

02;06;12

Система регистрации и анализа картин дифракции быстрых электронов на отражение

© Г.М. Гурьянов, В.Н. Демидов, Н.П. Корнеева, В.Н. Петров, Ю.Б. Самсоненко, Г.Э. Цырлин

Институт аналитического приборостроения РАН,
198103 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 22 ноября 1995 г.)

Описана эффективная и быстродействующая система регистрации и анализа картин дифракции быстрых электронов на отражение. Программное обеспечение, разработанное для данной системы, включает в себя три пакета программ: для работы в однооконном, четырехоконном и линейном режимах. Приведены примеры использования системы для контроля и исследования процессов роста полупроводниковых соединений A_3B_5 в методе молекулярно-пучковой эпитаксии. С использованием описанной системы обнаружен эффект периодического расщепления профилей дифракционных рефлексов при росте GaAs (100).

Введение

Метод дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) является одним из самых эффективных средств контроля морфологии поверхности твердого тела и широко используется в технологиях получения полупроводниковых структур, в том числе и в молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). Информация в методе ДБЭО содержится в изображении, получаемом на флуоресцентном экране в результате дифракции электронов с энергией 5–50 кэВ, падающих на поверхность твердого тела под скользящими углами [1]. Анализ статических дифракционных изображений позволяет судить о кристаллической структуре поверхностного слоя, а также изучать микрорельеф поверхности, включая получение количественной информации о плотности моноатомных ступеней и распределении двумерных зародышей на поверхности [2,3]. Наблюдение за динамикой картин ДБЭО при эпитаксиальном росте пленки дает возможность оценивать с большой точностью скорость роста, при этом время роста одного монослоя соответствует (в общем случае) периоду на осциллирующей временной зависимости интенсивности рефлекса в дифракционном изображении [4]. Для полного и эффективного использования возможностей метода ДБЭО необходимо осуществлять регистрацию и количественный анализ дифракционных картин в целом или их части. При этом обычно дискретность измерения изображений должна быть значительно меньше времени роста одного монослоя.

Наиболее часто для этих целей использовался фотумножитель, регистрирующий изменение интенсивности сигнала ДБЭО на флуоресцентном экране [5]. Однако такая система весьма ограничена и позволяет измерять в реальном масштабе времени интенсивность только одного рефлекса, притом интегрально. Между тем информация об интенсивности ДБЭО в различных рефлексах и форме рефлекса представляется весьма важной с точки зрения изучения фундаментальных процессов на поверхности при МПЭ.

В настоящее время существует ряд систем, позволяющих регистрировать небольшие участки дифракционных

изображений в реальном масштабе времени [6,7], однако они либо не обладают достаточным быстродействием, либо слишком громоздки и дорогостоящи и требуют применения специальных аппаратных средств. В данной работе описана недорогая и быстродействующая система регистрации оптических изображений, позволяющая анализировать с помощью ЭВМ дифракционные изображения, а также измерять в реальном масштабе времени изменения интенсивностей фрагментов дифракционных картин (до 2000 точек для IBM PC AT 286) с дискретностью 40 мс. В состав системы также входит пакет программного обеспечения, ориентированный на задачи технологии молекулярно-пучковой эпитаксии. Описанная нами система позволила обнаружить эффект периодического расщепления профилей дифракционных рефлексов при эпитаксиальном росте GaAs (100).

Система регистрации картин ДБЭО

Структурная схема системы регистрации картин ДБЭО приведена на рис. 1. Система состоит из телевизионной видеокамеры (ТВ камеры) с блоком питания, видеомонитора, устройства ввода видеоинформации в ЭВМ (УВВИ), IBM PC AT персонального компьютера с монитором и специально разработанного программного обеспечения. Информация с флуоресцентного экрана также может быть записана на видеоманитофон.

В качестве телевизионной камеры была использована камера ПТУ-84, выпускаемая заводом "Волна" (г.Новгород) и выполненная на суперкремниконовой трубке, что обеспечивало высокую спектральную чувствительность в области свечения люминофора. Следует отметить, что в данной системе может быть использована любая ТВ камера, имеющая на выходе стандартный телевизионный сигнал. Камера закреплена на фланце ростового модуля установки МПЭ (ЭП1203) таким образом, чтобы исключить попадание прямого света на объектив и обеспечить обзор требуемой области изображения на флуоресцентном экране. Картины ДБЭО, формируемые на флуоресцентном экране, реги-

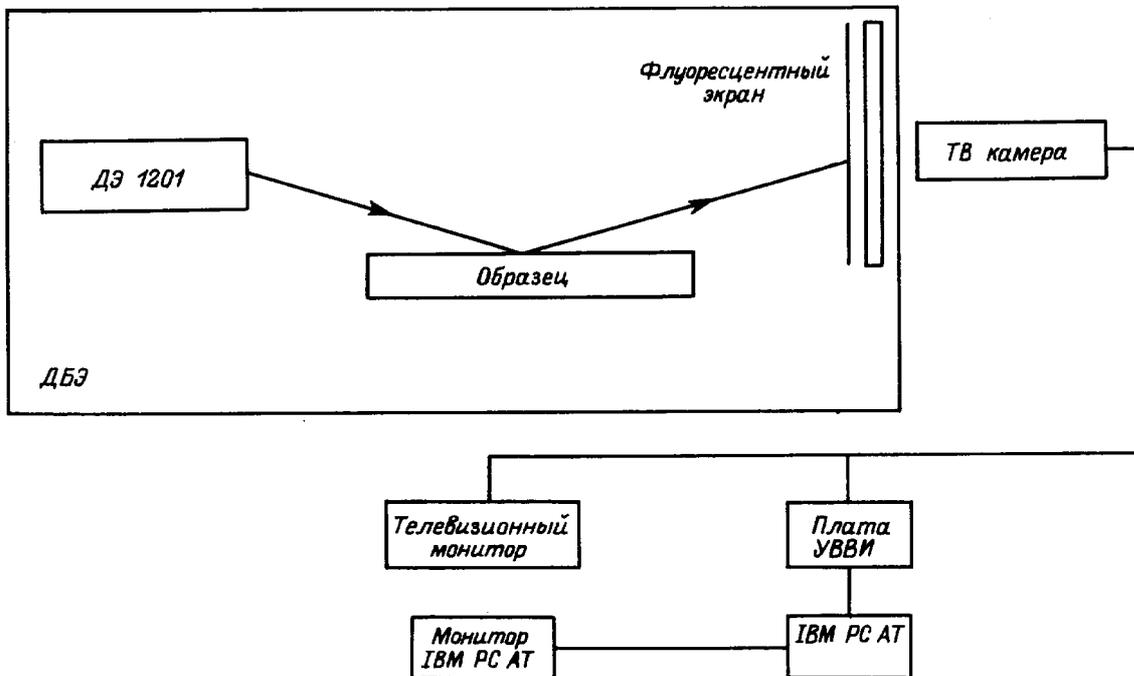


Рис. 1. Структурная схема системы регистрации дифракционных изображений. ДЭ1201 — электронная пушка, ДБЭ — дифрактометр быстрых электронов.

стрируются видеокамерой, видеосигнал с которой поступает параллельно на плату УВВИ и видеомонитор, обеспечивающий непрерывное наблюдение за картиной ДБЭО в процессе экспериментов. УВВИ конструктивно выполнено в виде печатной платы, установленной в свободный "слот" компьютера, в качестве которого может быть использован любой IBM совместимый компьютер.

Устройство УВВИ предназначено для преобразования аналогового видеосигнала в цифровую форму (256 градаций яркости, 512×512 точек), запоминания телевизионного кадра в буферном запоминающем устройстве (БЗУ) с частотой обновления информации 50 Гц и обеспечивает программно управляемый ввод информации из БЗУ в ЭВМ. Структурная схема УВВИ, поясняющая его работу, приведена на рис. 2. В состав устройства входят аналого-цифровой преобразователь (АЦП) со входным усилителем для амплитудной оцифровки входного видеосигнала, генератор тактовых импульсов (ГТИ), обеспечивающий временную дискретизацию видеосигнала, счетчики *СТХ* и *СТУ*, предназначенных для адресации БЗУ в режиме записи информации, регистров *RGX* и *RGY*, предназначенных для адресации БЗУ в режиме программного ввода информации в ЭВМ, шинных формирователей (ШФ и ШФ *DAT*), обеспечивающих согласование сигналов. Строчные и кадровые синхроимпульсы (ССИ и КСИ), снимаемые с ТВ камеры, используются для синхронизации при временной оцифровке телевизионного сигнала.

Основные технические параметры описанной системы для используемого типа ТВ камеры следующие: область спектральной чувствительности 350–800 нм, максималь-

ная чувствительность ТВ камеры $5 \cdot 10^{-5}$ лм, число элементов разложения изображения 512×512 , время ввода одной точки изображения в БЗУ 80 нс, число градаций яркости изображения 256.

Программное обеспечение

Программное обеспечение, написанное на языке Си, разделено на три независимых пакета: а) однооконный режим, б) четырехоконный режим, в) линейный режим. Все три пакета состоят из программ снятия и обработки информации. Каждая из программ снабжена удобным для пользователя меню с пояснениями для каждого из разделов.

а) **Однооконный режим.** Основной целью данного пакета является регистрация с частотой обновления телевизионной информации (50 Гц) изменения интенсивности в пределах выбранного участка дифракционного изображения (рефлекса) и определения скорости роста эпитаксиального слоя требуемого состава путем вторичной обработки полученной информации. При работе в этом режиме вначале снимается обзорная картина со всего флуоресцентного экрана и отображается на мониторе ЭВМ (512×512 точек). Далее, на мониторе выбирается интересный участок (размером 128×128 точек) и отображается на мониторе в увеличенном виде. После этого задается размер окна и выбирается его положение в произвольном месте увеличенного изображения. Далее выбирается время, в течение которого будет сниматься информация из окна и по команде оператора программа

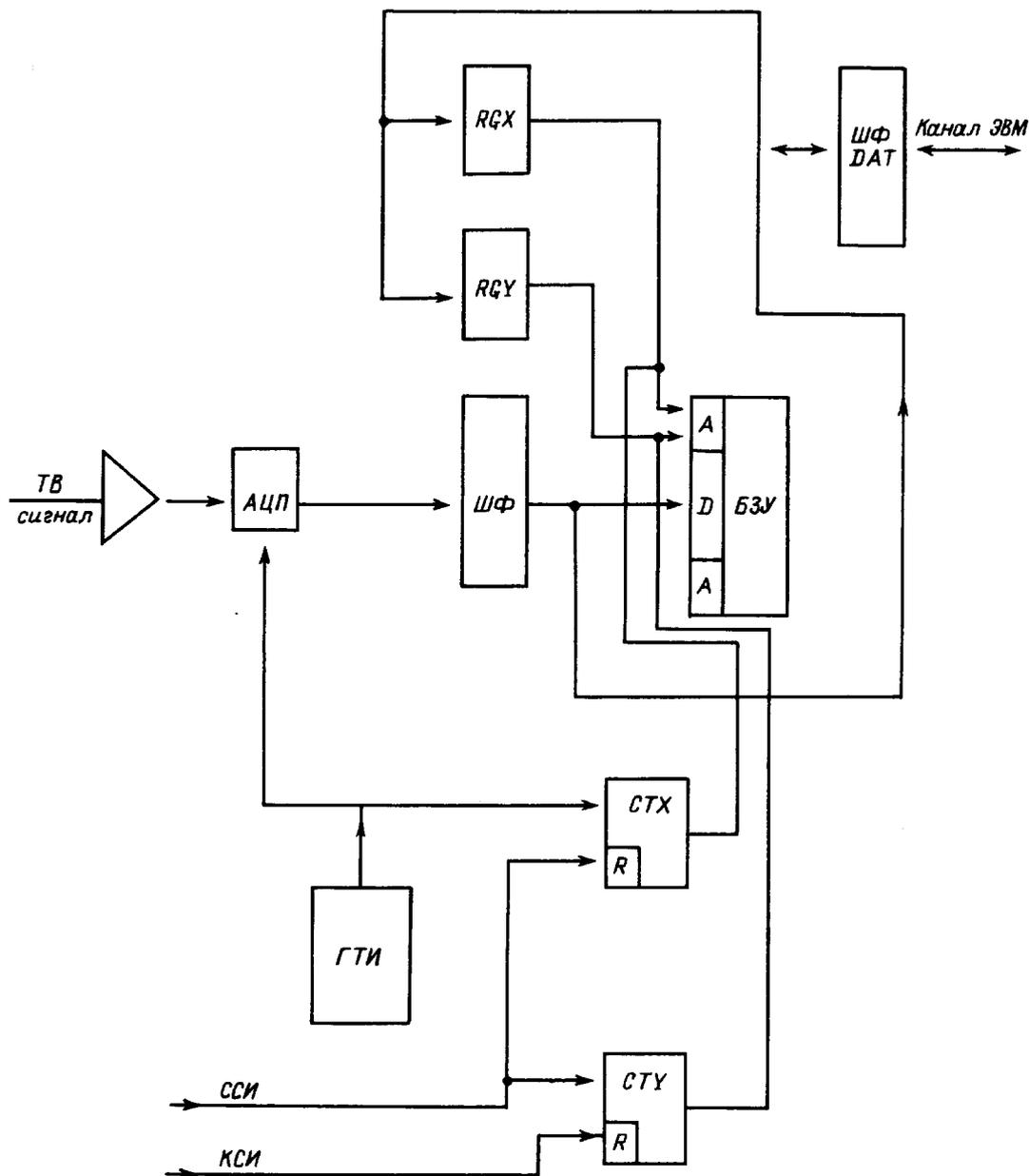


Рис. 2. Структурная схема устройства ввода видеоинформации в ЭВМ. АЦП — аналого-цифровой преобразователь 1107ПВ2, ГТИ — генератор тактовых импульсов, ССИ и КСИ — строчные и кадровые синхроимпульсы, БЗУ — буферное запоминающее устройство, RGX и RGY — регистры для адресации БЗУ при вводе информации в ЭВМ, СТХ и СТУ — двоичные счетчики для адресации БЗУ, ШФ и ШФ DAT — шинные формирователи.

считывания запускается. При этом регистрируемая информация (интенсивность сигнала) усредняется в пределах площади окна и высвечивается на экране монитора в виде зависимости интенсивности от времени измерения. Когда время исполнения заканчивается или программа останавливается оператором до окончания ранее заданного времени, пользователь может измерить с помощью специальных маркеров интервалы между произвольными моментами времени, произвести вычисление скорости роста, записать информацию на диск (включая в том числе и информацию о дифракционном изображении) или

распечатать полученный результат. Если это необходимо, то пользователь может впоследствии анализировать полученную информацию с помощью программы обработки. Пример использования этой программы приведен на рис. 3. Данный пример относится к росту гетерополупроводниковой сверхрешетки GaAs/(Al,Ga)As/AlAs (левая, центральная и правая части на осциллирующей зависимости соответственно), выращенной при температуре подложки 600°C, эффективном давлении мышьяка в зоне роста $4.2 \cdot 10^{-6}$ Па. Информация снималась в нулевом рефлексе в направлении $[0\bar{1}1]$ при энергии

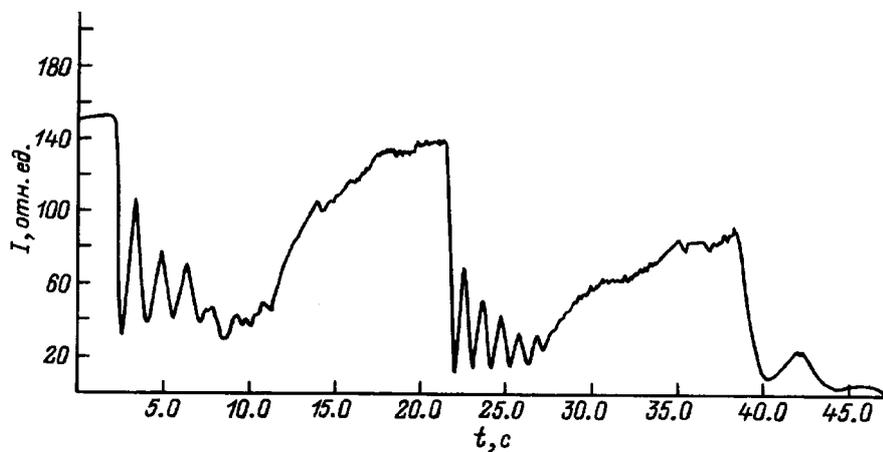


Рис. 3. Временная зависимость интенсивности дифракционного рефлекса для однооконого режима.

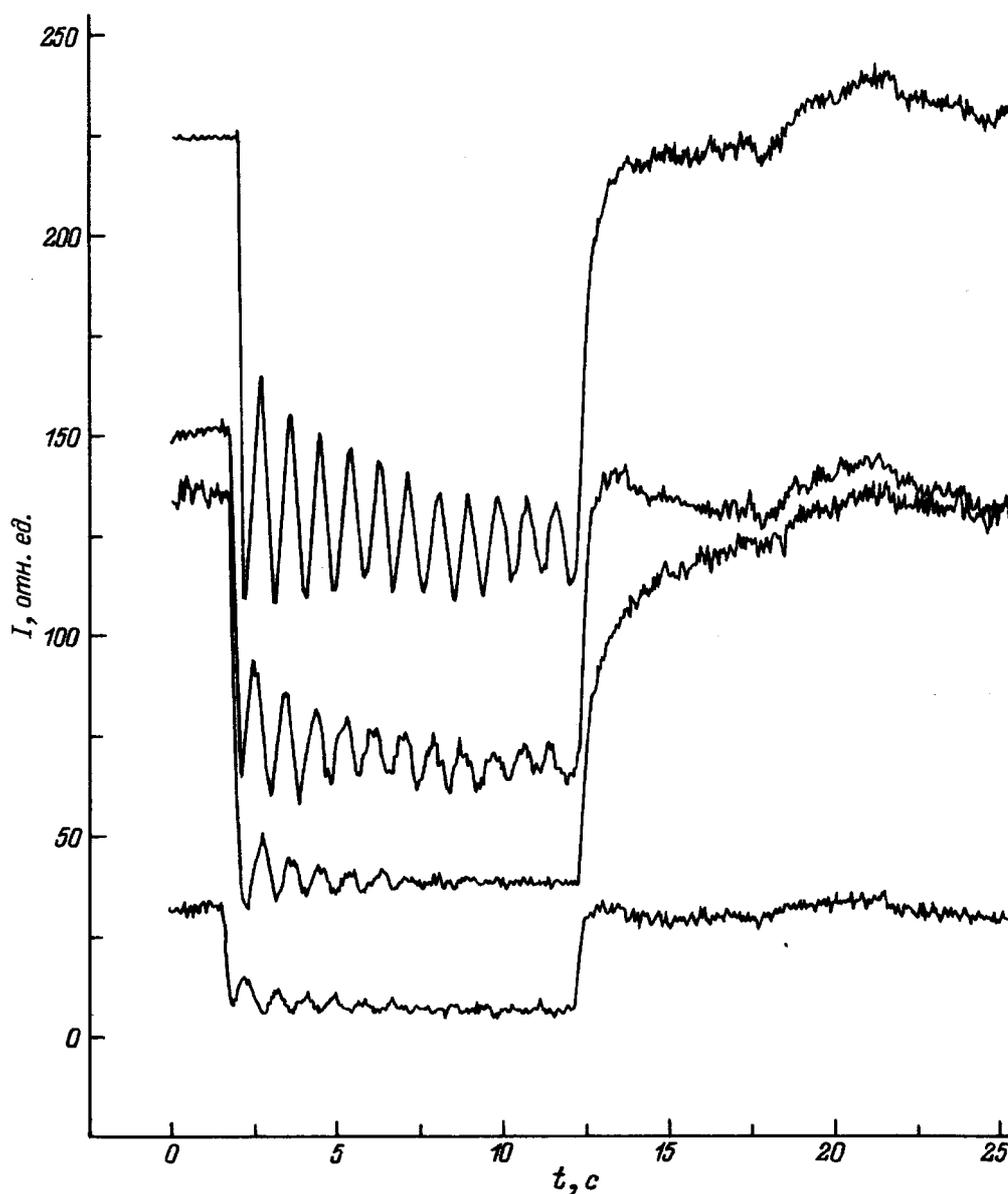


Рис. 4. Временные зависимости интенсивностей в различных точках дифракционного изображения для четырехоконого режима.

электронного пучка 12.5 кэВ и угле падения 1° . Следует отметить, что каждый распечатанный результат может быть снабжен поясняющей подписью (до 150 символов).

б) Четырехоконный режим. Этот пакет может быть использован при измерении интенсивностей ДБЭО в нескольких дифракционных пучках одновременно с частотой, равной частоте обновления телевизионной информации (50 Гц). Основным отличием от однооконного режима является наличие возможности выбора до четырех окон произвольного размера в произвольном месте на дифракционном изображении; в остальном все возможности предыдущего пакета сохраняются. На

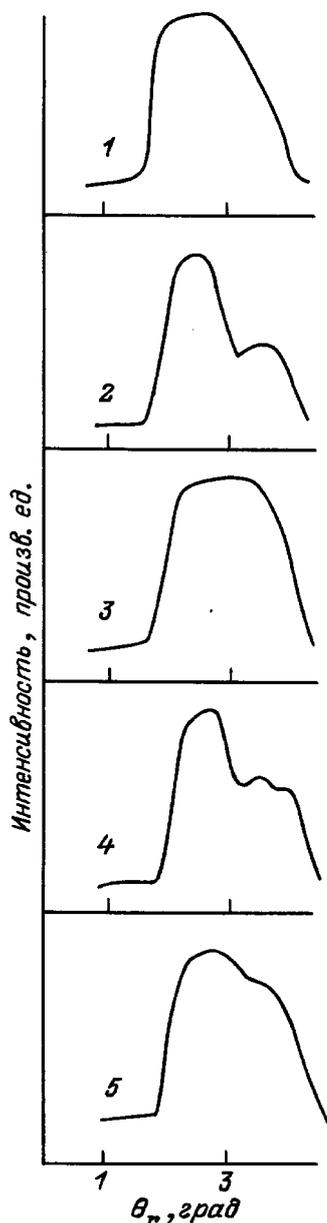


Рис. 5. Профили (01) рефлекса при росте GaAs(100), измеренные в различные моменты времени (в числе монослоев). 1 — исходный профиль (до роста), 2 — 0,5, 3 — 1,0, 4 — 2,5, 5 — 3,0.

рис. 4 показан пример использования данного пакета программ для эпитаксиального слоя GaAs, выращенного в условиях перехода поверхностной реконструкции (2×4) в (4×2) (температура подложки 550°C , соотношение потоков $\text{As}_4/\text{Ga}=1/2$). Временные зависимости интенсивности ДБЭО снимались в направлении [011] на различных дифракционных рефлексах. Из рисунка видно наличие сдвига фаз осцилляций в различных дифракционных пучках, что демонстрирует возможности системы в исследовании особенностей механизма МПЭ роста.

в) Линейный режим. Этот пакет предназначен для анализа профилей дифракционных изображений с частотой, равной частоте обновления телевизионной информации (50 Гц). Основным отличием от предыдущих режимов является возможность измерения интенсивностей ДБЭО в квазилинейном варианте между двумя произвольно выбранными точками на интересующем участке дифракционного изображения. Линия состоит из набора окон (до 16) с произвольным, но фиксированным размером. Все возможные операции при снятии изображения (контроль из интенсивностью ДБЭО в любом окне, запись на диск, распечатка результатов, возможность оперативного измерения скорости роста) остаются такими же, как и в предыдущих режимах. Информация, получаемая в этом режиме, является наиболее полной по сравнению с описанными ранее и позволяет исследовать сложные физические явления, связанные с МПЭ ростом.

Программа вторичной обработки позволяет пользователю графически отобразить информацию (в виде зависимостей интенсивности сигнала от времени), снятую в любом из окон различными цветами в не сглаженном или сглаженном методом сплайн-аппроксимации режиме, при этом на экране одновременно могут быть отображены от 1 до 16 кривых. Далее, можно рассчитать скорость роста или определить некие характерные времена (например, время схода окисного слоя, скорость изменения поверхностной реконструкции, время перехода от двумерного к трехмерному механизмам роста пленки и др.).

Эффект периодического расщепления профилей дифракционных рефлексов при росте GaAs (100)

Представленные результаты для линейного режима показывают высокую информативность метода ДБЭО для исследования процессов МПЭ роста. В частности, использование этого режима позволило авторам обнаружить эффект периодического расщепления профилей дифракционных рефлексов при эпитаксиальном росте GaAs (100).

После стандартной процедуры удаления окисного слоя с поверхности подложки [8] и выращивания буферного слоя при условиях, обеспечивающих поверхностную реконструкцию (2×4), рост прерывался и поверхность выдерживалась под потоком мышьяка для ее выглаживания. После этого заслонка Ga открывалась и проводились

измерения изменений профиля распределения интенсивности в зеркально отраженном рефлексе в направлении $[0\bar{1}1]$ в линейном режиме в течение 30 с. При этом диапазон измеряемых углов дифракционного пучка вдоль профиля составлял $1-4^\circ$, угол падения первичного пучка электронов был равен 1° .

На рис. 5 приведены профили (00) рефлекса в процессе МПЭ роста в различные моменты времени. Суть обнаруженного эффекта сводится к перераспределению интенсивности участков дифракционного изображения, расположенных вдоль дифракционной линии вблизи зеркально отраженного рефлекса. При прохождении минимума интенсивности осциллирующий зеркальный рефлекс расщепляется на два или три максимума, причем дополнительные пики расположены под большими ($> 1^\circ$) углами отражения. Несмотря на то что существует много работ, описывающих наблюдение осцилляций, и встречается даже упоминание о смещении фаз осцилляций, полученных в разных точках дифракционной картины, подобный результат описывается впервые.

Расположение дополнительных максимумов интенсивности по отношению к основному пику зеркально отраженного луча сравнивалось с расстоянием между нулевым рефлексом и дробными рефлексами нулевой Лауэ-зоны. Это позволило сделать предположение о проявлении реконструкции поверхности в процессе МПЭ роста в направлении, параллельном плоскости падения луча, разрешимым в моменты появления зародышей нового слоя при послонном росте, т. е. в моменты, когда интенсивность основных рефлексов дифракционной картины минимальна. Более подробное изучение этого эффекта мы надеемся привести в отдельной работе.

Заключение

Описана недорогая и эффективная система регистрации и анализа картин дифракции быстрых электронов на отражение и приведены конкретные примеры ее использования при росте полупроводниковых соединений A_3B_5 в методе молекулярно-пучковой эпитаксии. С нашей точки зрения, описанная система позволяет наблюдать и анализировать все основные особенности, присущие методу ДБЭО при МПЭ. Кроме того, описанная система позволила обнаружить эффект периодического расщепления профилей дифракционных рефлексов при эпитаксиальном росте GaAs (100). В дополнение следует отметить, что представленная система может быть включена в комплекс автоматизации ростовых процессов и обеспечить выращивание квантоворазмерных структур с точностью контроля толщины пленки до долей монослоя.

Авторы благодарят Российский фонд фундаментальных исследований (грант № 95-02-05084а) и МНТП "Физика твердотельных наноструктур" за финансовую поддержку.

Список литературы

- [1] Herman M.A., Sitter H. Molecular Beam Epitaxy. Fundamentals and Current Status. Berlin: Springer Verlag, 1989. P. 376.
- [2] Dobson P.J., Joyce B.A., Neave J.H., Zhang J. // J. Cryst. Growth. 1987. Vol. 87. P. 1.
- [3] Senichkin A.P., Bugaev A.S., Molchnovsky R.A. // Abstracts 1st Intern. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology". St.Petersburg, 1993. P. 102.
- [4] Neave J.H., Joyce B.A., Dobson P.J., Norton N. // Appl. Phys. A. 1983. Vol. 31. P. 1.
- [5] Ca C., Wieder H.H. // Rev. Sci. Instr. 1990. Vol. 61. P. 917.
- [6] Bolger R., Larson P.K. // Rev. Sci. Instr. 1986. Vol. 57. P. 1363.
- [7] Resh J.S., Stroizer J., Jamison K.D., Ignatiev A. // Rev. Sci. Instr. 1990. Vol. 61. P. 771.
- [8] Гурьянов Г.М., Леденцов Н.Н., Петров В.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 18. С. 64.