Влияние режимов отжига (001)InP в потоке мышьяка на плотность структурных дефектов в слоях InAlAs/InP

Дмитриев Д.В.¹, Торопов А.И.¹, Гишинский А.М.¹, Колосовский Д.А.², Гаврилова Т.А.¹,
Кожухов А.С.¹, Журавлёв К.С.¹

¹ ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

DOI 10.34077/Semicond2019-98

Решёточно-согласованные гетероэпитаксиальные структуры InAlAs/InP, в настоящее время привлекают большое внимание исследователей из-за применения в широком спектре современных приборов [1]. На характеристики приборов большое влияние оказывает качество гетероэпитаксиальных слоёв [2]. В работе показана зависимость плотности структурных дефектов в решёточно-согласованных слоях In_{0.52}Al_{0.48}As от условий отжига подложки (001)InP в потоке As.

Образцы выращены методом МЛЭ на установке Riber Compact-21T, оснащенной системой дифракции быстрых электронов на отражении и анализатором kSA 400 фирмы k-Space Associates, используемой для изучения реконструкции и атомных процессов на поверхности. Для роста использовались *epi-ready* полуизолирующие (001)InP подложки фирмы AXT.

Подложки отжигались в широком диапазоне температур 480-560°C, для удаления окисного слоя до появления сверхструктуры (4x2). Отжиг проводился в потоке мышьяка, который варьировался в широком диапазоне 1×10^{-6} - 1×10^{-4} Торр. Вероятно, в процессе отжига происходит замещение атомов фосфора атомами мышьяка и на поверхности подложки образуется слой InAs(P). Методом сканирующей электронной микроскопией (СЭМ) в режиме энергодисперсионной спектроскопии (EDS) было показано, что этот слой может достигать нескольких нанометров, в зависимости от условий отжига. Постоянная кристаллической решётки InP составляет 5.869 Å, тогда как InAs 6.058 Å. Такая существенная разница приводит к решёточному рассогласованию на начальных этапах роста слоёв InAlAs и возникновению напряжений, которые релаксируют в виде прорастающих дислокаций. На АСМ картинах поверхности наблюдаются структурные дефекты в виде ямок сформированные комплексами дислокаций. Плотность ямок на поверхности слоя InAlAs увеличивается с увеличением толщины слоя InAs(P) на гетерогранице слой/подложка, и может достигать 10^{-9} см². Толщина слоя InAs(P) зависит от температуры отжига и времени экспозиции подложки в потоке мышьяка. В работе экспериментально полученные оптимальные условия отжига: температура подложки <520 °C, эквивалентный поток мышьяка < $1,6 \times 10^{-5}$ Торр, время экспозиции при формировании сверхструктуры (4x2) <30 секунд. При этих условиях с поверхности удаляется большая часть окислов, но не формируется существенный слой InAs(P), что позволяет синтезировать бездефектные высококачественные слои InAlAs для оптоэлектронных приборов.

Разработанный подход к предэпитаксиальному отжигу подложки (001)InP в потоке мышьяка позволил получить гетероэпитаксиальные структуры на которых были сделаны мощные СВЧ фотодиоды 1.55 мкм спектрального диапазона, с частотами до 40 ГГц, а также продемонстрированы гетероэпитаксиальные структуры для интегрально-оптических модуляторов Маха–Цендера.

АСМ и СЭМ исследования проводились на оборудовании ЦКП «Наноструктуры».

[1] X. Meng et al, *Optics Express*, **22**, 22608. (2014).

[2] I.B. Chistokhin et al, *Materials Science in Semiconductor Processing* **74**, 193 (2018).