подложке GaAlAs) следствий ранее опубликованной модели релаксационной жидкостной эпитаксии с инверсией массопереноса, позволяющей создавать супертонкие ($\sim 100 \text{ \AA}$) слои при любой температуре эпитаксии и сколь угодно большом времени контакта раствора-расплава с подложкой.

Гетероэпитаксия GaAs на подложке GaAlAs осуществлялась из пересыщенного раствора-расплава Ga—As, находящегося в капилляре, образованном подложкой GaAlAs (основной) и вспомогательной пластинкой GaAs (инвертирующей).

Экспериментально показано следующее. Толщина слоя GaAs на основной подложке существенно меньше толщины слоя GaAs на инвертирующей пластинке. Отношение толщины слоя GaAs, выращенного на подложке GaAlAs к толщине слоя GaAs, вырастающего на пластинке GaAs, тем меньше, чем меньше переохлаждение раствора-расплава, чем меньше толщина капилляра и чем больше содержание AlAs в подложке.

Экспериментальные результаты соответствуют следствиям модели.

1. В работе [1] были изложены физические основы (модель) релаксационной жидкостной эпитаксии с инверсией массопереноса, предназначенной для выращивания супертонких ($\sim 100 \text{ \AA}$) слоев A^3B^5 при неограниченном времени контакта подложки с раствором-расплавом (в отличие от краткосрочной эпитаксии [2, 3]) и любой температуре эпитаксии (в отличие от низкотемпературной эпитаксии [4]).

В данной работе изложены результаты экспериментальной проверки следствий этой модели на примере выращивания супертонких слоев GaAs на подложке GaAlAs.

2. Рассмотрим релаксационную жидкостную эпитаксию с инверсией массопереноса [1] на примере выращивания слоев GaAs на подложке GaAlAs.

Идея метода: в процессе выращивания на подложке GaAlAs слоя GaAs пересыщение раствора-расплава Ga—As снимается (релаксирует) за счет переноса атомов As в сторону, противоположную подложке GaAlAs (инверсный массоперенос), и релаксация пересыщения полностью заканчивается к моменту образования слоя GaAs заданной толщины h .

Организация инверсного массопереноса основывается на том обстоятельстве, что скорость гомоэпитаксиального роста существенно выше скорости гетероэпитаксиального роста. Поэтому для реализации инверсного массопереноса используется вспомогательная (инвертирующая) пластинка GaAs, на которой и происходит гомоэпитаксиальный рост слоя GaAs; подложка и пластинка расположены параллельно друг другу на расстоянии l (рис. 1).

За время релаксации пересыщения раствора-расплава t_r , равное времени диффузии атомов As от подложки GaAlAs к пластинке GaAs t_l ($t_r = t_l = l^2/D$),

где D — коэффициент диффузии As в растворе-расплаве Ga—As), на подложке вырастает слой GaAs толщиной h , а на инвертирующей пластинке — слой GaAs толщиной h_i , при этом h может оказаться много меньше h_i .

Рассмотрим теперь условия, необходимые для того, чтобы толщина h оказалась малой.

Эпитаксиальный рост слоя GaAs на подложке GaAlAs проходит две стадии: гетероэпитаксиальную, а затем гомоэпитаксиальную. Гетероэпитаксия идет за счет образования зародышей GaAs на поверхности GaAlAs, которые, сливаясь, образуют сплошной первичный слой толщиной h_0 . После образования сплошного первичного слоя гетероэпитаксиальный рост прекращается и наступает гомоэпитаксиальный рост, который продолжается до полной релаксации пересыщения раствора-расплава; при этом нарастает слой толщиной Δh и полная толщина окончательно выросшего слоя $h = h_0 + \Delta h$.

Толщина первичного слоя должна быть тем меньше, чем меньше критический радиус зародыша r_{cr} , т. е. чем больше температура эпитаксии T_e , чем больше начальное пересыщение раствора-расплава ΔN_{As}^0 и чем меньше краевой угол между подложкой и зародышем Θ , который примерно равен углу смачивания подложки раствором-расплавом и зависит от состава подложки и состояния ее поверхности. Толщина же гомоэпитаксиального слоя Δh должна быть

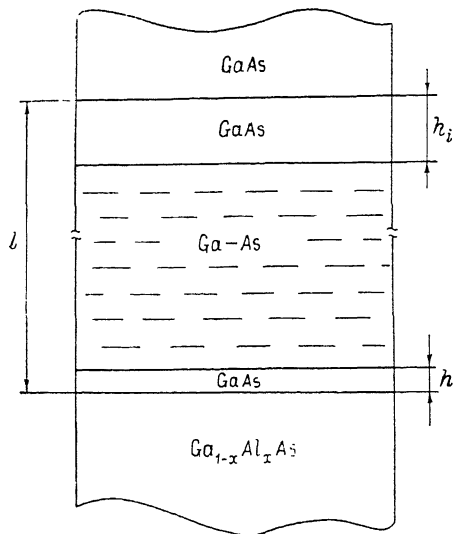


Рис. 1. Взаимное расположение подложки GaAlAs, пластинок GaAs и раствора-расплава Ga—As при релаксационной жидкостной эпитаксии с инверсией массопереноса.

тем меньше, чем меньше пересыщение раствора-расплава, при котором начнется гомоэпитаксиальный рост.

Итак, в идеале для получения супертонкого слоя GaAs на подложке GaAlAs необходимо высокое начальное пересыщение, релаксация которого должна закончиться к моменту начала гомоэпитаксиального роста, чтобы полная толщина h не сильно отличалась от толщины первичного слоя h_0 .

3. В данной работе экспериментально изучались толщина слоя h , выросшего на основной подложке (GaAlAs), толщина слоя h_i , выросшего на инвертирующей пластинке (GaAs), и их отношение h/h_i в зависимости от начального пересыщения раствора-расплава ΔN_{As}^0 , толщины капилляра l и содержания AlAs в подложке x при одной и той же температуре эпитаксии T_e .

Согласно модели [1] должно быть следующее. С ростом начального пересыщения раствора-расплава ΔN_{As}^0 (при постоянных l и x) толщина сплошного первичного слоя h_0 будет падать, а толщина слоя Δh , выросшего на нем при гомоэпитаксии, будет возрастать, причем Δh будет увеличиваться быстрее, чем h_0 уменьшаться, и поэтому h будет возрастать. Толщина h_i и отношение h/h_i тоже должны возрастать (см. рис. 5 в [1]).

С увеличением толщины капилляра l (при постоянных ΔN_{As}^0 и x) h_0 будет оставаться постоянной, так как она зависит только от ΔN_{As}^0 (если пренебречь уменьшением скорости снятия пересыщения раствора-расплава в процессе образования первичного слоя), а Δh и, следовательно, h будут возрастать. Толщина h_i тоже будет возрастать, а отношение h/h_i будет возрастать и при больших l стремится к единице.

С увеличением содержания AlAs в подложке x (при постоянных ΔN_{As}^0 и l) h_0 будет возрастать (слабо) за счет увеличения краевого угла Θ (поскольку $h_0 = r_{cr}(1 - \cos \Theta)$), однако при этом будет сильно увеличиваться время образова-

ния сплошного первичного слоя (см. формулы (4)—(6) в [1]) п, следовательно, сильно уменьшаться время гомоэпитаксиального роста, что приведет к сильному уменьшению Δh , т. е. толщина h будет уменьшаться. Толщина h_i должна при этом увеличиваться, а отношение h/h_i уменьшаться.

Таким образом, толщина h и отношение h/h_i должны уменьшаться с уменьшением начального пересыщения раствора-расплава и толщины капилляра п с увеличением содержания AlAs в подложке.

4. Экспериментальная проверка модели [1] проводилась следующим образом. Исходно брались две химически полированные пластинки GaAs, поверхности которых были ориентированы по плоскости (100), и помещались в специальную кассету. На одной из них вначале выращивался слой GaAlAs толщиной 0.1—0.3 мкм. Затем пластинка GaAs со слоем GaAlAs (подложка) помещалась под другую пластинку GaAs (инвертирующую), так что образовывался капилляр толщиной l (рис. 1). Использовались подложки $Ga_{1-x}Al_xAs$ трех составов ($x=0.1, 0.2$ и 0.4) и капилляры толщиной $l=30$ и 50 мкм.

Эпитаксия слоя GaAs на подложку $Ga_{1-x}Al_xAs$ велась в изотермических условиях из предварительно пересыщенного раствора-расплава Ga—As. Начальное

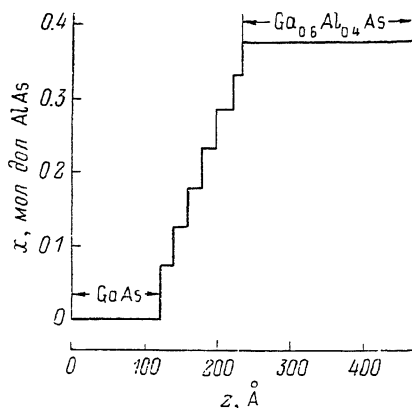


Рис. 2. Распределение состава в гетероструктуре GaAs/GaAlAs, выращенной релаксационной жидкостной эпитаксией с инверсией массопереноса при температуре эпитаксии $T_e=900$ °C, толщине капилляра $l=30$ мкм.

Начальное переохлаждение раствора-расплава $\Delta T^0=5$ град.

пересыщение раствора-расплава ΔN_{As}^0 создавалось путем его предварительного переохлаждения на ΔT^0 . Температура эпитаксии выбиралась высокой ($T_e=900$ °C), чтобы проверить модель в условиях, трудных для получения супертонких слоев; отметим, что при высокой температуре эпитаксии заполнение капилляра раствором-расплавом обеспечивается за счет сил поверхностного натяжения.

Время контакта подложки с раствором-расплавом было 2 мин и существенно превосходило время релаксации пересыщения раствора-расплава, которое по оценкам не превосходило 0.1 с для капилляра толщиной 50 мкм.

После эпитаксии состав и толщина слоя выросшего на подложке GaAlAs измерялась методом ОРФЭС [3]. Толщина слоя GaAs, выросшего на инвертирующей пластинке GaAs, измерялась с помощью профилографа-профилометра ПП-252.

5. Экспериментальные результаты таковы. Между слоем GaAs и подложкой $Ga_{1-x}Al_xAs$ образуется переходный варизонный слой GaAlAs (рис. 2), толщина которого h_{var} оказывается тем больше, чем выше начальное переохлаждение раствора-расплава ΔT^0 (для $\Delta T^0=4-6$ град), и находится в пределах 80—300 Å.

Толщина слоя GaAs (h), вырастающего на подложке GaAlAs вслед за переходным слоем, существенно меньше толщины слоя GaAs (h_i), вырастающего на пластинке GaAs (рис. 3—5). Так, при выращивании слоя GaAs на подложке $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ при начальном переохлаждении раствора-расплава 5 град и толщине капилляра 30 мкм оказывается, что $h=110$ Å, а $h_i=2800$ Å, при этом $h_{var}=120$ Å.

С ростом начального переохлаждения раствора-расплава ΔT^0 толщины слоев h и h_i и их отношение h/h_i увеличиваются, начиная только с некоторых значений $\Delta T^0=\Delta T^0_{min}$ (рис. 3). Например, при толщине капилляра 50 мкм сплошной слой GaAs на подложке $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ не образуется при $\Delta T^0 < 4$ град. С ростом толщины капилляра l толщины h и h_i и отношение h/h_i увеличиваются (рис. 4). С увеличением содержания AlAs в подложке $Ga_{1-x}Al_xAs$ толщина h уменьшается, h_i увеличивается, а h/h_i уменьшается (рис. 5).

Величина минимального начального переохлаждения раствора-расплава ΔT^0_{\min} , необходимая для образования сплошного слоя, уменьшается с уменьшением содержания AlAs в подложке (при фиксированной l) с и увеличением толщины капилляра l (при фиксированном x).

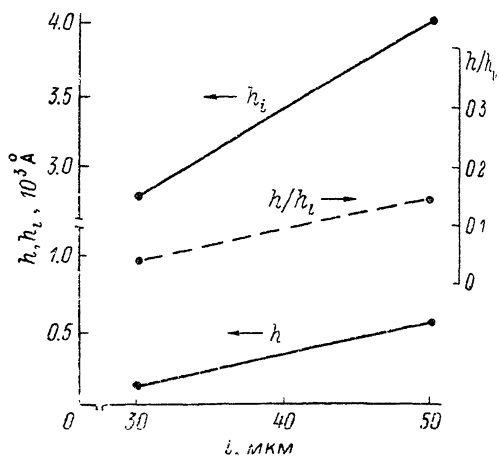
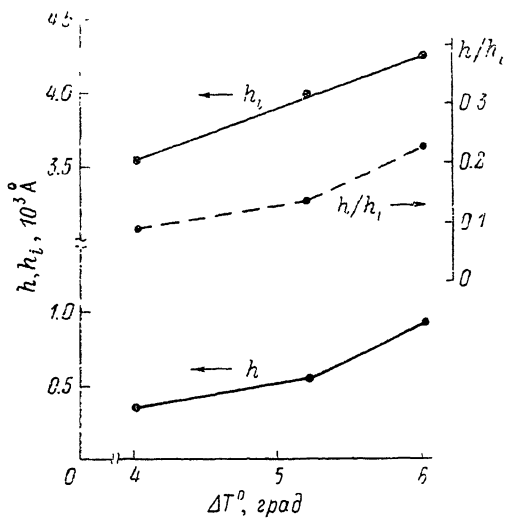


Рис. 3. Зависимость толщины слоя GaAs на подложке $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ h , толщины слоя GaAs на пластинке GaAs h_i и отношения толщин h/h_i от начального переохлаждения раствора-расплава ΔT^0 при $T_s=900^\circ\text{C}$ и $l=50$ мкм.

Рис. 4. Зависимость толщины слоя GaAs на подложке $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ h , толщины слоя GaAs на пластинке GaAs h_i и отношения толщин h/h_i от толщины капилляра l при $T_s=900^\circ\text{C}$ и $\Delta T^0=5$ град.

6. Итак, существенное различие толщин слоев GaAs на основной подложке и инвертирующей пластинке подтверждает модель релаксационной жидкостной эпитаксии с инверсией массопереноса, изложенную в [1].

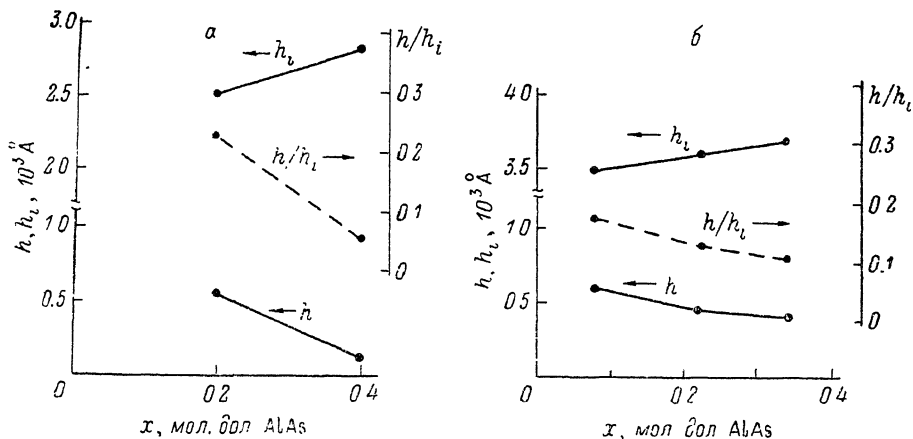


Рис. 5. Зависимость толщины слоя GaAs на подложке $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ h , толщины слоя GaAs на пластинке GaAs h_i и отношения толщин h/h_i от содержания AlAs в подложке x при $T_s=900^\circ\text{C}$, $\Delta T^0=5$ град и двух значениях толщины капилляра l .

l , мкм: а — 30, б — 50.

Экспериментальные результаты изучения зависимости h , h_i и h/h_i от начального переохлаждения, толщины капилляра и содержания AlAs в подложке соответствуют следствиям модели. Отметим, что экспериментальная зависимость h , h_i и h/h_i от ΔT^0 существенно менее резкая, чем оцениваемая в [1]; это и ожидалось, поскольку в [1] предполагалось, что критический радиус за-

родышей и скорость зародышеобразования слоя GaAs на подложке GaAlAs остаются неизменными в процессе образования сплошного первичного слоя. Эксперимент же указывает на то, что уменьшение пересыщения раствора-расплава в процессе образования первичного слоя существенно уменьшает скорость зародышеобразования и, следовательно, увеличивает время образования сплошного первичного слоя.

Теперь рассмотрим связь минимальной величины начального переохлаждения раствора-расплава ΔT_{\min}^0 , необходимого для образования сплошного слоя GaAs на подложке GaAlAs, с толщиной капилляра l и содержанием AlAs в подложке x .

То обстоятельство, что ΔT_{\min}^0 увеличивается с уменьшением l (при фиксированном x), отражает сокращение времени релаксации пересыщения раствора-расплава t_r из-за уменьшения l . Действительно, при некотором значении l оно становится меньше времени образования сплошного первичного слоя GaAs на подложке GaAlAs, и поэтому для получения сплошного слоя необходимо большее начальное переохлаждение раствора-расплава.

Тот факт, что ΔT_{\min}^0 увеличивается с увеличением x (при фиксированной l) отражает увеличение времени образования сплошного первичного слоя из-за увеличения краевого угла Θ . Так, при некотором значении x оно становится больше t_r , поэтому для получения сплошного слоя требуется большее начальное переохлаждение раствора-расплава.

7. Таким образом, в данной работе, во-первых, экспериментально подтверждена модель релаксационной жидкостной эпитаксии с инверсией массопереноса [1], во-вторых, экспериментально показана возможность создания супертопких (~ 100 А) слоев GaAs на подложке GaAlAs при высокой температуре эпитаксии и сколь угодно большом времени контакта подложки с раствором-расплавом.

Авторы благодарны В. А. Дмитриеву за измерения на профилометре ПП-252.

Список литературы

- [1] Бессолов В. Н., Кукушкин С. А., Лебедев М. В., Царенков Б. В. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 8. С. 1507—1512.
- [2] Rezek E. A., Shichijo H., Vojak B. A., Holonyak N. Jr. // Appl. Phys. Lett. 1977. Vol. 31. N 5. P. 534—536.
- [3] Арсентьев И. Н., Гарбузов Д. З., Конников С. Г. и др. // ФТП. 1986. Т. 20. Вып. 12. С. 2206—2211.
- [4] Алферов Ж. И., Андреев В. М., Воднев А. А. и др. // ФТП. 1986. Т. 20. Вып. 2. С. 381—383.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
2 марта 1989 г.