

## ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 538.911

DOI: 10.17223/00213411/68/12/7

## Энергетика образования пирамидальных эпитаксиальных островков с различным контактным углом\*

К.А. Лозовой<sup>1</sup><sup>1</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

На основе развития существующих термодинамических моделей эпитаксиального роста рассмотрена энергетика образования пирамидальных эпитаксиальных островков с различным контактным углом. Предложен метод оценки величины поверхностной энергии граней при известном контактном угле. Показано существование равновесного значения угла при основании, при котором для заданных энергетических, упругих и морфологических параметров системы достигается минимум свободной энергии, что соответствует экспериментально наблюдаемой геометрической форме островка.

**Ключевые слова:** молекулярно-лучевая эпитаксия, квантовая точка, термодинамика роста, контактный угол.

## Введение

В настоящее время гетероструктуры с квантовыми ямами, нитями и точками находят широкое применение при разработке различных оптоэлектронных устройств, таких как фотоприемники видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов, солнечные элементы, полупроводниковые светодиоды и лазеры [1–4]. Перспективным методом формирования квантовых точек является их самопроизвольное образование в процессе молекулярно-лучевой или газофазной эпитаксии. Этот механизм самоорганизации возможен при наличии несовпадения постоянных решеток между подложкой и осаждаемым материалом. Когда толщина двумерного слоя достигает критического значения, накопленные упругие напряжения делают послойный рост неустойчивым и начинается формирование трехмерных островков. Это позволяет снизить упругую энергию системы, что делает процесс термодинамически выгодным. Образующиеся при этом островки являются когерентными с окружающей полупроводниковой матрицей, т.е. не содержат дислокаций несоответствия [5].

В настоящее время признано [6–10], что основным фактором, вызывающим переход от двумерного к трехмерному росту в гетероэпитаксиальных системах, является стремление минимизировать упругую энергию за счет образования трехмерных островков. Для того чтобы в определенном диапазоне толщин осаждаемого слоя происходило формирование когерентных трехмерных островков, необходимо, чтобы рассогласование параметров решеток  $\epsilon_0$  между материалом и подложкой было достаточно большим. Обычно условие  $\epsilon_0 > 2\%$  считается достаточным [11].

К числу таких систем относятся, например, InAs/GaAs с  $\epsilon_0 = 7.2\%$  и Ge/Si с  $\epsilon_0 = 4.2\%$ . Причем с увеличением рассогласования образование трехмерных островков начинается на меньших толщинах осаждаемого слоя. Так, в системе InAs/GaAs(001) переход к трехмерному росту происходит при критической толщине  $h_c$  около 1.7–1.8 монослоя (МС), а для Ge/Si(001) эта величина составляет порядка 5 монослоев. При большом рассогласовании решеток критическая толщина стремится к нулю и реализуется иной механизм роста: образование трехмерных островков на поверхности подложки без образования смачивающего слоя [12]. В системах с малым расхождением параметров решеток трехмерный рост, как правило, не наблюдается [11].

Во многих системах трехмерные островки имеют форму пирамид с квадратным или прямоугольным основанием, с достаточно стабильным значением отношения высоты островка к размеру основания. Это отношение, определяемое контактным углом при основании, является характерной величиной для каждой материальной системы. Переход к другим формам островков может наблюдаться только при достаточно больших количествах осаждаемого материала.

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-12-20004, <https://rscf.ru/project/25-12-20004/> и Администрации Томской области.