

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО

Научно-исследовательский физико-технологический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Выращивание полупроводниковых гетероструктур с квантовыми точками
InAs/GaAs методом ГФЭ МОС.

Описание лабораторной работы

Составители: ст. н.с. НИЧ ННГУ., к.ф.-м.н. Байдусь Н.В.
вед. н.с. НИФТИ, к.ф.-м.н. Звонков Б.Н.

Нижний Новгород, 2001

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
САМООРГАНИЗОВАННЫЙ РОСТ УПОРЯДОЧЕННЫХ МАССИВОВ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ПО МЕХАНИЗМУ СТРАНКИ — КРАСТАНОВА... 5	
Основы теории спонтанного упорядочения наноструктур	5
Использование поверхностно активных примесей для модификации режима роста гетероструктур.....	9
ТЕХНОЛОГИЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ГЕТЕРОСЛОЕВ С САМООРГАНИЗОВАННЫМИ КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ INAS/GAAS . 10	
Ростовая установка	10
Выращивание гетероструктур	11
Влияние технологических факторов на характеристики выращенных слоев12	
Роль подложки	12
Концентрация арсина и триметилиндия в потоке водорода.....	13
Способы повышения однородности массива КТ.....	14
Температура роста КТ	16
Температура роста покровного слоя GaAs.....	17
Дефекты в гетероструктурах с КТ.....	18
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	18
ЛИТЕРАТУРА.....	19
Контрольные вопросы	19

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время уделяется большое внимание получению и исследованию гетероструктур с самоорганизованными квантовыми точками GaAs/InAs (ГКТ). Интерес к этим объектам обусловлен их уникальными физическими свойствами, связанными с атомоподобным энергетическим спектром КТ и возможностью изготовления на их основе оптоэлектронных приборов, например, высокоэффективных инжекционных гетеролазеров и светоизлучающих диодов для волоконно-оптических систем связи. Как выращивание гетероструктур с КТ, так и изготовление приборов на их основе в настоящее время является новым направлением и практически не выходит за рамки лабораторий. Качественный прорыв в этой области обусловлен использованием эффектов самоорганизации в гетероэпитаксиальных полупроводниковых системах, что позволило получать КТ со свойствами нуль-мерных объектов без применения сложных литографических методов. Для выращивания таких гетероструктур применяют методы молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС).

Для применений в оптоэлектронных приборах массив квантовых точек (КТ) должен быть однороден по форме и размерам, не должен содержать дислокаций и точечных дефектов, а все гетерограницы, формирующие КТ, должны обладать низкой скоростью поверхностной рекомбинации. В связи с этим, к эпитаксиальной технологии предъявляются высокие требования с точки зрения контролируемого управления параметрами гетероструктур.

В настоящей лабораторной работе описаны основы технологии роста гетероструктур с КТ методом ГФЭ МОС. Этот метод применяется реже в сравнении с методом МЛЭ, что, в основном, связано с трудностями контроля процессов роста и самоорганизации слоя квантовых точек (КТ), токсичностью исходных реагентов и химически активной атмосферой. Однако, технология ГФЭ МОС более проста в аппаратном исполнении и экономична.

Цель работы:

Освоение основных принципов и экспериментальных навыков эпитаксиального выращивания полупроводниковых гетероструктур с квантовыми точками на основе арсенида галлия.

Самоорганизованный рост упорядоченных массивов квантовых точек по механизму Странски — Крастанова

Конечная цель — это изготовление идеальной полупроводниковой квантовой точки, которая, подобно атому, имела бы энергетический спектр, описываемый δ -функцией. Для наиболее полной реализации нуль-мерных объектов необходимо создать плотный и однородный массив точек, иначе неоднородное уширение энергетических уровней может свести на нет достоинства пониженной размерности. Такие наноструктуры должны иметь размеры порядка длины волны де-Бройля (в диапазоне нескольких нанометров) для проявления квантовых эффектов и чтобы обеспечить энергетические зазоры между подуровнями электронов и дырок порядка нескольких кТ при комнатной температуре. Кроме того, они должны быть свободными от дислокаций и дефектов для предотвращения безызлучательной рекомбинации.

Существуют непрямые технологические методы, к которым относится изготовление КТ путем поперечного вытравливания из структур с квантовыми ямами путем применения сложных литографических методов. Эти методы довольно сложны и дорогостоящие в применении, часто страдают недостаточным разрешением и могут вызывать повреждение гетерограницы в процессе травления.

Сейчас наиболее многообещающим методом формирования упорядоченных массивов КТ является метод, использующий явление самоорганизованного роста на кристаллических поверхностях.

Основы теории спонтанного упорядочения наноструктур

Теоретические модели эпитаксии предполагают, что модель роста определяется свободной энергией поверхности подложки α_s , свободной энергией поверхности раздела α_i и свободной поверхностной энергией гетероэпитаксиального слоя α_f ,

$$\alpha_s > \alpha_f + \alpha_i \quad (4)$$

Это неравенство определяет условие смачивания подложки эпитаксиальной пленкой. В этом случае, рост проходит по механизму Франка-ван дер Мерве (двумерный рост). Если неравенство имеет противоположный знак, смачивание подложки отсутствует и рост идет по островковому механизму Фольмера-Вебера.

Рост по механизму **Странски-Крастанова** представляет собой промежуточный случай и характерен для одинаковых по структуре, но решеточно-рассогласованных материалов. Он происходит при наличии смачивания подложки, т.е. для первого (или

нескольких) монослоев справедливо условие хорошей адгезии и реализуется двумерный рост. Но, так как напряжение в слое неблагоприятно для двумерного роста, а адгезия трехмерных островков слабее, происходит спонтанный переход к трехмерному островковому росту. Поэтому слой квантовых точек обычно располагается на так называемом смачивающем (т.е. двумерном) слое. В отношении электронных свойств смачивающий слой представляет собой квантовую яму, а трехмерные островки – квантовые точки.

Движущей силой образования трехмерных островков является объемная упругая релаксация, т. е. уменьшение упругой энергии при формировании островков по сравнению с упругой энергией однородно напряженной эпитаксиальной пленки. Этот процесс энергетически выгоден, даже, несмотря на то, что происходит увеличение площади поверхности, а островки остаются упруго-напряженными. Согласно существующей теории, основы которой изложены в обзоре [3], энергетически выгодной формой островков является пирамида.

Чтобы рассмотреть, выгоден процесс энергетически или нет, необходимо вычислить изменение энергии системы при этом процессе. В данном случае начальное состояние - плоский двумерный слой, конечное - островок в виде пирамиды. Необходимо учесть как изменение объемной ΔE_V упругой энергии, так и изменение поверхностной энергии ΔE_S . Кроме того, трехмерная пирамида имеет еще один источник упругих деформаций: скачок тензора поверхностного натяжения на ребрах, который имеет два слагаемых.

Таким образом, изменение полной энергии системы, вызванное образованием одного трехмерного когерентно напряженного островка в виде пирамиды с линейным размером L равно:

$$\Delta E_{isl} = \Delta E_V + \Delta E_S + E_{edg} + \Delta E_{el}^{edg} \quad (1)$$

Каждое слагаемое по определенному закону зависит от размера островка.

$\Delta E_V \propto -L^3$ - энергия объемной упругой релаксации (кубический закон) кубическому закону; $\Delta E_S \propto \pm L$ - изменение поверхностной свободной энергии за счет возникновения наклонных граней островка, исчезновения плоской поверхности и появления границы раздела трехмерного островка и подложки (линейный закон);

$E_{edg} \propto L$ — короткодействующий вклад ребер в энергию (линейный закон);
 $\Delta E_{el}^{edges} \propto -L \ln L$ - вклад ребер островков в энергию упругой релаксации (логарифмический закон).

Это рассмотрение позволяет получить зависимость энергии массива островков от их размера и определить наиболее вероятный с точки зрения термодинамики процесса размер. Для массива островков энергия на единицу площади пропорциональна плотности N островков $\Delta E = N * \Delta E_{isl}$. Равновесные условия означают, что островки могут обмениваться атомами путем поверхностной миграции, в то время как полное количество материала во всех островках фиксировано, т.е. $NL^3 = const$. Тогда энергия массива островков на единицу площади пропорциональна их суммарному объему $E \sim \Delta E_{isl} L^3$, а ее зависимость от размера островка следует из (1), если все выражение поделить на объем:

$$E = -const + \frac{C_0}{L} + \frac{C_1}{L^2} - \frac{C_2}{L^2} \ln\left(\frac{L}{a}\right) \quad (2)$$

Для упрощения выражения и наглядности зависимости энергии от размера островков введены константы C_0 , C_1 и C_2 .

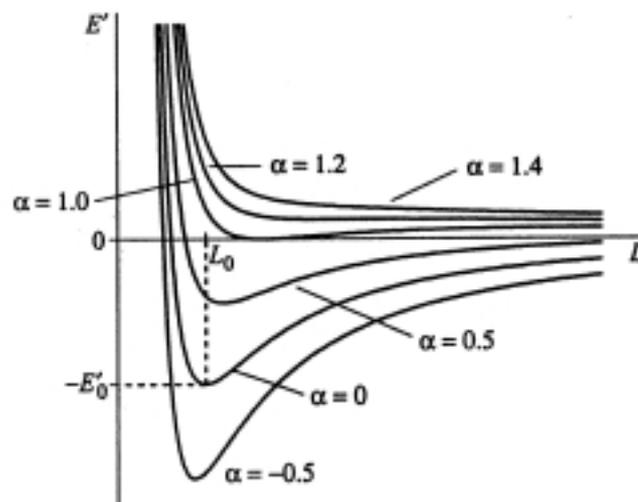


Рис. 2. Энергия разреженного массива трехмерных когерентно напряженных островков на единицу площади поверхности в зависимости от размера островка. Видно, что при определенных условиях существует оптимальный размер островков L_0 , когда наблюдается ярко выраженный минимум энергии системы.

Графики зависимости энергии массива от размера островков $E(L)$ приведены на рис. 2. В общем случае можно получить много таких зависимостей, варьируя характеристики системы, например, поверхностные энергии конкретных материалов и рассогласование решеток. Поэтому был введен параметр $\alpha = \exp(1/2)C_0L_0/C_2$, представляющий собой *отношение изменения поверхностной энергии при образовании островка и вклада ребер островка в энергию упругой релаксации*.

Проанализируем полученные зависимости. При $L \rightarrow 0$ и $E \rightarrow \infty$. Ясно что такое состояние термодинамически очень невыгодно и стремление минимизировать энергию должно привести к росту островков. В этом состоит основное отличие от случая стандартного зародышеобразования, когда существует некоторый критический размер зародыша, с которого начинается рост. В данном случае критический размер равен нулю.

Если $\alpha > 1$, минимум энергии достигается асимптотически при $L \rightarrow \infty$. Это означает, что система стремится уменьшить полную площадь поверхности, и весь осажденный материал собирается в один макроскопический кластер, т. е. имеет место *коалесценция*.

Если $\alpha \leq 1$, то абсолютный минимум энергии E достигается при некотором конечном размере островка

$$L_0 = a \exp(C_1 / C_2 + 1/2),$$

что соответствует образованию островков одного размера. Особый интерес представляет случай $\alpha < 0$, когда образование островка сопровождается не только уменьшением упругой энергии, но и уменьшением поверхностной энергии системы. При этом минимум энергии $E(L)$, полученный для разреженного массива островков, сохраняется и для плотного массива островков, когда учитывается упругое взаимодействие между островками.

Движущая сила упорядочения островков в плоскости — это упругое взаимодействие между островками. Теоретические исследования предсказывают, что среди различных массивов на поверхности (001) анизотропного кубического кристалла упругая энергия имеет минимум для периодической квадратной решетки с векторами примитивной решетки, направленными вдоль направлений наилегчайшего сжатия [100] и [010]. Теория согласуется с экспериментальными данными по наблюдению спонтанного образования массива островков InAs на поверхности GaAs (001), где

островки имеют одинаковую (пирамидальную) форму и узкое распределение по размерам, а у каждого островка есть характерные для квадратной решетки четыре ближайших соседа, что свидетельствует о наличии ближнего порядка в системе.

Использование поверхностно активных примесей для модификации режима роста гетероструктур.

Наличие или отсутствие режима самоорганизованного роста определяется выбором пары материалов гетероэпитаксиальной системы и созданием определенного технологического режима роста. На практике необходимо иметь как можно больше возможностей варьировать эти режимы. Одной из таких возможностей является применение определенных примесей на поверхности роста, которые могут изменить условия формирования слоя.

Из термодинамических соображений следует, что качественный эпитаксиальный слой можно вырастить в том случае, если поверхностная энергия материала эпитаксиального слоя меньше поверхностной энергии материала подложки (механизм Франка-ван-дер-Мерве).

Если вырастить слой, который имеет более высокую свободную поверхностную энергию чем у подложки, то эпислой будет собираться в острова более вероятно, чем полностью смачивать поверхность (механизм Фольмера-Вебера).

При росте встроенного слоя трехслойной гетероструктуры мы наталкиваемся на термодинамическое противоречие: сначала формируется гетерослой, затем он закрывается покровным слоем из материала подложки. Один из этих двух слоев будет иметь более низкую свободную поверхностную энергию. Таким образом, при росте встроенного слоя, рост либо гетерослоя, либо покровного слоя будет идти по механизму Фольмера-Вебера. Поэтому, если материал А хорошо смачивает материал В, В не будет смачивать А. Любая попытка вырастить гетероструктуру А/В/А должна преодолеть это препятствие.

Было предложено решить это противоречие путем использования поверхностно-активной примеси, так называемого **сурфактанта (surfactant)**, для уравнивания свободной поверхностной энергии материалов А и В и подавления формирования островков. Идея заключается в контроле процесса роста за счет изменения поверхностной энергии, что должно обеспечить в определенных условиях получение качественных гетероструктур, несмотря на термодинамические противоречия.

Поверхностно-активная примесь должна обладать, достаточной подвижностью на поверхности растущего слоя, должна создавать отдельную поверхность и не взаимодействовать химически с растущим слоем.

Большинство примесей вводимых в процессе роста InAs на GaAs понижают энергию растущего слоя и задерживают или совсем подавляют переход от двумерного к трехмерному росту. Однако существуют примеси, проявляющие противоположное действие. Ниже будет описано применение висмута в качестве примеси улучшающей параметры самоорганизованного роста слоя КТ InAs/GaAs.

Технология выращивания гетерослоев с самоорганизованными квантовыми точками InAs/GaAs

Ростовая установка

Ростовая установка представляет собой систему для МОС-гидридной эпитаксии с горизонтальным кварцевым реактором круглого сечения диаметром 60 мм. Подложка помещается на графитовый подложкодержатель, плоскость подложки располагается под углом 45° к оси реактора. Подложкодержатель нагревается инфракрасным излучением спирального нагревателя через кварцевые стенки.

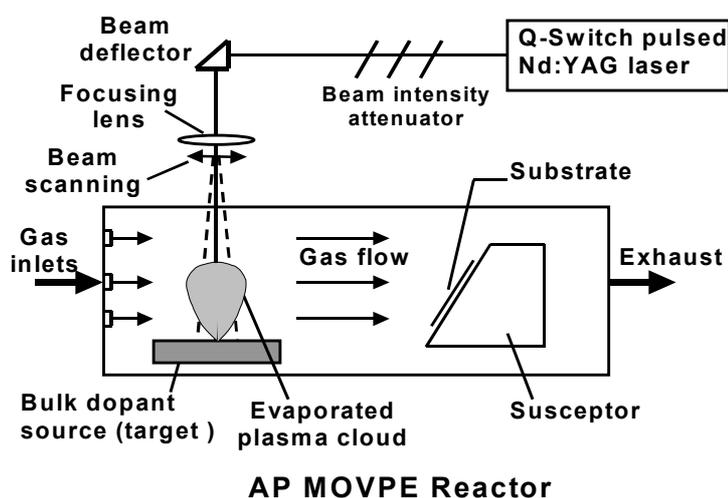


Рис.2. Схема легирования методом лазерного распыления.

Выращивание гетероструктур

В качестве газа-носителя используется водород, очищенный пропусканием через палладиевую мембрану. В качестве веществ-носителей Ga, In и As используются соответственно триметилгаллий (ТМГ) $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$, триметилиндий (ТМИ) $\text{In}(\text{CH}_3)_3$ и арсин AsH_3 .

В качестве *подложек* обычно используется полуизолирующий GaAs с кристаллографической ориентацией (001), разориентированный на 3° по направлению [110].

Образцы имеют структуру, показанную на рис. 3. На подложку GaAs наносится *буферный слой* толщиной $d_b \approx 0.34$ мкм. Как показывает опыт, такая толщина является оптимальной для подготовки поверхности роста к выращиванию квантоворазмерных слоев. При меньших толщинах не успевают залечиться дефекты на поверхности подложки, оставшиеся после шлифования и полирующего травления, при больших начинают развиваться фигуры роста типа овальных дефектов.

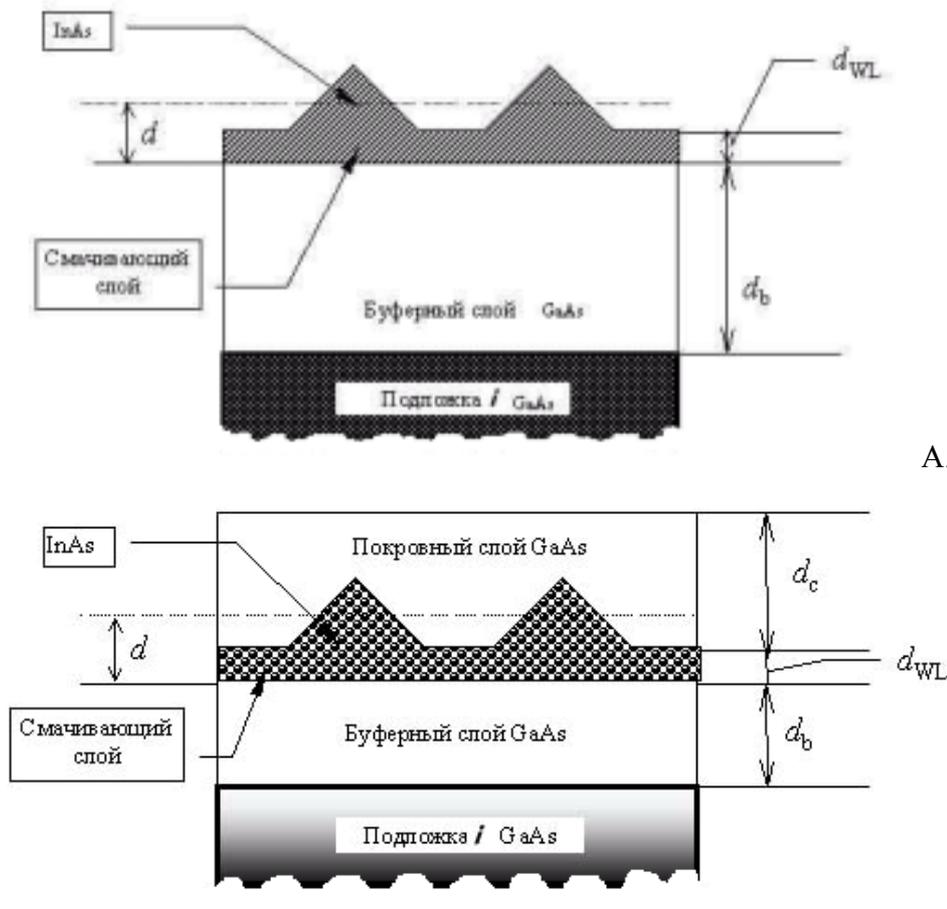


Рис. 3. Схема гетероструктур InAs/GaAs. d -номинальная толщина InAs, d_{WL} -толщина смазывающего слоя InAs, d_b -толщина буферного слоя GaAs, d_c — толщина покровного слоя. А.-без покровного слоя. Б.-с покровным слоем толщины d_c .

На буферный слой осаждается InAs номинальной толщиной d (эта величина характеризует количество осажженного InAs, она равна толщине слоя InAs, если бы он распределялся равномерно по поверхности подложки) при температуре 530°C .

Для выращивания слоя квантовых точек применяется, так называемое, *субмонослойное осаждение* InAs, которое заключается в том, что индия и мышьяка подаются циклически примерно по 6 и 2 секунды соответственно, с паузами несколько секунд между циклами. Паузы необходимы для создания условий оптимальных для поверхностной миграции атомов индия и формирования трехмерных островков. Прерывание роста после или в процессе осаждения InAs для формирования термодинамически равновесных КТ применяется и в методе МЛЭ.

Образцы выращиваются в режиме с вращением подложки, так что распределение InAs по поверхности было однородным. Номинальная толщина InAs $d=5\text{ ML}(1,7\text{ нм})$.

Для исследований обычно выращивают два типа образцов:

1. Гетероструктуры для исследования фотолюминесцентных и фотоэлектрических свойств КТ (рис 3 А). После выращивания буферного слоя при 600°C температура понижается до температуры роста квантовых точек InAs. Затем методом субмонослойной эпитаксии наносят InAs номинальной толщины 5 ML. Затем рост останавливается и при включенном потоке арсина температура опять повышается до 600°C , при которой производится рост покровного слоя GaAs.

2. Гетероструктуры для исследования морфологии КТ на атомно-силовом микроскопе (гетероструктуры с поверхностными КТ) (рис 3 Б). КТ InAs растят в тех же условиях, что и образцы первого типа, но после осаждения InAs образцы медленно охлаждаются в потоке арсина. Образцы этого типа можно также получить путем травли покровного слоя в избирательном травителе, который травит только GaAs. По морфологии поверхности такие образцы несколько различаются.

Влияние технологических факторов на характеристики выращенных слоев

Роль подложки

Подложка и подготовка ее поверхности перед загрузкой в реактор определяет обычно качество выращиваемых эпитаксиальных слоев. На параметры массива КТ определяющую роль оказывает кристаллографическая ориентация подложки (а, точнее, буферного слоя, на котором они растут).

Гетероструктуры с КТ InAs обычно выращивают на подложках GaAs(100) с отклонением от точной ориентации на $3-6^\circ$ в направлении [110]. Это связано с тем, что вицинальные (разориентированные относительно плоскости с низкими индексами) поверхности имеют высокую плотность макроступеней (т.е. объединенных атомных ступеней). Макроступени уменьшают поверхностную диффузию и способствуют получению более плотного массива КТ. КТ обычно располагаются на крутом склоне макроступеней. Симметрия КТ обычно повторяет симметрию плоскости роста. Согласно литературным данным, применение поверхности с другой кристаллографической ориентацией обычно приводит к росту островков большего размера и существенно меньшей плотности.

Концентрация арсина и триметилиндия в потоке водорода.

Как известно, концентрация источников элементов V(As) и III (In, Ga) групп в потоке газа-носителя определяет условия роста и качество выращенных слоев GaAs или InAs. Для получения качественного эпитаксиального слоя концентрация источника элемента пятой группы в 10-100 раз должна превышать концентрацию элемента третьей группы. Это связано с тем, что скорость роста GaAs полностью определяется поступлением атомов галлия на растущую поверхность (его коэффициент прилипания близок к единице). Мышьяк имеет высокое равновесное давление, легко испаряется с поверхности и для сохранения стехиометрического состава поверхности приходится поддерживать высокое давление его паров. Недостаток As может привести к увеличению плотности вакансий V_{As} и антиструктурных дефектов Ga_{As} .

Эти закономерности справедливы и при выращивании КТ, но имеют и свои особенности. Дело в том, что атомы мышьяка являются поверхностно активной примесью, изменяющей поверхностную энергию и влияющими на условия самоорганизации КТ.

Как в методе МОСГЭ, так и в МЛЭ существует оптимальное отношение компонент V/III в отношении дисперсии по размерам и фотолюминесцентных свойств. Увеличение относительной концентрации мышьяка в потоке приводит к уменьшению размера КТ и коротковолновому сдвигу максимума ФЛ, росту количества и размеров дислоцированных кластеров. При концентрации ниже оптимальной вместо когерентных островков образуются двумерные кластеры.

Концентрация индия также влияет на размер КТ, ее увеличение приводит к росту размера КТ. Однако увеличение осаждаемого материала InAs одновременно приводит к увеличению концентрации дислоцированных кластеров.

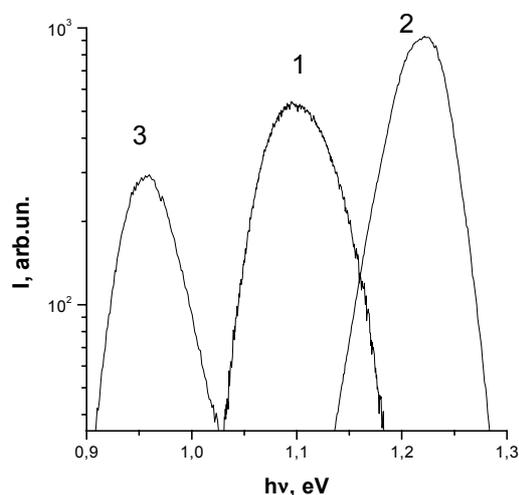


Рис. 4. Спектры фотолуминесценции гетероструктур с квантовыми точками InAs/GaAs. Максимум ФЛ соответствует энергии основного электронно-дырочного перехода в КТ. Образцы выращены при разных соотношениях мышьяка и индия в потоке водорода (отношении V/III).

Способы повышения однородности массива КТ

Было установлено, что можно существенно подавить процесс коалесценции и повысить однородность островков по размерам, если в процессе осаждения слоя КТ InAs его легировать изовалентной As примесью Bi. Висмут не является электрически активной примесью, т.е. не увеличивает концентрацию носителей заряда, но существенно изменяет условия формирования КТ. Механизм этого влияния не до конца понятен, но ясно, что он является поверхностно активной примесью. При этом роль Bi, по-видимому, состоит как в ограничении миграционной подвижности атомов In и As при самоорганизации слоя КТ, так и во влиянии на поверхностную энергию.

Легирование висмутом слоя КТ InAs в процессе его образования и самоорганизации способствует росту более однородных по размерам островков - КТ, что особенно ярко проявляется при не слишком высокой концентрации In в слое. На

рис. 5 приведены АСМ изображения поверхностных слоев КТ, выращенных при 530⁰С при легировании Вi (а) и без легирования (б) .

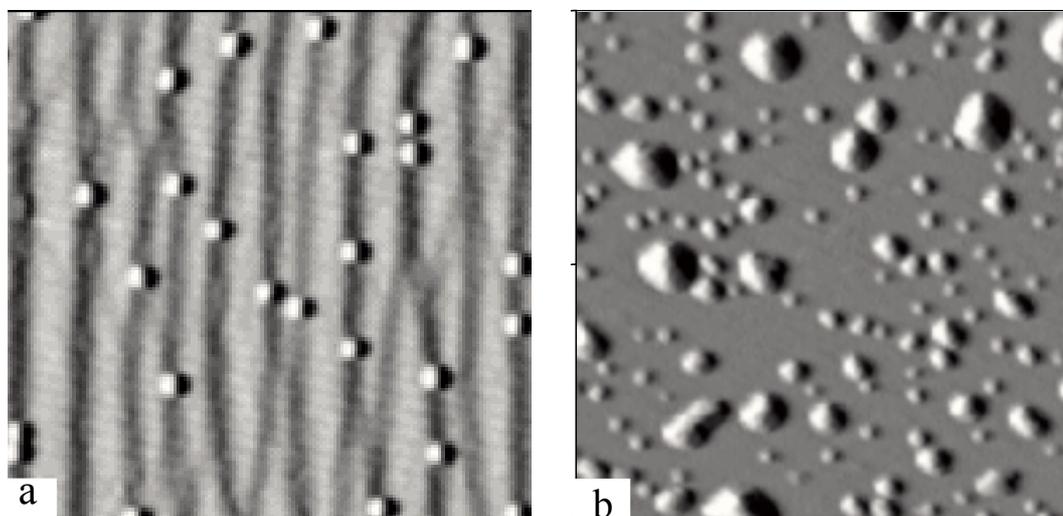


Рис.5. Топография поверхности гетероструктур с поверхностными КТ, легированными висмутом (а) и без легирования (б).

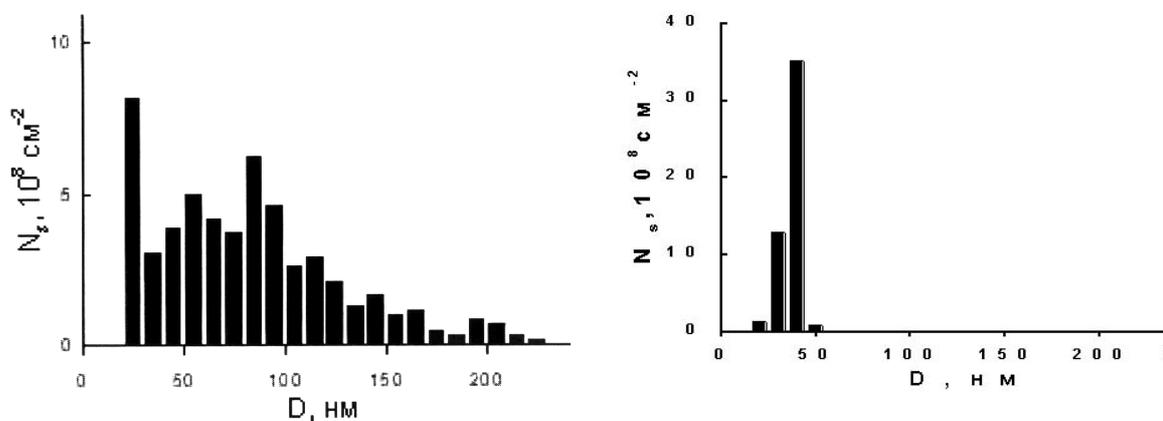


Рис.6. Диаграмма плотности распределения островков на поверхности ГКТ без покровного слоя (а – без применения легирования Вi, б- с применением легирования Вi).

Как видно из диаграмм распределения островков по размерам, в первом случае (рис. 6 а) наблюдается большой разброс латерального размера и высоты островков, причем имеется значительное количество крупных явно релаксированных и неквантованных кластеров, размер которых достигает 200 нм, а высота - 50 нм. Во втором случае (рис. 6 б) крупные кластеры практически полностью отсутствуют (а

точнее, их плотность на порядок меньше, поэтому ни один не попадает в кадр) и проявляется высокая однородность псевдоморфных островков (которые являются квантовыми точками) как по латеральному размеру (≈ 40 нм), так и по высоте (≈ 6 нм).

Температура роста КТ

Одним из критических параметров при росте ГКТ является температура роста, поэтому для получения качественных структур необходимо подобрать оптимальную в отношении оптических свойств температуру роста.

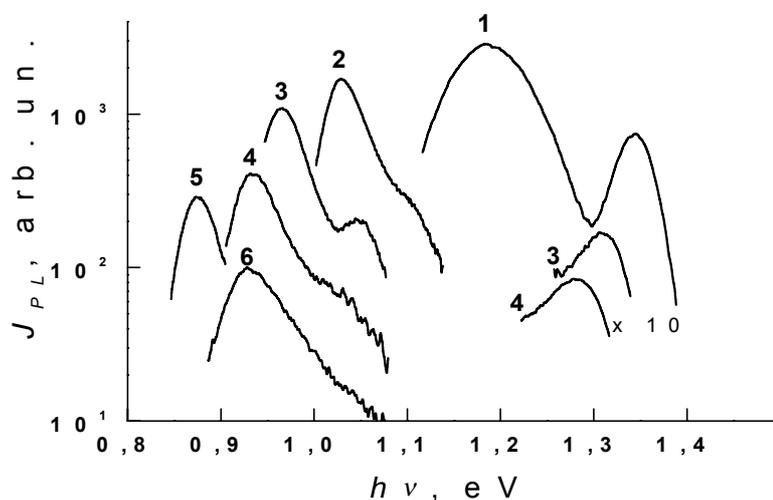


Рис. 6. Спектры ФЛ (77 К) при разных температурах осаждения слоя КТ. T_d , °C: 1 – 550, 2 – 530, 3 – 510, 4 - 490, 5 – 490 (измерения ФЛ при комнатной температуре), 6 – 470.

Рис.7 показывает влияние температуры роста легированного Bi слоя КТ T_d , на спектры фотолюминесценции гетероструктур с КТ (измерено при 77 К). При $T_d = 550$ °C пик ФЛ от КТ с максимумом $h\nu_m = 1.185$ эВ очень широк и сильно смещен в сторону высоких энергий. При более низких температурах осаждения наблюдаются более узкие пики ФЛ, которые с понижением T_d смещаются в сторону меньших энергий, но при этом снижается интенсивность свечения. Оптимальная температура, при которой наблюдается минимальная ширина пика ФЛ на полувысоте спектра 35-40 мэВ при достаточно высокой интенсивности ФЛ, находится в интервале 510 – 530 °C. В

структурах, выращенных при этих температурах, хорошо разрешается не только основной оптический переход, но и переход на первый уровень возбуждения в КТ (кривая 3). Он отстоит от основного перехода на ≈ 85 мэВ, что обеспечивает сохранение свойств КТ при комнатной температуре. В нелегированных висмутом гетероструктурах минимальное значение ширины спектра было около 55 мэВ.

Как видно из рис. 6, методом МОСГЭ можно получать ГКТ с положением пика ФЛ $h\nu_m$ до 0.93 эВ при 77 К (кривые 4, 6), т.е. в практически важном для оптоэлектроники диапазоне длин волн в районе 1.3 мкм. Почти на всех структурах кроме главного пика ФЛ, связанного с КТ, наблюдается более слабый коротковолновый пик в области 1.35 – 1.28 эВ при 77 К. Он, как и главный пик, смещается в область низких энергий при уменьшении T_d , при этом интенсивность его уменьшается. По-видимому, излучает в этой массив мелких островков, представляющих собой неоднородности смачивающего слоя.

Температура роста покровного слоя GaAs.

При выборе оптимальных условий роста покровного слоя GaAs необходимо учитывать несколько, часто взаимоисключающих, факторов. Требование высокого структурного совершенства эпитаксиального слоя приводит к выбору температуры роста выше 600°C. Однако при таких температурах коэффициент объемной диффузии становится заметным. В результате этого за время роста покровного слоя GaAs происходит перемешивание материала КТ InAs и матрицы GaAs, т.е. атомов In и Ga. Состав материала КТ меняется от InAs до твердого раствора $In_xGa_{1-x}As$, у которого ширина запрещенной зоны больше и возрастает с увеличением содержания атомов галлия в квантовых точках. Такое изменение электронной структуры не всегда желательно. Поэтому для уменьшения диффузионных процессов между КТ и матрицей желательно выращивать покровный слой при той же температуре, при которой растяся КТ, т.е. 520-550°C. Выбор зависит от требуемого энергетического спектра. Если же необходимо избежать изменения энергетического спектра КТ в процессе наращивания покровного слоя, применяют комбинированный способ роста: сначала выращивают тонкий покровный слой при низкой температуре, затем температуру повышают и выращивают высокотемпературный покровный слой GaAs. Таким образом, удается сохранить требуемую электронную структуру КТ и высокое структурное совершенство покровного слоя.

Дефекты в гетероструктурах с КТ

Одним из основных дефектов в гетероструктурах с КТ являются дислоцированные кластеры (ДК). Они представляют собой островки InAs, размер которых по тем или иным причинам стал слишком большим, значительно больше длины волны де Бройля. В результате энергия упруго-напряженного островка может превысить энергию образования дислокации несоответствия. Появление линейного дефекта снимает упругие напряжения и сопровождается появлением канала безызлучательной рекомбинации.

На структурах не легированных Вi плотность дислоцированных кластеров на порядок выше. Поэтому крупные ДК можно условно разделить на две категории. Первая категория связана со значительной дисперсией наностроек по размерам, в результате чего часть островков превышает критический для образования дислокаций несоответствия размер. Их плотность составляет порядка 10^8 см^{-2} . Кластеры этого вида практически удастся устранить путем применения легирования висмутом в процессе роста КТ (см. выше). Однако и при легировании Вi на поверхности ГКТ наблюдаются ДК с меньшей плотностью (порядка 10^7 см^{-2}). Механизм образования данных кластеров другой и, вероятно, связан с локальными флуктуациями поверхностной энергии на поверхности роста вследствие наличия в приповерхностной области примесей и дефектов.

Наличие крупных дислоцированных кластеров (ДК) в слое КТ ухудшает структуру покровного слоя. Во-первых, возрастает плотность дислокаций, и, во-вторых, возможно появление разрывов покровного слоя над ними. При достаточно большой толщине покровного слоя разрывы исчезают, но наличие линейных дефектов легко выявляется селективным травлением.

Порядок выполнения работы

1. Изучить устройство и принцип действия технологической установки и ее комплектующих частей: палладиевый очиститель водорода, регулятор расхода газов, барбатор для МОС, реактор, устройства регулировки температуры.
2. Рассчитать необходимую для роста пленки GaAs или квантоворазмерной структуры концентрацию компонент-источников в потоке водорода и соответствующие значения потоков газов через регуляторы расхода газов.

3. Составить программу управления технологическим процессом роста для компьютера.
4. Подготовить подложку GaAs и загрузить ее в реактор.
5. Вырастить требуемую структуру, определить толщину выращенного эпитаксиального слоя и исследовать ее свойства.

Литература

Основная:

1. Л.Ченг, К.Плог. Молекулярно-лучевая эпитаксия. М.: Мир, 1989.
2. C.Weisbuch, B.Vinter. Quantum semiconductor structures. Fundamentals and applications. Academic Press, 1991.
3. Н.Н.Леденцов, В.М.Устинов, В.А.Щукин, П.С.Копьев, Ж.И.Алферов, Д.Бимберг. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры //ФТП, т.32, №4, с.385 (1998).
4. М.Херман. Полупроводниковые сверхрешетки. М.: Мир, 1979.
5. В.А.Кульбачинский. Двумерные, одномерные, нульмерные структуры и сверхрешетки. М.: Изд. МГУ, 1998.
6. И.А.Карпович, Д.О.Филатов. Фотоэлектрическая диагностика квантово-размерных структур. Учебное пособие. Нижний Новгород, 1999.

Дополнительная:

1. Х.Кейси, М.Паниш. Лазеры на гетероструктурах, т.1 и 2, М., Сов. радио, 1981.
2. Ж.И. Алферов. История и будущее полупроводниковых гетероструктур //ФТП, т.32, №1, с.3 (1998).

Контрольные вопросы

1. Основные механизмы эпитаксии.
2. Источники химических элементов для выращивания GaAs и InAs .
3. Влияние примесей на эпитаксию и процессы самоорганизации квантовых точек.
4. Принцип выбора материалов КТ и матрицы, в которой они выращиваются.
5. Самоорганизованный рост квантовых точек (механизм Странски-Крастанова).
6. Связь параметров массива КТ и технологических условий роста.
7. Дефекты в гетероструктурах с квантовыми точками.