

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РОСТА ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ ПЛЕНКИ НА ПЕРИОД ОСЦИЛЛЯЦИЙ ЗЕРКАЛЬНОГО РЕФЛЕКСА ПРИ ДИФРАКЦИИ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

© А.И.Никифоров, В.А.Марков, О.П.Пчеляков

Дифракция быстрых электронов на отражение является наиболее распространенным методом анализа структуры поверхности пленок в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Кроме анализа структуры поверхности пленок, регистрация осцилляций зеркально-отраженного пучка быстрых электронов от поверхности растущей пленки (далее осцилляции) дает возможность измерять скорость роста пленок и контролировать их состав и толщину. Анализируя характер осцилляций, можно изучать реализуемые механизмы роста, определять параметры поверхностной диффузии и встраивания адатомов [1], сублимации [2]. Используя регистрацию осцилляций, авторы [3] предложили идею синхронизации образования двумерных зародышей, расширив тем самым возможности метода МЛЭ.

В работе [4] была предложена модель роста кристалла, из которой следует, что в области перехода от двумерно-слоевого к ступенчато-слоевому механизму роста период осцилляций уменьшается с увеличением температуры роста (T_s). В [5,6] было обнаружено, что период осцилляций в процессе роста GaAs зависит не только от потока материала на поверхность, но и от температуры подложки. Экспериментально наблюдаемое увеличение периода с возрастанием температуры авторы работы [5] объясняли влиянием перераспределения потоков вещества на поверхности при смене механизма роста, а в [6] — влиянием десорбции атомов Ga с поверхности; и определяли из температурной зависимости энергию активации десорбции. Сложность и неоднозначность интерпретации получаемых результатов обусловлена многообразием процессов, одновременно протекающих на поверхности GaAs во время роста.

Целью данной работы является определение температурной зависимости периода осцилляций на материале IV группы, а именно Ge, десорбцию которого в исследуемом температурном интервале можно не учитывать, тем самым выделив влияние только механизма роста на период осцилляций.

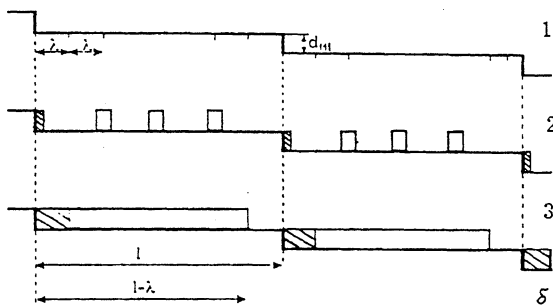
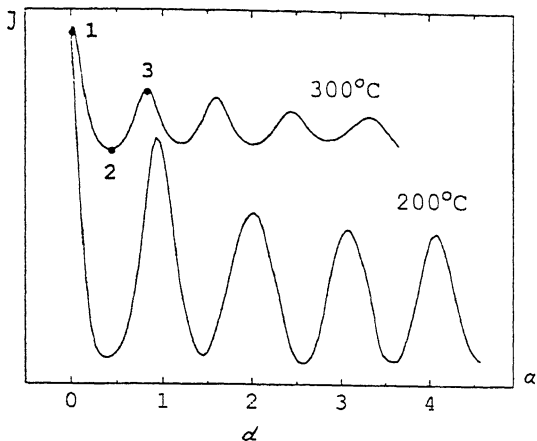


Рис. 1. Зависимость интенсивности зеркального рефлекса в процессе роста Ge при различных температурах от толщины (а) и модель роста кристалла в условиях сосуществования двумерно-слоевого и ступенчато-слоевого механизма роста (б).

Эксперимент проводился на установке "Катунь-С", оснащенной электронно-лучевыми испарителями Si и Ge. Регистрация осцилляций осуществлялась с помощью системы "Фотон-4". В качестве подложек использовались пластины Si(111) с разориентацией 15 угл.мин. После очистки при 800°C выращивался буферный слой германия толщиной 0.5 мкм, на поверхности которого формируется сверхструктура Ge(111)-2 × 8. Для сопоставления периода осцилляций с толщиной напыляемого Ge во время их регистрации измерялась толщина пленки кварцевым измерителем толщины. Это позволило определить эффективную толщину эпитаксиальной пленки (d), выросшей за время, соответствующее периоду осцилляций. Скорость роста Ge составляла 0.02 нм/с. Погрешность измерения d не превышала 5%.

При регистрации осцилляций во время роста пленки Ge на поверхности Ge(111) нами было обнаружено, что период осцилляций меняется при изменении температуры подложки и может не соответствовать времени роста одного монослоя. На рис. 1, а приведены осцилляции, полученные при 200 и 300°C. Уменьшение периода с увеличением T_s можно объяснить, рассмотрев упрощенную модель роста, показанную на рис. 1, б. Хотя в данной модели не учтена форма двухмерных островков и предполагается равновероятным встраивание адатома в ступень снизу и сверху, она хорошо качественно объясняет причину изменения периода осцилляций. В начальный момент времени, который на рис. 1, а соответствует положению (1), двухмерных островков нет, шероховатость минимальная и интенсивность зеркального пучка имеет максимальное значение. После начала роста на террасе формируются двухмерные островки, зарождающиеся на расстоянии, равном удвоенной длине миграции адатомов (λ) как друг от друга, так и от края ступени. В процессе роста двухмерные островки разрастаются одинаково во все стороны, а край ступени перемещается в сторону роста с той же скоростью (заштрихованная область), что и край островка. В момент времени, соответствующий состоянию (2) на рис. 1, а, шероховатость максимальна и интенсивность зеркального рефлекса имеет минимум. При срастании двухмерных островков края ступеней и двухмерных островков продвинулись на расстояние, равное длине миграции адатомов λ . Это соответствует состоянию поверхности, показанной для случая (3) на рис. 1, а; интенсивность зеркального рефлекса снова достигнет максимального значения. Но край ступени не будет совпадать с начальным положением, а переместится на расстояние $l - \lambda$ (l — длина террасы), что соответствует росту пленки с эффективной толщиной меньше одного монослоя за время, равное периоду осцилляций.

Была измерена эффективная толщина эпитаксиальной пленки, напыляемая за время, равное периоду осцилляций при различных T_s . Полученная зависимость показана на рис. 2, а, на правой оси отложено отношение d к высоте атомной ступени $d_{111} = 0.326$ нм. Увеличение температуры роста приводит к уменьшению периода осцилляций до 25% от периода, соответствующего времени роста полного монослоя германия. Изменение периода осцилляций наблюдается в области температур роста, когда происходит изменение механизма роста от двухмерно-слоевого к ступенчато-слоевому. Дальнейшее увеличение T_s приводит к полному исчезновению осцилляций вследствие отсутствия на поверхности двухмерных островков.

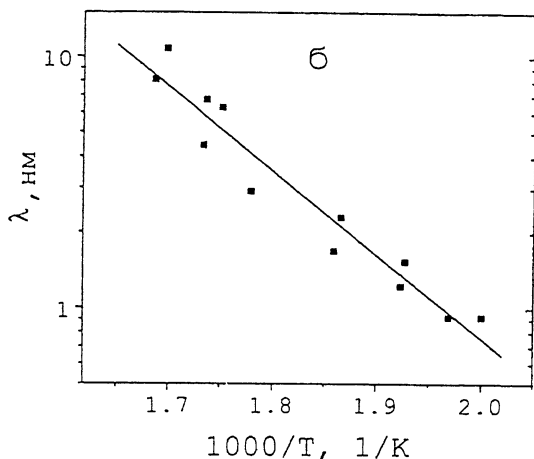
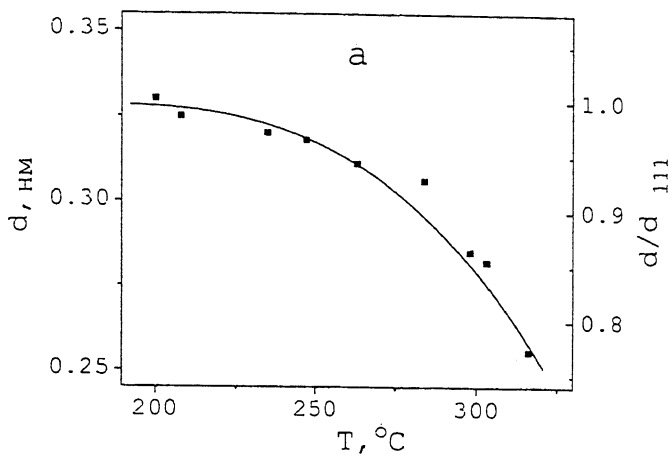


Рис. 2. Зависимость эффективной толщины пленки Ge, напыляемой за время, равное периоду осцилляций, от температуры роста (а) и длины миграции от обратной температуры (б).

Величина, характеризующая уменьшение периода осцилляций, определяется длиной миграции адатомов, которая может быть вычислена по формуле

$$\lambda = l(1 - d/d_{111}).$$

Таким образом, зная угол разориентации подложки, можно определить значения λ . На рис. 2, б приведена зависимость длины миграции адатомов германия по поверхности Ge(111) от обратной температуры. Полученная длина миграции соответствует расстоянию, на которое адатом мигрирует по

поверхности кристалла до встречи с другими с образованием центра зарождения двухмерных островков.

Длина миграции может быть выражена следующим образом:

$$\lambda = (D_s \tau)^{0.5},$$

где D_s — коэффициент поверхностной диффузии, τ — время жизни адатома до образования центра зарождения двухмерного островка. Коэффициент поверхностной диффузии равен

$$D_s = D_{s0} \exp(-E_{dif}/kT),$$

где E_{dif} — энергия активации поверхностной диффузии. Время жизни адатомов на поверхности определяется вероятностью образования стабильных кластеров, а не процессом десорбции атомов Ge с поверхности Ge(111). В рассматриваемом нами температурном интервале десорбцию можно не учитывать, поэтому можно записать, что

$$\tau = \tau_0 \exp(E/kT),$$

где E — энергия активации процесса образования стабильного кластера на поверхности. Таким образом, температурная зависимость длины миграции определяется выражением

$$\lambda = (D_{s0} t_0)^{0.5} \exp(E_m/2kT),$$

где $E_m = E - E_{dif}$. Экспериментальные данные зависимости длины миграции от обратной температуры хорошо аппроксимируются экспонентой, из которой можно определить энергию активации процесса изменения периода осцилляций, т. е. E_m . Она составляет 1.4 ± 0.2 эВ и представляет собой энергию активации формирования двухмерных островков в процессе послойного роста Ge на поверхности Ge(111).

Таким образом, в работе показано уменьшение периода осцилляций зеркального пучка с увеличением температуры роста германия на поверхности Ge(111). Это явление наблюдается в области перехода от двухмерно-слоевого к ступенчато-слоевому механизму роста и определяется перемещением края ступени на длину миграции адатома Ge за время формирования сплошного атомного слоя. Температурная зависимость изменения периода осцилляций определяется энергией активации процесса формирования двухмерных островков, которая составляет 1.4 ± 0.2 эВ. Влияние температуры роста на период осцилляций необходимо учитывать, когда регистрация осцилляций используется для контроля ростовых параметров и исследования процессов, протекающих на поверхности роста.

Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 95-02-05307) и Государственных научно-технических программ "Физика твердотельных наноструктур" (проект N 2-011).

Список литературы

- [1] *Neave J.N., Dobson P.J., Joyce B.A., Zhang J.* // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 47. N P. 100-102.
- [2] *Kojima N., Kawai N.J., Nakagawa T. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 47. N 3. P. 286-288.
- [3] *Markov V.A., Sokolov L.V., Pchelyakov O.P. et al.* // Surf. Sci. 1991. V. 250. P. 229-234.
- [4] *Pchelyakov O.P., Neisvestnyi I.G., Yanovitskaya Z.Sh.* // Phys. Low-Dim. Struct. 1995. V. 10/11. P. 389-396.
- [5] *Joyce B.A., Zhang J., Shitara T. et al.* // J. Crystal Growth. 1991. V. 115. P. 338-347.
- [6] *Suzuki T., Ishimura I., Nishinaga T.* // 10th Symp. of Alloy Semicond. Phys. and Electronics. 1991. P. 57-64.

Поступило в Редакцию
8 октября 1996 г.

