

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РОСТА ГЕТЕРОСТРУКТУР В УСТАНОВКЕ МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИИ RIBER49

При производстве современных гетероструктурных приборов, таких как полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов, вертикальные и каскадные лазеры, особую актуальность приобретают вопросы однородности состава и толщины эпитаксиальных слоев по поверхности пластины. Для синтеза таких структур может быть использован метод молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). В системе МПЭ вещества испаряются из молекулярных источников и осаждаются на поверхность одной или нескольких подложек, расположенных на диске-держателе, который установлен на манипулятор. Источники и подложка находятся в высоковакуумной камере (базовое давление $\sim 1.0 \cdot 10^{-10}$ torr). Диск, на котором располагаются подложки, обычно вращается для получения большей однородности по толщине осаждаемых слоев. Экспериментальные методы контроля однородности и скорости осаждения требуют проведения большого количества дорогостоящих экспериментов. Поэтому моделирование процессов роста тонких слоев в методе МПЭ является актуальной задачей. В настоящей работе представлены результаты моделирования роста тонких GaAs и InGaAs слоев в установке Riber 49 на 2" и 3" GaAs подложках.

Для расчета использовалась Кнудсеновская модель испарения с поверхности расплавленного вещества. Когда жидкость находится в равновесии со своим насыщенным паром, то скорость осаждения и скорость испарения с поверхности равны. Однако в условиях МПЭ испарение происходит в высокий вакуум, то есть над поверхностью жидкости отсутствуют какие-либо пары. Модель Кнудсена предполагает, что в данном случае скорость испарения равна количеству молекул, которые бы осели на поверхность расплава за единицу времени при условии равновесия с насыщенным паром. Эта величина может быть рассчитана из соображений классической термодинамики. Итак, для скорости испарения с единичной площади имеем [1]:

$$E = p_{eq} \cdot \sqrt{\frac{N_A}{2\pi\mu k_B T}},$$

где p_{eq} – давление насыщенных паров при заданной температуре T расплавленного вещества, N_A – постоянная Авогадро, k_B – постоянная Больцмана, μ – молекулярная масса вещества. Заметим, что данное соотношение согласуется с экспериментом [1]. Угловое распределение потока вещества также рассчитывается из классических соображений и удовлетворяет закону косинусов. Таким образом, конечная формула для потока вещества с малой площадки на поверхности материала в точку на подложке может быть записана в следующем виде:

$$dF = E \frac{(\vec{n}_1 \cdot \vec{v})(-\vec{n} \cdot \vec{v})}{\pi(\vec{v} \cdot \vec{v})^2} dS,$$

где \vec{n} и \vec{n}_1 – вектора нормальные к поверхностям материала и подложки соответственно, вектор \vec{v} соединяет эти точки, dS – элемент площади расплава.

Для моделирования поверхность материала в тигле и область в плоскости диска с подложками разбивались сеткой на маленькие участки. Далее проводилось суммирование потоков от различных участков поверхности расплавленного вещества с учетом геометрии системы, а также с учетом условия прохождения частицы через выходное отверстие тигля. Численный расчет проводился в системе MatLab. Полученный профиль скорости осаждения имеет форму несимметричного горба, причем диск с подложками располагается в его

пологой части. Вращение манипулятора учитывалось путем интегрирования профиля осаждения по разным угловым положениям. Был смоделирован рост слоя GaAs из источников As кречерного типа и атомарного источника Ga. Получены профили толщины осажденного материала на 2 и 3 дюймовые пластины, а также определены временные зависимости однородности толщины растущего слоя по формуле:

$$\alpha = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\max}}$$

где H_{\max} и H_{\min} – максимальная и минимальная толщины осажденных слоев. Установлено, что однородность толщины слоя α достигает величины $\sim 1\%$ если количество оборотов манипулятора превышает 10 за время роста одного слоя. Полученная зависимость может быть использована для согласования частоты вращения манипулятора и работы заслонок, ограничивающих поток вещества при росте тонких слоев. В результате будет достигнута наилучшая однородность толщины слоя по всей поверхности пластины.

Расчетная скорость осаждения для GaAs составила величину 0.054 нм/сек, а для $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ – 0.065 нм/сек, что соответствует экспериментальным данным. Было проведено сравнение расчетного профиля осажденного материала с параметрами тестовой структуры, полученными на 12нм InGaAs/GaAs квантовой яме методом фотолюминесценции. Получено хорошее согласование величины α и дисперсии максимума фотолюминесцентного спектра InGaAs квантовой ямы. В некоторых задачах необходимо создать один или несколько слоев структуры неоднородных по толщине, например для поиска приборов с наилучшими характеристиками. Для этого можно на время остановить вращение манипулятора, что приводит в условиях установки Riber 49 к величинам $\alpha=36\%$ для 3” и 27% для 2” пластин.

В ходе работы построена численная модель процессов роста в камере МПЭ, результаты которой согласуются с экспериментальными данными. Получены скорости осаждения и профили осаждаемого вещества, которые используются для совершенствования методик выращивания современных гетероструктурных приборов на установке Riber 49.

ЛИТЕРАТУРА:

1. М.А.Нерман, Н.Ситтер. Molecular Beam Epitaxy, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1989.