

- [3] L a i b o w i t z R.B., K o s h R.H.,
 C h a u d h a r i P., G a m b i n o R.J. //
 Phys. Rev. B. 1987. V. 35. P. 8821-8825.
- [4] Н.В. Ставровиц, Л.Ф. Аленина, С.М. Ду-
 наевский и др. // Всес. конф. по ВТСП, Киев, 1989.
 Т. 2. С. 272-273.
- [5] X u Y., S u e n a g a M., T a f t o J. et
 al. // Phys. Rev. B. 1989. V. 39. P. 6667-6680.

Поступило в Редакцию
 2 марта 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 8

26 апреля 1990 г.

11

© 1990

ЭВОЛЮЦИЯ ФОРМЫ (00)-РЕФЛЕКСА КАРТИНЫ ДОБЭ НА НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЯХ МПЭ *GaAs* (001)

В.Г. Антипов, С.А. Никишин,
 В.Н. Светлов, Д.В. Синявский,
 О.В. Смольский, В.А. Спиренков

Дифракция отраженных быстрых электронов (ДОБЭ) широко используется для контроля структуры поверхности и динамики процесса роста пленок различных материалов, изготавливаемых методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). В частности, измерение периода временных осцилляций интенсивности рефлексов дифракционной картины ДОБЭ позволяет прецизионно определять скорость роста эпитаксиального слоя [1], а изучение формы (00)-рефлекса в зависимости от угла падения электронного пучка на поверхность предоставляет информацию о локальной морфологии растущей пленки [2].

Для создания высокоэффективных гетеролазерных структур [3] повышенное внимание должно уделяться кристаллографическому совершенству гетерограницы. Поэтому необходимо иметь подробную информацию о процессе ее образования *in situ* МПЭ.

В настоящей работе проведено исследование начальных стадий автоэпитаксии нелегированного *GaAs* (001) на стандартных подложках методом ДОБЭ с использованием автоматизированной системы регистрации, позволяющей изучать форму дифракционных рефлексов в реальном масштабе времени в процессе роста.¹

¹ Здесь и в дальнейшем под формой рефлекса подразумевается распределение дифракционной интенсивности вдоль направления стержня обратной решетки поверхности *GaAs* (001), т.е. вдоль так называемого „тяжа“ на картине ДОБЭ растущей поверхности.

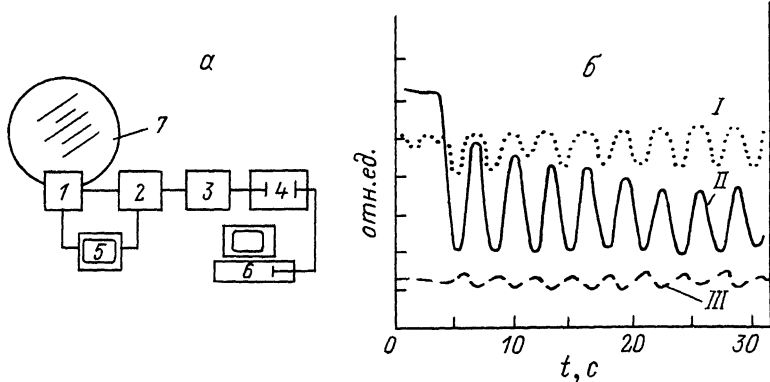


Рис. 1. Блок-схема системы регистрации картин ДОБЭ (а) и временные зависимости основных параметров (00)-рефлекса (б). 1 - ТВ-камера, 2 - устройство выбора строки, 3 - осциллограф С9-8, 4 - модуль КАМАК, 5 - видеомонитор, 6 - ДВК-3М, 7 - люминесцентный экран ДОБЭ; I - положение максимума интенсивности, II - амплитуда максимума интенсивности, III - ширина распределения интенсивности на полувысоте.

Эпитаксиальные слои $GaAs$ выращивались на стандартных подложках $GaAs$ (001) марки АП-1,2, имевших разориентацию относительно плоскости (001) $\approx (5-15)'$. Перед эпитаксией подложки обрабатывались химически по методике [4]. Удаление естественного окисла проводилось путем прогрева подложки в потоке As_4 непосредственно в камере роста МПЭ установки ЭП-1301, изготовленной в НТО АН СССР. Структура и состав поверхности подложки периодически контролировались в аналитической камере ЭП-1301 методами ДМЭ и ОЭС с помощью 4-сеточного энергоанализатора с обратным обзором дифракционной картины [5]. Потоки As_4 и Ga предварительно калибровались с использованием фазовой диаграммы поверхности [6]. Выращивание слоев $GaAs$ проводили при температуре поверхности подложки $T_s \approx (820-850)$ К, соотношении потоков As_4 (J_{As_4}) и Ga (J_{Ga}) из диапазона (J_{As_4}/J_{Ga}) $\approx (0.7-2.0)$ и скорости роста $V_p \approx (0.1-0.5)$ мкм/час. Структура поверхности во время роста слоя $GaAs$ была неизменно As -стабилизированной (2 x 4). Перед каждой серией измерений распределения интенсивности вдоль (00)-рефлекса на подложке предварительно выращивался буферный слой $GaAs$ толщиной (0.1-0.5) мкм.

Форма (00)-рефлекса картины ДОБЭ регистрировалась с помощью автоматизированной системы, состоявшей из высокочувствительной ТВ-камеры „Взор“, видеомонитора, устройства выбора строки, запоминающего осциллографа С9-8 и ЭВМ типа ДВК-3М (рис. 1,а). ТВ-камера располагалась перед экраном ДОБЭ таким образом,

чтобы направление строчной развертки было параллельно „тяжу“ дифракционного рефлекса на картине ДОБЭ. Разработанное устройство выбора строки обеспечивало возможность выделять то или иное продольное сечение рефлекса, которое визуализировалось на экране монитора. Выбранная таким образом строка видеосигнала регистрировалась осциллографом С9-8, который через модуль приборного интерфейса КАМАК управлялся от ЭВМ. В зависимости от используемых программ можно было исследовать форму (00)-рефлекса как в статических (отсутствие роста), так и в динамических (рост пленки после открытия заслонки источника Ga) условиях. В частности, в процессе МПЭ программное обеспечение позволяло исследовать изменение значения и положения максимума интенсивности распределения вдоль дифракционного рефлекса, ширину распределения на половине высоты (рис. 1,6), а также следить за изменением интенсивности в нескольких точках вдоль рефлекса в процессе МПЭ. Предельная скорость записи информации составляла величину 10 Гц.

Электронная пушка дифрактометра позволяла получать дифракционные картины ДОБЭ при энергиях электронов до $E_e = 20$ кэВ. Угловая ширина электронного пучка, измеренная на полувысоте максимума интенсивности пятна на экране ДОБЭ, составляла величину $\approx 1,5$ мрад. На рис. 2,а показаны несколько распределений интенсивности (00)-рефлекса в азимуте $[1\bar{1}0]$ на начальной стадии МПЭ GaAs (001). Особенности представленных распределений интенсивности являются сложная форма (наличие двух максимумов) и несинхронное изменение амплитуды интенсивности вдоль „тяжа“ рефлекса в процессе роста. Последний эффект проявляется в изменении положения максимума интенсивности вдоль „тяжа“ (рис. 1,6). На рис. 2,б показано, как изменяется интенсивность дифракционного распределения в двух выбранных точках вдоль (00)-рефлекса в процессе МПЭ. Видно, что на начальной стадии роста в различных точках „тяжа“ происходят осцилляции интенсивности с разным периодом.

Приведенные экспериментальные результаты, по нашему мнению, не укладываются в рамки применяющейся обычно при описании формы дифракционных рефлексов кинематической теории рассеяния [7]. В рамках такого подхода наличие двух максимумов („расщепление“) интенсивности рефлекса может быть объяснено наличием на поверхности GaAs (001) атомных ступеней [8]. Поверхность использованных нами стандартных подложек GaAs (001), как показал рентгеноструктурный анализ, была разориентирована по отношению к объемным плоскостям (001) на величину $\approx (5-15)^\circ$. Известно, что это может приводить к образованию на поверхности упорядоченных совокупностей атомных ступеней („лестниц“), вызывающих расщепление (00)-рефлекса картины ДОБЭ [2]. Характерной особенностью такого механизма является периодическое изменение величины расщепления в зависимости от полярного угла падения электронного пучка на поверхность. При определенных углах па-

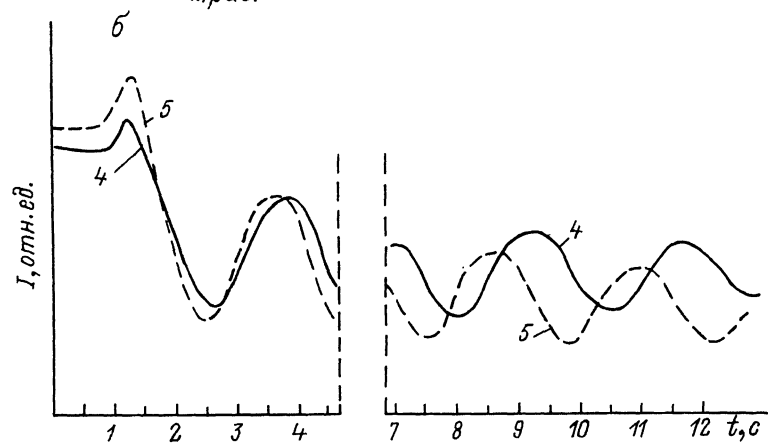
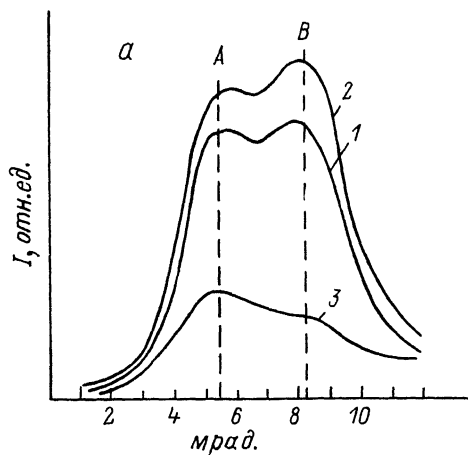


Рис. 2. Угловое распределение интенсивности (1) вдоль (00)-рефлекса в азимуте 110 на начальной стадии МПЭ $GaAs$ (а) и временные осцилляции интенсивности (1) в точках А и Б дифракционного "тяжа" (б). 1 - форма (00)-рефлекса перед началом МПЭ; 2, 3 - форма (00)-рефлекса через 1.25 с и 2.5 с соответственно; 4 - $I = f(t)$ в точке А; 5 - $I = f(t)$ в точке Б. Условия роста: $T = 820$ К; $(J_{As_4} / J_{Ga}) = 0.7$; структура поверхности - $(2 \times 4)As$.

дения, когда электронные волны, рассеянные от соседних атомных террас, складываются в фазе (т.н. „брегговское“ условие), расщепление отсутствует. При выполнении „антибрегговского“ условия (при углах падения между „брегговскими“) расщепление максимально. В условиях нашего эксперимента при энергии электронов $E_e = 18$ кэВ и высоте атомных ступеней $d_{st} = 2.83 \text{ \AA}$ „брегговское“ условие выполняется при углах падения $\theta_B \approx 1.87^\circ, 3.73^\circ \dots$, а „антибрегговское“ – при углах $\theta_{AB} \approx 0.93, 2.80^\circ \dots$

Из-за конструктивных особенностей ростовой камеры ЭП-1301 угол падения электронного пучка на поверхность мог изменяться лишь в диапазоне $\theta \approx (0.9-2.0)^\circ$. При этом изменение формы (00)-рефлекса от угла падения хорошо согласовывалось с ожидаемым, если принять модель атомных ступеней с высотой $1/2$ периода решетки GaAs. При угле падения $\theta \approx 0.95^\circ$ наблюдалось максимальное расщепление рефлекса. С ростом величины угла вплоть до значения $\theta \approx 1.9^\circ$ расщепление исчезало и одновременно уменьшалась полуширина (00)-рефлекса. Однако объяснить в рамках этой модели различие периодов колебаний интенсивности разных точек „тяжа“ во время роста не удается.

Известно [9], что к асимметрии и даже расщеплению рефлекса может приводить пересечение дифракционного „тяжа“ с Кикучи-линией, обусловленной дифракцией неупруго рассеянных в поверхностном слое электронов на объемных плоскостях кристалла. Подробного изучения влияния этого механизма в нашем эксперименте не проводилось. Тем не менее, можно высказать несколько соображений. Угловая ширина Кикучи-линии обычно гораздо больше ширины зеркального рефлекса. К тому же в процессе роста периоды осциллирующей интенсивности Кикучи-линии и (00)-рефлекса совпадают, хотя колебания происходят в противофазе. Поэтому представляется маловероятным, что этот эффект доминирует в условиях нашего эксперимента, хотя необходимы дальнейшие исследования. Следует добавить, что на наблюдавшееся нами поведение формы рефлекса могут влиять эффекты многократного рассеяния электронов при ДОБЭ [10].

Проведенный анализ показывает, что к интерпретации эволюции формы рефлексов ДОБЭ на начальных стадиях роста нужно подходить с осторожностью, в особенности при использовании методики ДОБЭ для прецизионного измерения скорости роста эпитаксиального слоя.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Sakamoto T., Funabashi H., Ohta K., Nakagawa T. и др. // Jap. J. Appl. Phys. 1984. V. 23. N 9. P. L657-L659.
- [2] Pukite P.R., Van Hove J.M., Cohen P.I. // Appl. Phys. Lett. 1984. V. 44. N 4. P. 456-458.

- [3] Алферов Ж.И., Васильев А.М., Иванов С.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 14. № 9. С. 1803-1807.
- [4] Бер Б.Я., Минчев Г.М., Копьев П.С. и др. // Письма в ЖТФ. 1981. № 19. С. 1209-1213.
- [5] Антипов В.Г., Большунов И.Б., Романов С.С. // ПТЭ. 1990. № 3.
- [6] Newstead S.M., Kubiak R.A.A., Parker E.H.C. // J. Cryst. Growth. 1987. V. 81. P. 49-54.
- [7] Хенцлер М. В кн.: Применение электронной спектроскопии для анализа поверхности. Рига: Зинатне, 1980. 155 с.
- [8] Cohen P.I., Pukite P.R., Van Hove J.M., Lent C.S. // J. Vac. Sci. Technol A. 1986. V. 4. N 3. P. 1251-1258.
- [9] Larsen P.K., Meyer-Ehmsen G., Bolger B., Hoeven A.-J. // J. Vac. Sci. Technol A. 1987. V. 5. N 4. P. 611-614.
- [10] Larsen P.K., Dobson P.J., Neave J.H. и др. // Surf. Sci. 1986. V. 169. N 1/3. P. 176-196.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию
8 января 1990 г.