

©1994

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ GaAs(100) В СТАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ И В ПРОЦЕССЕ ЭПИТАКСИАЛЬНОГО РОСТА ИЗ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПУЧКОВ

*А.Н.Алексеев, С.Ю.Карпов, В.Е.Мячин, Ю.В.Погорельский,
И.Ю.Русанович, И.А.Соколов, Г.А.Фокин*

Проведено исследование температурной зависимости интенсивности зеркального рефлекса при дифракции электронов на поверхности GaAs(100) в статических условиях I_{st} и в режиме роста I_{din} . Зависимость $I_{din}(T)$ оказалась в целом аналогичной зависимости $I_{st}(T)$, за исключением области низких температур, близких к структурному переходу $(2 \times 4) \rightarrow c(4 \times 4)$. Наблюдаемые отличия можно объяснить, предполагая, что переход $(2 \times 4) \rightarrow c(4 \times 4)$ происходит через промежуточную (возможно, метастабильную) поверхностную структуру, имеющую реконструкцию (2×1) . Исследования динамики прямого перехода $c(4 \times 4) \rightarrow (2 \times 4)$ показали, что переход $c(4 \times 4) \rightarrow (2 \times 4)$ происходит в отсутствие кинетического ограничения скорости превращения. Показано, что скорость обратного перехода $(2 \times 4) \rightarrow c(4 \times 4)$ ограничивается кинетикой процесса адсорбции мышьяка на поверхности. Экспериментально определено количество галлия $\Delta\theta_{Ga}$, индуцирующего структурный переход $c(4 \times 4) \rightarrow (2 \times 4)$. Величина $\Delta\theta_{Ga}$ оказалась не зависящей от внешнего потока Ga и равной 0.20 ± 0.04 монослоя.

В настоящее время молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ) заняла прочное место в ряду перспективных эпитаксиальных технологий, позволяющих получать полупроводниковые слои с толщинами на уровне атомарных. Одновременно с этим метод МПЭ дает уникальную возможность изучения чистой поверхности кристаллических материалов.

Наиболее информативными для исследования поверхности, как правило, оказываются методики, основанные на дифракции отраженных быстрых электронов (ДБЭО). Кроме традиционной информации о реконструкции поверхности, использование ДБЭО дает возможность измерять скорость эпитаксиального роста [1,2] и испарения (десорбции) материала [3,4], длину диффузии атомов на поверхности кристалла [5,6], критическую толщину напряженной эпитаксиальной пленки, при которой начинается релаксация напряжений [7]. В случае использования антибрегговской геометрии рассеяния электронов возможно получить информацию о шероховатости поверхности и величине покрытия верхнего монослоя двумерными островками в процессе эпитаксиального роста [8,9]. Измерения интенсивности дифракции на разных углах падения и разных энергиях электронов позволяют восстановить степень заполнения верхних атомных слоев [10]. Путем углового распределения

интенсивности в зеркальном рефлексе получены данные о статистическом распределении расстояний между ступенями на поверхности кристалла [11].

Из всех поверхностей полупроводников группы A^3B^5 в настоящее время наиболее подробно изучена поверхность GaAs(100). Прежде всего имеются достаточно надежные данные о фазовой диаграмме этой поверхности [12-14]. Согласно [12-14], поверхность GaAs(100) претерпевает реконструкцию, образуя ряд поверхностных структур, существование которых определяется величиной внешних потоков тетрамеров (димеров) мышьяка и атомов галлия, а также температурой поверхности T . Основными из этих структур являются так называемая «As-стабилизированная» поверхность, имеющая реконструкцию (2×4) (что соответствует наблюдению в картине ДБЭО дополнительных $1/2$ - и $1/4$ -рефлексов в азимутальных направлениях $[110]$ и $[1\bar{1}0]$), и «Ga-стабилизированная» поверхность, которая характеризуется реконструкцией (4×2) . Как правило, эпитаксиальный рост GaAs проводится на As-стабилизированной поверхности, формирующейся при $T < 630^\circ \text{C}$ для потока мышьяка $F_{As_4} \approx 2 \text{ monolayer/s}$ (один монослой в секунду соответствует потоку атомов или молекул $6.210 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Обедненная мышьяком Ga-стабилизированная поверхность образуется при повышенных температурах ($T > 720^\circ \text{C}$ при $F_{As_4} \approx 2 \text{ monolayer/s}$) и стандартной скорости роста $\sim 1 \mu\text{m/h}$ или в низкотемпературном интервале $470\text{--}650^\circ \text{C}$ при соотношении потоков $F_{As_4}/F_{Ga} < 0.5$. Эта поверхность оказывается неустойчивой относительно образования жидкой фазы (при росте на ней через некоторое время образуются капли Ga, приводящие в дальнейшем к эрозии поверхности [13]). В области промежуточных температур ($630\text{--}720^\circ \text{C}$) при соотношении потоков $F_{As_4}/F_{Ga} > 0.5$ наблюдается переходная поверхностная фаза, имеющая, согласно данным работы [12], реконструкцию (1×1) (в других работах сообщается о наблюдении в этой области реконструкций типа (3×1) , (1×6) или (4×6) [13,14], которые легко трансформируются одна в другую и, по-видимому, являются лабильными).

Кроме описанных выше поверхностных структур, при низких температурах ($T < 470^\circ \text{C}$) появляется еще одна фаза, имеющая реконструкцию $c(4 \times 4)$. Образование этой фазы сопровождается аккумуляцией на поверхности избыточного монослоя мышьяка [15]. В отличие от других структур поверхность $c(4 \times 4)$ существует только в отсутствие внешнего потока галлия. При поступлении Ga на поверхность она трансформируется в структуру (2×4) .

Как уже отмечалось выше, поведение интенсивности дифракции (здесь и далее под интенсивностью дифракции мы будем подразумевать интенсивность зеркального рефлекса, измеряемую при наблюдении дифракционной картины в азимутальном направлении $[110]$) в антибрэгговских условиях позволяет получить информацию о шероховатости поверхности полупроводника. Действительно, антибрэгговская геометрия рассеяния обеспечивает гасящую интерференцию электронов, отраженных от двух соседних атомных плоскостей. В этом случае уменьшение интенсивности зеркального рефлекса оказывается пропорциональным величине $\theta(1 - \theta)$, где θ — степень заполнения верхнего

монослоя [8]. При наличии большого числа ступеней на поверхности θ принимает скорее промежуточные значения, чем близкие к нулю или к единице. Поэтому рост шероховатости поверхности (поверхностной плотности ступеней) ведет к падению интенсивности дифракции.

Исследованию зависимости интенсивности дифракции от температуры и состава поверхности полупроводников посвящен ряд работ [16-19]. Во всех этих работах в области существования реконструкции (2×4) регистрировалась максимальная интенсивность дифракции. При повышении температуры вблизи перехода $(2 \times 4) \rightarrow (1 \times 1)$ наблюдалось падение интенсивности дифракции. Такое поведение могло быть связано либо с увеличением шероховатости поверхности (т.е. увеличением поверхностной плотности ступеней), либо с изменением эффективности рассеяния электронов поверхностью при ее обеднении мышьяком в процессе подъема температуры.

В области низких температур при переходе $(2 \times 4) \rightarrow c(4 \times 4)$ также наблюдалось падение интенсивности дифракции. В [16] оптическим методом было экспериментально обнаружено, что наличие избыточного мышьяка в верхнем монослое приводит к увеличению шероховатости поверхности GaAs(100). Авторы [16] предположили, что обогащение поверхности мышьяком вызывает появление большого количества протяженных ступеней монокотной высоты, имеющих направленность, параллельную азимуту [110]. Повышение температуры приводит к сбросу избыточного мышьяка и соответственно к росту интенсивности зеркально-дифрагированного пучка.

Дополнительная информация была получена при целенаправленном варьировании состава поверхности GaAs путем подачи на нее дозированного количества атомов Ga в отсутствие внешнего потока мышьяка [17]. В этой работе было установлено, что накопление галлия на поверхности $c(4 \times 4)$ действует аналогично подъему температуры, т.е. приводит к переходу $c(4 \times 4) \rightarrow (2 \times 4)$ и соответственно к повышению интенсивности зеркального рефлекса.

В данной работе представлены результаты:

а) Исследования шероховатости поверхности GaAs(100) в процессе эпитаксиального роста и без него при изменении температуры в интервале от 470 до 625° С, соответствующем последовательному изменению реконструкции поверхности GaAs $c(4 \times 4) \rightarrow (2 \times 4) \rightarrow (1 \times 1)$.

б) Исследования динамики перехода $c(4 \times 4) \rightarrow (2 \times 4)$ при поступлении на поверхность внешнего потока галлия, а также динамики обратного перехода $(2 \times 4) \rightarrow c(4 \times 4)$; основное внимание уделялось при этом изучению зависимости величины поверхностного покрытия галлия, индуцирующего переход $c(4 \times 4) \rightarrow (2 \times 4)$, от скорости роста (внешнего потока галлия) (наличие такой зависимости указывало бы на кинетическое ограничение скорости перехода $c(4 \times 4) \rightarrow (2 \times 4)$).

в) Изучения влияния скорости роста на шероховатость поверхности при изменении ее начальной реконструкции от $c(4 \times 4)$ к (2×4) с целью определить, в какой степени на свойства растущей поверхности оказывает влияние исходная ее реконструкция.

Данные эксперименты выполнены в едином цикле с целью сопоставления их результатов друг с другом.

1. Эксперимент

Эксперименты проводились на автоэпитаксиальных слоях GaAs толщиной не менее $1.0 \mu\text{m}$, выращенных на полуизолирующих подложках GaAs с ориентацией (100). Падающий поток галлия F_{Ga} , откалиброванный с помощью измерений периода осцилляций интенсивности дифракции, варьировался в пределах $0.4\text{--}1.0 \text{ monolayer/s}$. Поток тетрамеров мышьяка F_{As_4} , определенный из стехиометрического отношения $F_{\text{As}_4}/F_{\text{Ga}} = 0.5$, соответствующего изменению реконструкции $(2 \times 4) \rightarrow c(8 \times 4)$ при температуре подложки 560°C , поддерживался постоянным в ходе эксперимента на уровне $\sim 2 \text{ monolayer/s}$. Температура подложки измерялась термопарой, расположенной вблизи держателя. Калибровка термопары осуществлялась на основе поверхностной фазовой диаграммы GaAs(100) [12]. В процессе эксперимента температура подложки изменялась в диапазоне от 470 до 625°C . Согласно данным работы [20], десорбция галлия в этом температурном интервале пренебрежимо мала, тем самым установленная скорость роста оставалась неизменной при варьировании температуры в указанных пределах.

Картина ДБЭО регистрировалась при угле падения пучка электронов на подложку $\sim 1.5^\circ$ и энергии электронов 10 eV (что соответствует условиям отражения электронов, близким к антибрэгговским). Регистрация осуществлялась в азимутальном направлении [110]. Для анализа картины дифракции использовалась специальная видеосистема, считывающая изображение с люминесцентного экрана дифрактометра быстрых электронов и позволяющая записывать временные изменения интенсивности дифракции с частотой 16.7 Hz . В экспериментах регистрировалась интенсивность зеркального рефлекса, усредненная по малой угловой области. Площадь этой области выбиралась исходя из оптимального отношения сигнала к шуму и составляла менее 0.1 части от площади, занимаемой зеркальным рефлексом в процессе эпитаксиального роста. Для уменьшения влияния эффектов динамической дифракции полярный и азимутальный углы падающего электронного пучка, установленные в начале эксперимента, не изменялись вплоть до его окончания [6].

Были проведены три серии экспериментов. В первой серии экспериментов осцилляции интенсивности зеркального рефлекса, наблюдаемые после открывания заслонки источника Ga, регистрировались при различных значениях падающего потока галлия и постоянных температурах подложки 470 и 500°C . Данные значения температуры были выбраны близкими к температуре перехода $c(4 \times 4) \rightarrow (2 \times 4)$ так, чтобы им соответствовала начальная реконструкция поверхности $c(4 \times 4)$ или (2×4) . Во второй серии экспериментов поток галлия оставался фиксированным и равным 0.96 monolayer/s , при этом температура образца изменялась в диапазоне $470\text{--}625^\circ \text{C}$. В этих условиях измерялись интенсивность зеркального рефлекса в отсутствие эпитаксиального роста I_{st} (до момента открытия заслонки источника галлия) и интенсивность зеркального рефлекса в процессе установившегося эпитаксиального роста I_{din} (после полного затухания осцилляций). В третьей серии экспериментов регистрировалось изменение интенсивности зеркального рефлекса в отсутствие эпитаксиального роста I_{st} при нагреве образца

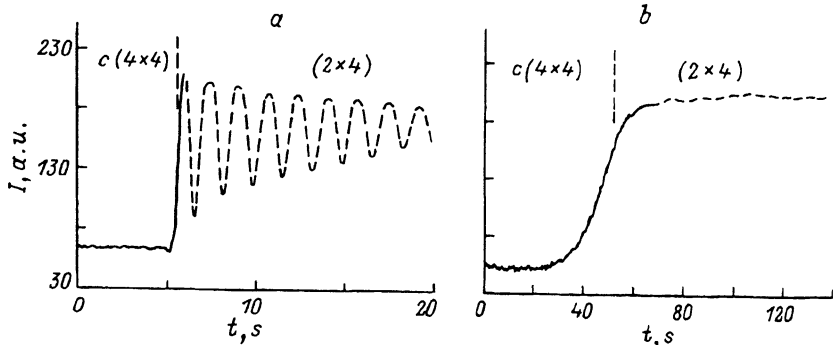


Рис. 1. Временные зависимости интенсивности зеркального рефлекса при включении потока галлия ($F_{\text{Ga}} \approx 0.96$ monolayer/s, температура подложки 470°C) (a) и при нагреве подложки в статическом режиме от 470 до 500°C (скорость нагрева 0.1 K/s) (b).

от 470 до 625°C со скоростью 0.1 K/s . Все три серии экспериментов проводились при одном и том же потоке мышьяка $F_{\text{As}_4} \approx 2$ monolayer/s.

Типичное поведение интенсивности зеркального рефлекса после включения потока Ga, полученное в первой серии экспериментов и соответствующее температуре подложки 470°C , показано на рис. 1, a. Временная зависимость I_{st} , измеренная в процессе нагрева образца от 470 до 500°C (скорость нагрева 0.1 K/s), представлена на рис. 1, b (третья серия экспериментов). На рис. 1, a, b сплошной линией выделены изменения интенсивности дифракции, связанные с переходом поверхности GaAs(100) от реконструкции $c(4 \times 4)$ к (2×4) .

2. Температурная зависимость интенсивности дифракции в статических и динамических условиях

На основе данных, полученных во второй и третьей сериях экспериментов, были построены зависимости I_{st} и I_{din} от температуры образца (рис. 2). Из этого рисунка видно, что I_{st} практически не изменяется в температурном интервале 500 – 560°C и падает при $T < 480$ и $T > 560^\circ \text{C}$. Температурная зависимость I_{din} обнаруживает сходное поведение, за исключением низкотемпературной области, где I_{din} не убывает с уменьшением температуры. Последнее различие объясняется тем, что при $T < 480^\circ \text{C}$ измерения I_{st} происходят на $c(4 \times 4)$ -реконструированной поверхности, в то время как измерения I_{din} производятся в условиях реконструкции (2×4) , имеющей меньшую шероховатость поверхности.

Полученные нами зависимости $I_{\text{st}}(T)$ и $I_{\text{din}}(T)$ хорошо согласуются с аналогичными данными, полученными в [18]. Поведение I_{st} и I_{din} при варьировании температуры исследовалось также в [17, 19]. Основное различие с нашими данными состоит в систематическом общем температурном сдвиге кривых в сторону более высоких температур на 40 – 60°C в [19] и в сторону меньших температур на $\sim 50^\circ \text{C}$ в [17]. Причиной этого является использование в экспериментах [19] существенно больших, чем в нашей работе, потоков мышьяка, в то время как представленная в [17] зависимость I_{st} от температуры поверхности получена в отсутствие внешнего потока мышьяка.

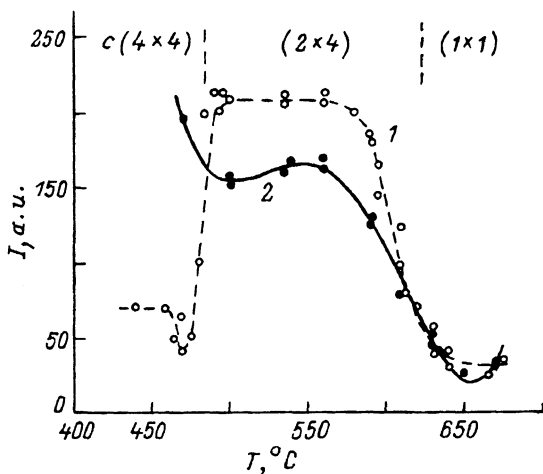


Рис. 2. Температурные зависимости интенсивности зеркального рефлекса в статическом режиме (1) и в процессе установившегося эпитаксиального роста (2).

Сравнение I_{st} и I_{din} (рис. 2) показывает, что степень шероховатости поверхности, растущей со скоростью ~ 1 monolayer/s, незначительно отличается от шероховатости, наблюдаемой в статических условиях. Поскольку после затухания осцилляций на поверхности устанавливается стационарная плотность растущих ступеней, наблюдаемое отличие I_{st} и I_{din} (менее 25% по величине) показывает, что среднее расстояние между этими ступенями в процессе роста сравнимо с расстоянием между ступенями на выглаженной поверхности в статическом режиме.

Следует обратить внимание также на наблюдаемое нами увеличение I_{din} при начале эпитаксиального роста на поверхности, имеющей в статических условиях реконструкцию $c(4 \times 4)$ по сравнению с величиной I_{din} , соответствующей началу эпитаксиального роста на (2×4) -реконструированной поверхности. Более подробно этот эффект обсуждается в разделе 4.

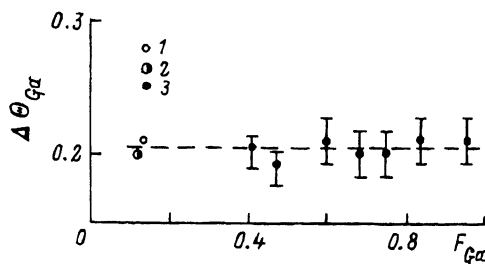
3. Динамика структурного перехода $c(4 \times 4) \rightarrow (2 \times 4)$ поверхности GaAs(100)

В этом разделе приведены данные о динамике структурного перехода $c(4 \times 4) \rightarrow (2 \times 4)$, индуцированного изменением состава поверхности GaAs(100) за счет поступления на нее атомов галлия из внешнего потока.

В рассматриваемом диапазоне температур (вблизи точки перехода $c(4 \times 4) \rightarrow (2 \times 4)$) коэффициент прилипания галлия к поверхности GaAs(100) равен единице. Поэтому, зная величину потока галлия F_{Ga} , можно определить количество галлия θ_{Ca} (в монослоях), поступившего на поверхность за время, прошедшее с момента включения потока Ga. Для анализа динамики перехода $c(4 \times 4) \rightarrow (2 \times 4)$ в зависимости от θ_{Ca} нами использовалась следующая процедура. На кривых осцилляций интенсивности зеркального рефлекса, полученных в первой серии экспериментов и соответствующих температуре поверхности $T = 470^\circ \text{C}$, был выделен начальный участок перехода от реконструкции $c(4 \times 4)$ к (2×4) (рис. 1, а). Длительность перехода Δt определялась по времени изменения интенсивности от величины, соответствующей структу-

Рис. 3. Зависимость количества галлия на поверхности $\Delta\theta_{Ga}$ (в долях монослоя), индуцирующего структурный переход $c(4 \times 4) \rightarrow (2 \times 4)$, от величины падающего потока галлия (в долях монослоя за секунду).

1 — [16], 2 — [17], 3 — наст. раб.



ре $c(4 \times 4)$, до значения, характерного для (2×4) -реконструированной поверхности (рис. 2). Этой длительности сопоставлялось количество галлия $\Delta\theta_{Ga} = F_{Ga}\Delta t$, индуцирующее изменение реконструкции.

На рис. 3 представлены значения $\Delta\theta_{Ga}$, полученные при разной величине падающего потока галлия, а также данные других работ [16,17]. Видно, что значение $\Delta\theta_{Ga}$ не зависит от F_{Ga} при изменении последнего в широком интервале 0.04–1.0 monolayer/s и составляет $\delta\theta_{Ga} \approx 0.20 \pm 0.04$ monolayer.

Сравнение характера изменения интенсивности дифракции при структурном переходе $c(4 \times 4) \rightarrow (2 \times 4)$, индуцированном поступлением галлия на поверхность (рис. 1, а) и повышением температуры (рис. 1, б), указывает на одинаковый характер изменений свойств поверхности в обоих случаях.

В целом приведенные данные показывают, что переход $c(4 \times 4) \rightarrow (2 \times 4)$ происходит в отсутствие кинетического ограничения скорости превращения и следует за изменением термодинамических параметров системы, таких как состав и температура поверхности.

Процесс обратного перехода $(2 \times 4) \rightarrow c(4 \times 4)$ при выключении внешнего потока галлия (рис. 4) происходит за время ~ 5 s. В том случае, если бы коэффициент прилипания As к поверхности был близок к единице, за это время на поверхности могло бы накопиться ~ 10 monolayer мышьяка. Однако известно, что разница в поверхностном покрытии мышьяка $\Delta\theta_{As}$ между структурами (2×4) и $c(4 \times 4)$ составляет 1.0 monolayer [15]. Следовательно, коэффициент прилипания молекул As_4 оказывается существенно меньшим единицы. Это озна-

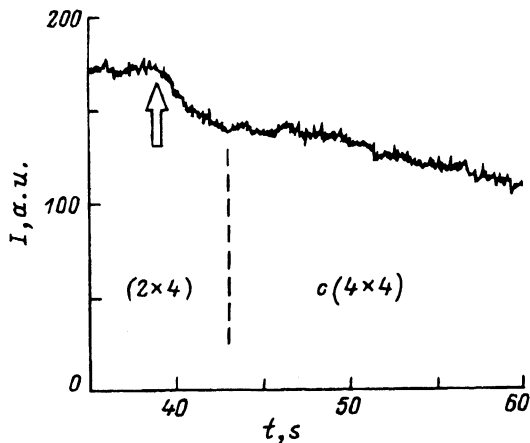


Рис. 4. Поведение интенсивности зеркального рефлекса в процессе структурного перехода $(2 \times 4) \rightarrow c(4 \times 4)$ при включении внешнего потока галлия (момент выключения отмечен стрелкой) при температуре поверхности 470°C .

чает, что скорость обратного перехода $(2 \times 4) \rightarrow c(4 \times 4)$ ограничена кинетикой процесса адсорбции мышьяка на поверхности.

Отметим, что процесс обратного перехода $(2 \times 4) \rightarrow c(4 \times 4)$ имеет две фазы: быструю, заканчивающуюся образованием поверхностной структуры $c(4 \times 4)$ и падением интенсивности дифракции, и медленную, сопровождающуюся дальнейшим уменьшением интенсивности зеркального рефлекса. По-видимому, медленная фаза определяется временем релаксации дальнего порядка поверхностной структуры $c(4 \times 4)$.

4. Влияние начальной реконструкции на шероховатость поверхности в процессе эпитаксиального роста

Как уже отмечалось, величина I_{st} , соответствующая $c(4 \times 4)$ -реконструированной поверхности при наблюдении в азимутальном направлении $[110]$, оказывается заметно меньше аналогичной величины для поверхности (2×4) . Такое поведение I_{st} в работе [16] связывается с дополнительной шероховатостью, индуцированной накоплением избыточного мышьяка. Оказывается, что индуцированная избыточным мышьяком шероховатость поверхности не является исключительным свойством $c(4 \times 4)$ -реконструированной поверхности. Это подтверждается данными, полученными в первой серии экспериментов.

Для двух значений температуры образца 470 и 500°C , лежащих вблизи точки перехода $c(4 \times 4) \rightarrow (2 \times 4)$ ($T = 480^\circ \text{C}$ при $F_{As_4} \simeq 2 \text{ monolayer/s}$), были измерены зависимости I_{din} от скорости роста (величины падающего потока галлия) (рис. 5). В обычной ситуации, когда рост начинается на поверхности с реконструкцией (2×4) , следует ожидать, что I_{din} либо не зависит от F_{Ga} , если затухание определяется неоднородностью потока галлия вдоль растущей поверхности [21], либо уменьшается с ростом F_{Ga} , если затухание связано с локальной десинхронизацией процесса зародышеобразования, возникающей из-за неоднородности диффузионного поля поверхностных атомов [22]. Действительно, в последнем случае увеличение F_{Ga} приводит к уменьшению времени заполнения одного монослоя τ_m и, следовательно, к уменьшению диффузионной длины $L_D \sim (D\tau_m)^{1/2}$ (D — коэффициент по-

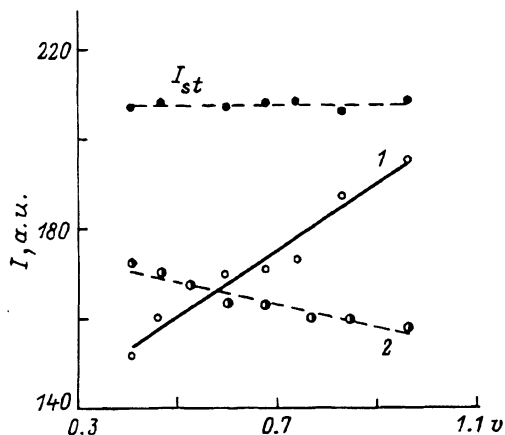


Рис. 5. Зависимости I_{din} от скорости роста v (в долях монослоя за секунду) для двух значений температуры вблизи точки структурного перехода $c(4 \times 4) \rightarrow (2 \times 4)$. Величина I_{st} показана для температуры поверхности 500°C . 1 — $T = 270$, 2 — 500°C .

верхностной диффузии). Следствием этого является усиление неоднородности диффузионного поля поверхностных атомов и сужение зоны влияния, внутри которой возникновение одного двумерного зародыша подавляет образование других. Поскольку в режиме стационарного роста (после затухания осцилляций) появление зародышей перестает быть синхронизованным во времени, уменьшение размеров зоны влияния должно привести к росту локальной шероховатости поверхности и, следовательно, к уменьшению величины I_{din} . Из рис. 5 видно, что именно последний случай реализуется в эксперименте, проведенном при $T = 500^\circ \text{C}$.

При $T = 470^\circ \text{C}$ рост начинается на поверхности, исходно имеющей реконструкцию $c(4 \times 4)$. Однако осцилляции интенсивности дифракции наблюдаются на (2×4) -реконструированной поверхности. Зависимость же I_{din} от F_{Ga} ведет себя качественно противоположно той, которая получена при $T = 500^\circ \text{C}$. Причина этого, на наш взгляд, состоит в следующем. Уменьшение скорости роста приводит при постоянном потоке As_4 к увеличению количества мышьяка, накапливающегося на поверхности за время заполнения одного монослоя. Соответственно в большей степени должна проявиться индуцируемая избыточным мышьяком поверхностная шероховатость. В результате величина I_{din} падает с уменьшением скорости роста.

Интересным является то, что при скоростях роста больше 0.6 monolayer/s степень шероховатости поверхности при росте с начальной реконструкцией $c(4 \times 4)$ оказывается меньше, чем при росте на поверхности, имеющей начальную реконструкцию (2×4) . Этот же эффект прослеживается на рис. 2 (кривая $I_{\text{din}}(T)$).

Возможно следующее объяснение этого эффекта. Известно, что (2×4) -реконструированная поверхность имеет элементарную ячейку, состоящую из трех соседних димеров As , которые вытянуты в направлении $[1\bar{1}0]$, и расположенных рядом двух вакансий As (степень заполнения поверхности мышьяком $\theta_{\text{As}} = 0.75$) [15]. При переходе к $c(4 \times 4)$ -реконструированной поверхности, во-первых, происходит заполнение вакансий As и, во-вторых, образование на полностью заполненном верхнем слое дополнительных трех соседних димеров As , вытянутых в направлении $[110]$ (степень заполнения $\theta_{\text{As}} = 1.75$) [15]. Если предположить, что стадия заполнения вакансий As предшествует стадии формирования дополнительных димеров As , то в этом случае прямой и обратный переходы $(2 \times 4) \rightarrow c(4 \times 4)$ должны осуществляться через промежуточную поверхностную структуру, имеющую реконструкцию (2×1) и степень поверхностного заполнения $\theta_{\text{As}} = 1.0$. Поскольку такая реконструкция соответствует максимально выглаженной поверхности $\text{GaAs}(100)$, интенсивность дифракции электронов на ней должна быть максимальной.

В процессе эпитаксиального роста поступления Ga на изначально $c(4 \times 4)$ -реконструированную поверхность приводит к сбросу избыточного As . Если этот сброс происходит в две стадии, как обсуждалось выше, то возможна ситуация, в которой рост будет происходить на поверхности (2×4) с частично заполненными вакансиями As (т.е. близкой к (2×1) -поверхности). В этом случае следует ожидать повышения интенсивности зеркального рефлекса по сравнению с величиной, наблюдаемой при росте на исходно (2×4) -реконструированной поверхности.

Как видно, данное объяснение основывается на предположении о том, что переход $(2 \times 4) \rightarrow c(4 \times 4)$ происходит через промежуточную (возможно, метастабильную) поверхностную структуру, имеющую реконструкцию (2×1) . Для проверки этого предположения был проведен следующий эксперимент. В статических условиях при охлаждении образца со скоростью 1 K/s от 500 до 470° C ($F_{As_4} \approx 2$ monolayer/s) регистрировалась картина дифракции в азимутальных направлениях $[110]$, $[\bar{1}\bar{1}0]$ и $[100]$. В течение всего времени охлаждения в направлении $[110]$ наблюдались дополнительные 1/2-рефлексы. В направлении $[\bar{1}\bar{1}0]$ вблизи температуры 480° C сначала наблюдалось исчезновение 1/4-рефлексов, а через некоторое время (~ 10 s) — появление дополнительных 1/2-рефлексов. Одновременно в направлении $[100]$ возникали 1/4-рефлексы, свидетельствующие о формировании $c(4 \times 4)$ -реконструированной поверхности. Как видно, приведенные данные согласуются с предположением о существовании промежуточной поверхностной структуры (2×1) , через которую осуществляется структурный переход $(2 \times 4) \rightarrow c(4 \times 4)$.

Список литературы

- [1] Harris J.J., Joyce B.A., Dobson P.J. // Surf. Sc. 1981. V. 103. N 1. P. L90–L96.
- [2] Neave J.H., Joyce B.A., Dobson P.J., Norton N. // Appl. Phys. A. 1983. V. 31. N 1. P. 1–5.
- [3] Van Hove J.M., Coben P.I. // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 47. N 7. P. 726–728.
- [4] Kojima T., Kawai N.J., Nakagawa T., Ohta K., Sakamoto T. // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 47. N 3. P. 286–288.
- [5] Van Hove J.M., Coben P.I. // J. Crystal Growth. 1987. V. 81. N 1–4. P. 13–18.
- [6] Dobson P.J., Joyce B.A., Neave J.H., Zhang J. // J. Crystal Growth. 1987. V. 81. N 1–4. P. 1–8.
- [7] Munekata H., Chang L.L., Woronick S.C., Kao Y.H. // J. Crystal Growth. 1987. V. 81. N 1–4. P. 237–242.
- [8] Van Hove J.M., Lent C.S., Pukite P.R., Coben P.I. // J. Vac. Sci. Technol. B. 1983. V. 1. N 3. P. 741–746.
- [9] Lent C.S., Coben P.I. // Surf. Sci. 1984. V. 139. N 1. P. 121–154.
- [10] Altsinger R., Busch H., Horn M., Henzler M. // Surf. Sci. 1988. V. 200. N 2/3. P. 235–246.
- [11] Horn M., Henzler M. // J. Crystal Growth. 1987. V. 81. N 1–4. P. 428–433.
- [12] Newstead S.M., Kubiak R.A.A., Parker F.H.C. // J. Crystal Growth. 1987. V. 81. N 1–4. P. 49–54.
- [13] Panish M.B. // J. Electrochem. Soc. 1970. V. 117. N 9. P. 1202–1203.
- [14] Däweritz L., Hey R. // Surf. Sci. 1990. V. 236. N 1/2. P. 15–22.
- [15] Biegelsen D.K., Bringans R.D., Northrup J.F., Swartz L.E. // Phys. Rev. B. 1990. V. 41. N 9. P. 5701–5706.
- [16] Briones F., Golmayo D., Gonzalez L., De Miguel J.L. // Jap. J. Appl. Phys. 1985. V. 24. N 6. P. L478–L480.
- [17] Deparis C., Massies J. // J. Crystal Growth. 1991. V. 108. N 1/2. P. 157–172.
- [18] Neave J.H., Joyce B.A., Dobson P.J. // Appl. Phys. A. 1984. V. 34. N 3. P. 179–184.
- [19] Chen P., Madhukar A., Kim J.Y., Lee T.C. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 48. N 10. P. 650–652.
- [20] Fvans K.R., Stutz C.F., Lorange D.K., Jones R.L. // J. Vac. Sci. Technol. B. 1989. V. 7. N 2. P. 259–263.
- [21] Van der Wagt J.P.A., Bacher K.L., Solomon G.S., Harris J.S., Jr. // J. Vac. Sci. Techn. B. 1992. V. 10. N 2. P. 825–828.
- [22] Brioness F., Golmayo D., Gonsalez L., Ruiz A. // J. Cryst. Growth. 1987. V. 81. N 1–4. P. 19–24.