

ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ НАНОТЕХНОЛОГИИ

Садыков Э., Ташполотов Ы.

Ошский государственный университет

В настоящее время создания полупроводниковых структур на основе нанотехнологии является актуальной задачей. Последние достижения физики квантоворазмерных систем открыли возможности для конструирования наноструктур, находящих применение в микро-, опто- и наноэлектронике, средствах связи, информационных технологиях, измерительной технике и многих других практических приложениях.

Характерные линейные размеры функциональных элементов современной микроэлектроники обычно составляют единицы или десятки микрометров. Исследования и практического использования структур с размерами менее 100 нм показали, что поведение таких наноструктур качественно отличается от поведения тел с большими размерами. Снижение линейных размеров элементов схем до нескольких единиц или десятков нанометров приводит к тому, что технология соответствующих полупроводниковых структур фактически становится искусством.

В настоящее время имеется достаточно развитая технология, основанная на эпитаксиальном росте полупроводниковых соединений на монокристаллических подложках и позволяющая получать многочисленные полупроводниковые наногетерокомпозиции, так называемые наногетероструктуры (НГС) [1-4]. Эпитаксиальный рост на ориентированной атомно-гладкой поверхности монокристалла предполагает послойное наращивание полупроводникового соединения, как совпадающего с материалом

подложки, так и, что наиболее важно, существенно отличающегося своими свойствами.

Имеется чрезвычайно много вариантов (гетеропар), с помощью которых можно создать НГС[3,4]. Однако, чтобы такая НГС нашла применение в микроэлектронике, она должна удовлетворять нескольким весьма жестким требованиям, из которых, пожалуй, главным является требование высокой степени совершенства наногетерограницы (поверхности раздела между двумя однородными составляющими НГС)[5]. При выполнении этого условия плоские (планарные) НГС, полученные чередованием слоев нанометровой толщины из полупроводниковых соединений разного химического состава, могут рассматриваться как новые, не существующие в природе полупроводники с весьма необычными свойствами. Планарные НГС являются основой для создания еще более экзотических объектов, имеющих нанометровые размеры не в одном, а в двух или даже трех измерениях. Когда характерные размеры системы оказываются сравнимыми с масштабом когерентности электронной волновой функции, проявляется квантовый размерный эффект: свойства системы становятся зависимыми от ее формы и размеров. Способность современной полупроводниковой технологии производить структуры, в которых реализуется квантовый размерный эффект, делает реальным исследование поведения подобных систем пониженной размерности (с почти двумерным, одномерным и даже нульмерным характером электронных состояний) и открывает широкие перспективы их использования в электронике и оптоэлектронике.

Создание, исследование и применение структур с линейными размерами меньше чем ~ 100 нм теперь рассматриваются как особое направление в физике, технологии и электронной технике – наноэлектроника[1].

Способ жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) с использованием явление тепловой эффузии предназначен для выращивания эпитаксиальных наногетероструктур полупроводниковых соединений и твердых растворов на их основе. Таким образом, ЖФЭ с использованием тепловой эффузии представляет собой усовершенствование обычного способа жидкофазной эпитаксии. Новый этап в развитии и совершенствовании ЖФЭ начался в 70-е годы и связан с созданием и промышленным производством соответствующего оборудования.

Атомные или молекулярные потоки создаются в эффузионных (эффузия - медленное истечение газов через малые отверстия, исследованное в 1911 году датским физиком М. Кнудсенем) ячейках при достаточно высокой температуре и направляются к нагретой до необходимой температуры монокристаллической подложке[4]. ЖФЭ с использованием тепловой эффузии обеспечивает эпитаксиальный рост тонких пленок полупроводниковых соединений за счет реакций между компонентами атомных или молекулярных пучков с поверхностью подложки. Скорость осаждения вещества на подложку по порядку величины обычно составляет один моноатомный слой в секунду. Получение качественных структур возможно при использовании высокочистых источников испаряемых компонентов и при условии точного контроля температур подложки и источников, что может быть реализовано лишь при компьютерном управлении параметрами процесса роста.

Принципиальные элементы нашей установки для выращивания полупроводниковых наногетероструктур способом ЖФЭ с использованием тепловой эффузии, размещаемые в двухзонном реакторе, определяет ее основные особенности:

- зона генерации молекулярных (атомарных) потоков эффузионными ячейками Кнудсена;
- зона кристаллизации на подложке (зона роста).

Зону роста можно условно разделить на три части, первая из которых представляет собой кристаллическую подложку или очередной выросший моноатомный слой, вторая - парогазовую смесь компонентов НГС в приповерхностной области, а третья является переходным слоем, геометрия которого и протекающие в нем процессы сильно зависят от выбора условий роста. Следовательно, если необходимо вырастить НГС способом ЖФЭ с использованием тепловой эффузии, нужно иметь возможность надлежащим образом регулировать структуру и состав переходного слоя.

Для выращивания кристаллографически совершенных структур следует так подбирать режим роста, чтобы переходной слой был максимально тонким, то есть моноатомным. Это условие может быть выполнено, если поток атомов, падающих на подложку, близок к потоку атомов, испаряющихся с подложки. Поэтому практическая реализация эффекта тепловой эффузии вполне возможна, если изготовить отверстия, щели и зазоры с характеристическим размером 100...50 нм. В этом режиме рост структуры осуществляется путем образования и дальнейшего роста двумерных зародышей на атомарно-плоской поверхности[6-8].

Эпитаксиальный рост по способу ЖФЭ с использованием тепловой эффузии включает в себя следующие процессы:

- 1) адсорбция (прилипание) падающих на подложку атомов или молекул, составляющих выращиваемое соединение;
- 2) миграция (поверхностная диффузия) адсорбированных атомов по поверхности подложки (может предваряться диссоциацией молекул выращиваемого соединения);
- 3) встраивание атомов, составляющих НГС, в кристаллическую решетку подложки или растущий моноатомный слой;

- 4) образование и дальнейший рост двумерных зародышей кристалла на подложке или на поверхности растущего слоя;
- 5) взаимная диффузия атомов, встроившихся в кристаллическую решетку.
- б) происходит своеобразная самоорганизация растущей структуры.

Наиболее распространенной кристаллической решеткой для соединений $A^{II}B^{VII}$ является так называемая структура цинковой обманки ZnS. Если поверхность подложки параллельна одной из граней элементарного куба с индексами Миллера (001), то эпитаксиальный рост осуществляется последовательным наращиванием анионных и катионных слоев. Поскольку химические связи в разных полупроводниковых соединениях различны, то различны и энергии активации поверхностной диффузии катионов, входящих в состав этих соединений. Поэтому качество гетерограниц может быть существенно разным в зависимости от того, какое из соединений при выбранном температурном режиме растет первым. Чтобы получить более гладкие и совершенные наногетерограницы, используется методика прерывания роста или методика осаждения пульсирующим пучком. Сглаживание поверхности в течение времени прерывания роста (само прерывание осуществляется механическим перекрытием на некоторый промежуток времени заслонок эффузионных ячеек) обусловлено поверхностной миграцией или сублимацией атомов, адсорбированных на поверхность выращенного монослоя.

Температура подложки определяет соотношение между потоками адсорбции или десорбции атомов, входящих в состав растущей структуры. Это соотношение может быть охарактеризовано коэффициентом прилипания атома данного сорта к поверхности, на которой происходит эпитаксиальный рост.

Существенное увеличение температуры подложки нежелательно по двум причинам: во-первых, оно может привести к уменьшению коэффициентов прилипания, во-вторых, к активизации взаимной диффузии, то есть диффузии

атомов между слоями. Поскольку НГС представляют собой на атомном масштабе резко неоднородные по химическому составу структуры, то с течением времени за счет процессов взаимной диффузии эти структуры должны переходить в термодинамически равновесное состояние с однородным распределением концентраций всех компонентов.

Однако, гетерограницы в реальных НГС не являются идеально плоскими. Даже в наиболее качественных структурах, выращенных по способу ЖФЭ с использованием тепловой эффузии, из-за неизбежных флуктуаций потоков напыляемых веществ в отдельных местах границы процесс роста может идти с некоторым запаздыванием или, наоборот, опережением. Возникает характерная островковая структура границы, представляющей совокупность плоских участков, выступающих друг относительно друга на одно-два межатомных расстояния. Сами плоские участки границы также не являются идеальными: процессы взаимной диффузии при температуре роста протекают крайне медленно, тем не менее они могут приводить к локальным (атомного масштаба) изменениям концентраций компонентов НГС.

Структура гетерограниц является важным фактором, определяющим поведение носителей тока (электронов и дырок) в НГС. В частности, неровности (шероховатости) границ могут оказывать заметное влияние на подвижность носителей. Поэтому, для того чтобы получить НГС с тонкими проводящими слоями и достаточно высокой подвижностью, необходимо выращивать такие структуры, в которых крупномасштабные неоднородности границ превышают длину свободного пробега носителя (определяется главным образом температурой).

Способ ЖФЭ с использованием тепловой эффузии является более простой и достаточно дешевой современной технологией получения полупроводниковых гетерокомпозиций и может использоваться для создания

высококачественных структур как для физических исследований, так и для приборных применений.

ЖФЭ с использованием тепловой эффузии обладают многими преимуществами, из которых важнейшими являются следующие:

- 1) возможность получения высококачественных монокристаллических структур при использовании высокочистых источников испаряемых веществ;
- 2) возможность выращивания НГС $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{CdTe}$ со сверхтонкими слоями и резким изменением химического состава на гетерограницах за счет относительно низкой температуры роста практически при отсутствии взаимной диффузии;
- 3) возможность селективного легирования и создания структур со сложным профилем химического состава на основе эффузионного эффекта;
- 4) возможность контроля толщины слоев НГС $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{CdTe}$ и качества гетерограниц непосредственно в процессе роста путем регулирования температуры в двухзонном реакторе.

Таким образом, ЖФЭ с использованием тепловой эффузии позволяет получить наногетероструктуры с заданными свойствами путем регулирования температурного режима в двухзонном реакторе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисенко В.Е. Нанoeлектроника - основа информационных систем XXI века // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 5. С. 100-104.
2. *Нашельский А. Я.* Технология полупроводниковых материалов. М.: Металлургия, 1987.
3. *Ruda H., Becla P., Lagowski S. e. a.* Mercury pressure-induced LPE growth of HgCdTe // J. Electrochem. Soc. 1983. V. 130. No. 1. P. 228.

4. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры: Пер. с англ. / Под ред. Ж.И. Алферова, Ю.В. Шмарцева. М.: Мир, 1989.
5. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки. М.: Мир, 1989.
6. Herman M.A., Bimberg D., Christen J. // J. Appl. Phys. 1991. Vol. 70, № 2. P. R1-R52.
7. Borisenko V.E. Nanostructure Based Informatics // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures / Ed. V.E. Borisenko et al. Minsk: BSUIR, 1995. P.
8. Вигдорович В.Н., Гогохия В.Г., Садыков Э. Эффект температурноградиентной разности давлений и регулирование давления насыщенного пара над разлагающимися веществами.// Теоретические основы химической технологии, 1990, т.24, №1, с.48-53.