

УДК 548.52.539.23

## КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОБРАБОТКИ КАРТИН ДИФРАКЦИИ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ОТРАЖЕНИЕ

© В.Н. Петров, В.Н. Демидов, Н.П. Корнеева, Н.К. Поляков, Г.Э. Цырлин

\*Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 27 января 1999 г.

Описан эффективный и быстродействующий комплекс, предназначенный для визуализации и ввода в ЭВМ, регистрации и анализа картин дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО). Приведены структурные схемы и технические характеристики комплекса, его взаимосвязь с устройствами управления процессами роста полупроводниковых структур методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Описано разработанное для данного комплекса программное обеспечение, обеспечивающее обработку картин дифракции быстрых электронов, в том числе в реальном масштабе времени, а также автоматизацию процессов эпитаксиального роста.

### ВВЕДЕНИЕ

Метод дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) является в настоящее время самым эффективным средством контроля морфологии поверхности твердого тела *in situ* 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 5-25 кэВ, падающих на поверхность твердого тела под скользкими углами [1].

Анализ статических дифракционных изобра-

жений позволяет судить о кристаллической структуре поверхностного слоя, а также изучать микро-рельеф поверхности, включая получение количественной информации о степени разориентации поверхности, а также о плотности моноатомных ступеней и распределении двумерных зародышей на поверхности [2]. Информация об интенсивности ДБЭО в различных рефлексах, форме рефлекса, несинхронная реакция интенсивности в различных точках в процессе роста представляется весьма важной с точки зрения изучения фундаментальных процессов на поверхности при МПЭ.

Наблюдение за динамикой картин ДБЭО при эпитаксиальном росте пленки дает возможность оценивать с большой точностью скорость роста,

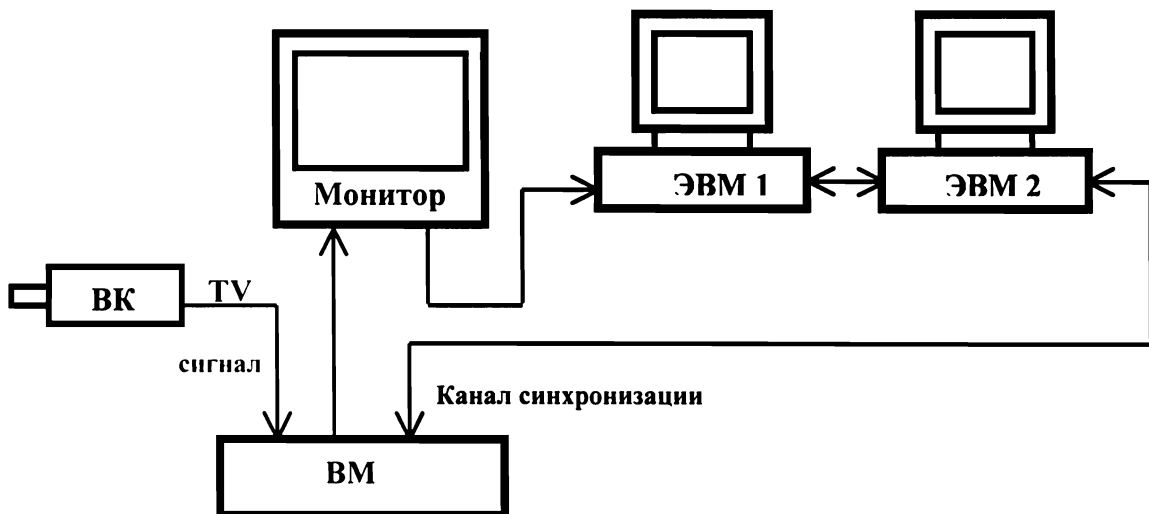


Рис. 1. Функциональная схема комплекса регистрации картин ДБЭО: ВК — видеокамера, ВМ — видеомагнитофон.

при этом время роста одного монослоя (МС) соответствует (в общем случае) периоду на осциллирующей временной зависимости интенсивности рефлекса в дифракционном изображении [3].

Для полного и эффективного использования возможностей метода ДБЭО необходимо осуществлять регистрацию и количественный анализ дифракционных картин в целом или их части, причем дискретность измерения изображений должна быть значительно меньше времени роста одного монослоя.

В данной работе описан не имеющий в России аналогов быстродействующий комплекс для регистрации оптических изображений картин ДБЭО, позволяющий анализировать с помощью ЭВМ дифракционные изображения, а также измерять в реальном масштабе времени изменения интенсивности фрагментов дифракционных картин с дискретностью 40 мс. Ранее комплекс предварительно был представлен в [4,5].

#### АППАРАТНАЯ ЧАСТЬ КОМПЛЕКСА

Все экспериментальные работы проводились на разработанной в СКБ АП НТО АН СССР и серийно выпускавшейся на ЭЗНП (пос. Черноголовка Московской области) установке МПЭ ЭП1203, оснащенной штатным дифрактометром быстрых электронов ДЭ1201.

Структурная схема комплекса регистрации

картин ДБЭО приведена на рис. 1. В состав комплекса входят телевизионная видеокамера (ВК), видеомонитор, видеомагнитофон (ВМ), встроенное в ЭВМ типа IBM PC со стандартным монитором устройство ввода видеоинформации (УВВИ) и устройство синхронизации записи/считывания на ВМ. Управление комплексом производится с помощью специально разработанного программного обеспечения.

В качестве телевизионной камеры была использована камера СРТ 8260 фирмы «Chiper», однако в данном комплексе может быть использована любая обладающая аналогичными параметрами видеокамера, имеющая на выходе стандартный телевизионный сигнал. Камера была закреплена на фланце ростового модуля установки МПЭ таким образом, чтобы исключить попадание прямого света на объектив и обеспечить обзор требуемой области изображения на флуоресцентном экране дифрактометра.

Картины ДБЭО, формируемые на флуоресцентном экране, регистрируются видеокамерой, видеосигнал с которой поступает на видеомагнитофон и далее параллельно в режимах видеомагнитофона «стоп» или «запись» на плату УВВИ и видеомонитор, обеспечивающий непрерывное наблюдение за картиной ДБЭО в процессе эксперимента. В режиме видеомагнитофона «воспроизведение» на плату УВВИ и видеомонитор автоматически поступает ранее записанный на видеопленку

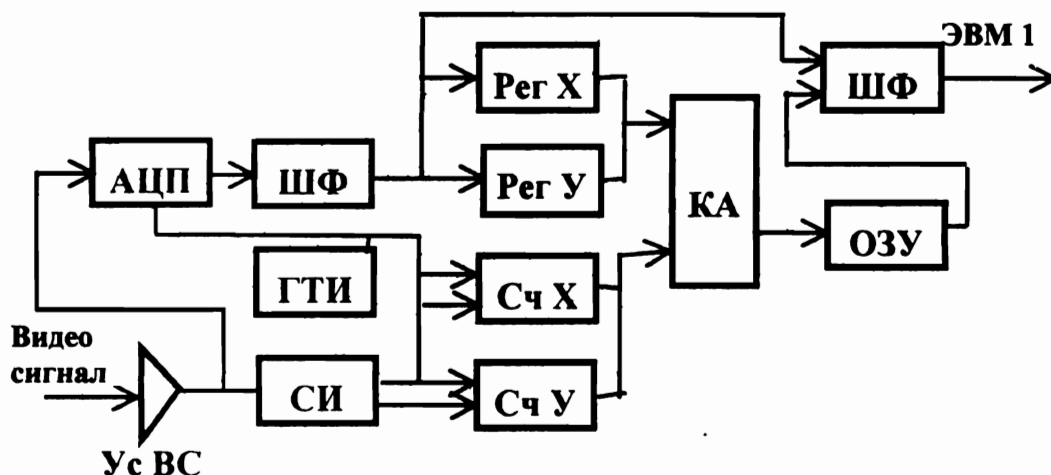


Рис. 2. Структурная схема устройства ввода видеоинформации в ЭВМ: Ус ВС — усилитель видеосигнала; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ГТИ — генератор тактовых импульсов; БЗУ — буферное запоминающее устройство; Рег X, Рег Y — регистры для адресации БЗУ при вводе информации в ЭВМ; Сч X, Сч Y — двоичные счетчики для адресации БЗУ; ШФ — шинные формирователи; КА — коммутатор адреса; СИ — селектор синхроимпульсов.

сигнал.

Устройство УВВИ предназначено для преобразования аналогового видеосигнала в цифровую форму (256 градаций интенсивности, 512x512 точек), запоминания телевизионного кадра в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) с частотой обновления информации 50 Гц и обеспечивает программно управляемый ввод информации из ОЗУ в ЭВМ. Конструктивно УВВИ выполнено в виде печатной платы, установленной в свободный ISA "слот" компьютера, в качестве которого может быть использован любой IBM совместимый компьютер типа IBM PC AT 386SX и выше с разрешением монитора не менее 800x600 точек. Структурная схема УВВИ, приведена на рис. 2. В состав устройства входят усилитель видеосигнала (Ус ВС), аналого-цифровой преобразователь (АЦП) для амплитудной оцифровки входного видеосигнала, генератор тактовых импульсов (ГТИ), обеспечивающий временную дискретизацию видеосигнала, счетчики Сч X и Сч Y, предназначенные для адресации ОЗУ в режиме записи информации, регистры Рг X и Рг Y, предназначенных для адресации ОЗУ в режиме программного ввода информации в ЭВМ, коммутатора адреса (КА), шинных формирователей (ШФ), обеспечивающих согласование сигналов.

Устройство синхронизации записи/воспроизведения предназначено для создания меток на видеоленте при записи на ВМ, а также в случае обработки ранее записанной на видеомагнитофон информации позволяет синхронно запустить эмюляцию программы роста, использовавшуюся при записи с целью однозначного приведения в соответствие обрабатываемых картин ДБЭО со всеми параметрами процессов роста (положение заслонок и время с момента их открытия/закрытия). Устройство синхронизации конструктивно выпол-

нено в виде печатной платы, установленной в свободный ISA "слот" управляющего заслонками молекулярных источников компьютера (ЭВМ 2). Структурная схема устройства синхронизации приведена на рис. 3. Устройство синхронизации состоит из двух взаимно независимых каналов: записи и считывания меток на звуковой дорожке магнитофонной видеоленты. Канал записи предназначен для создания метки по команде из программы управления заслонками молекулярных источников и состоит из селектора адреса (СА) и управляемого генератора (УГ). Канал считывания состоит из компаратора (К) и узла формирования запросов прерывания (УФЗП) и предназначен для считывания ранее записанной метки.

### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Программное обеспечение представляет собой пакет процедур, предназначенных для управления аппаратурой комплекса, сбора и обработки информации об интенсивности рефлекса в реальном масштабе времени. Язык программирования — Си, операционная среда — MS DOS (версия не ниже 5.0).

Программы снятия и обработки информации об интенсивности рефлекса обеспечивают считывание из УВВИ обновляющихся с частотой 50 Гц данных, представляющих собой интенсивность видеосигнала. Считанная статическая картина ДБЭО (видеоизображение с ТВ камеры или ВМ 512x512 точек, 256 градаций интенсивности сигнала) может быть отображена на экране видеотерминала ПЭВМ и сохранена в виде файла на жестком диске в формате Windows Bitmap с целью дальнейшей обработки стандартными пакетами обработки и печати графических изображений в среде Windows 95.

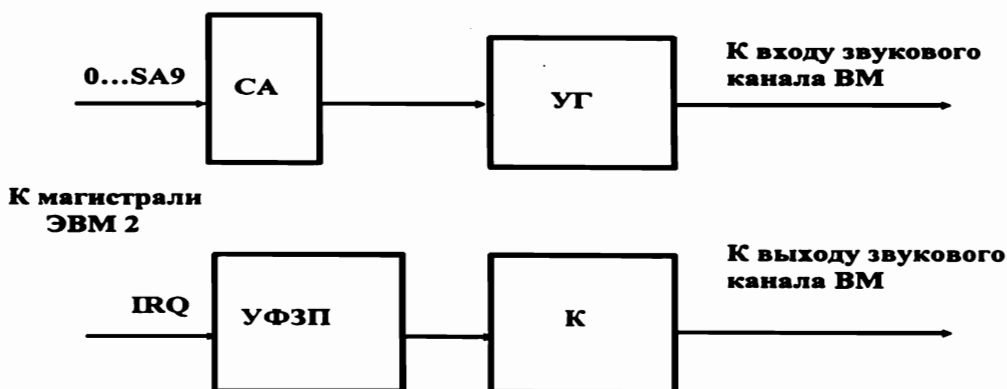


Рис. 3. Структурная схема устройства синхронизации: СА — селектор адреса; УГ — управляемый генератор; УФЗП — узел формирования запросов прерывания; К — компаратор.

Программы позволяют получать информацию как о целом кадре (512x512 точек), так и выбирать отдельные участки наблюдения. Программы снятия и обработки информации об интенсивности рефлекса выполнены в двух версиях: однооконной и линейной. В первом случае выбирается окно, соответствующее наиболее информативной части изображения (рефлекса). Во втором — выбирается сечение, вдоль которого располагаются окна наблюдения. Число окон (до 16) задается предварительно. В обоих режимах задаются размер площадок (до 50x50 точек), время наблюдения, в течение которого будет производиться считывание и усреднение величины интенсивности сигнала в выбранных участках и производится отображение на экране кривой зависимости интенсивности рефлекса от времени. В случае многооконного режима работы на экран выводится график, соответствующий измерениям в контрольном окне, устанавливаемом заранее.

После окончания выбранного времени исполнения программы или принудительной остановки

оператором информация сохраняется в памяти ЭВМ. Далее пользователь может вывести на экран временную зависимость для любого из окон и затем измерить с помощью специальных маркеров интервалы между произвольными моментами времени, программно произвести вычисление скорости роста и вывести на экран кривую распределения интенсивности по линии дифракционного рефлекса. Данные, полученные в линейном режиме работы, используются также для анализа профилей дифракционных изображений, путем измерения интенсивностей ДБЭО в квазилинейном варианте между двумя произвольно выбранными точками на интересующем участке дифракционного изображения в любой заданный момент времени. Имеется возможность сохранения информации о динамике изменения интенсивности сигнала во всех окнах с целью дальнейшей обработки. Запись производится на диск в совместимом с исходными данными стандартных программ-графопостроителей формате текстового файла. При необходимости пользователь может впослед-

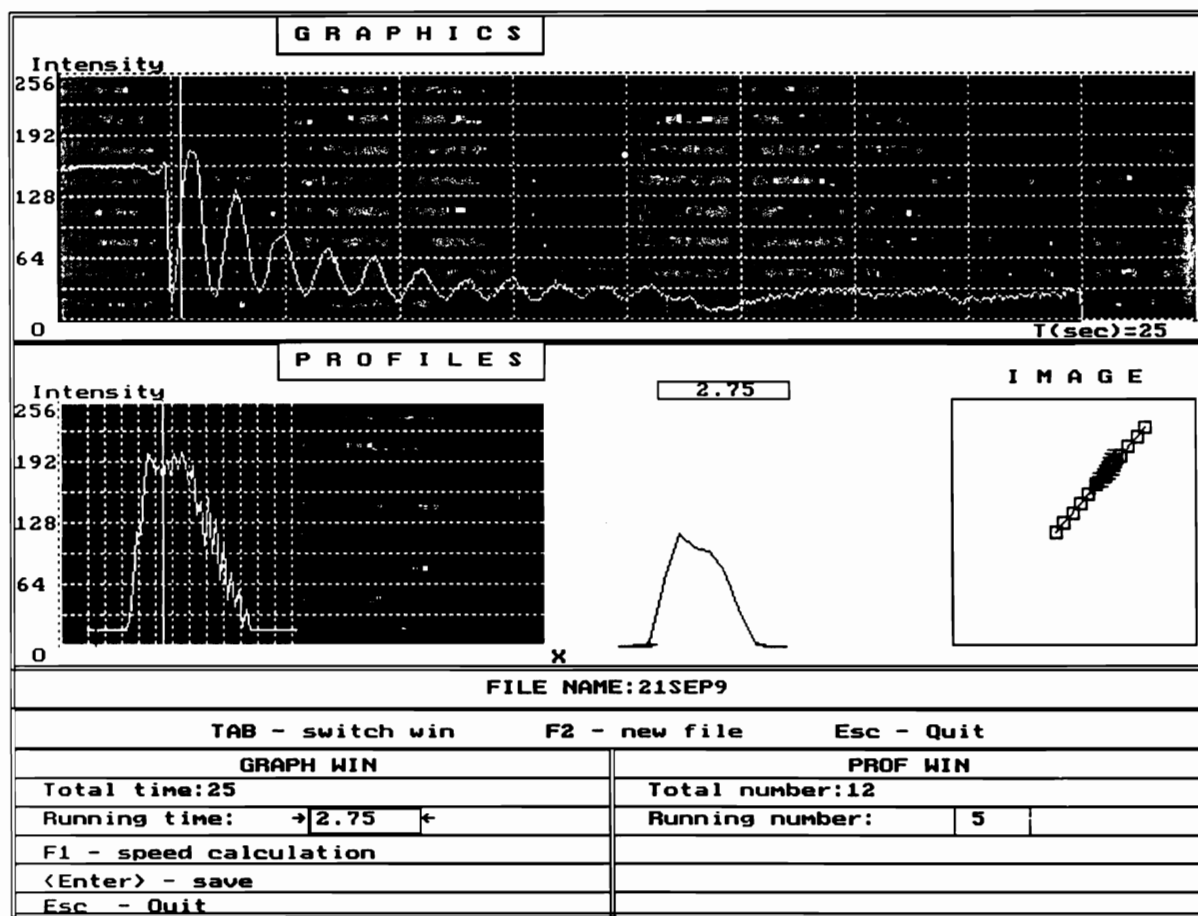


Рис. 4. Вид изображения на мониторе ПЭВМ при работе программы в линейном режиме.

ствии анализировать ранее записанную в файл информацию с помощью программ вторичной обработки, также выполненных в двух версиях. Возможный вид изображения (в негативе) на мониторе ПЭВМ при работе программы в линейном режиме приведен на рис. 4. Более подробно основные принципы и алгоритмы построения программ были описаны ранее [5].

Для автоматизации процессов эпитаксиального роста была создана специальная система автоматизации управления заслонками молекулярных источников по предварительно заданным программам. Программы управления ростовым процессом позволяют в автоматическом режиме из ЭВМ 2 осуществлять заданную последовательность действий (записанную в виде текстового файла на специально разработанном языке, а потому многократно воспроизводимую), а также выдачу на устройство синхронизации записи/воспроизведения команд записи сигналов-маркеров, отмечающих начало ростовой программы. Программы построены таким образом, что имеется возможность многократного повторения вложенных циклов фрагментов процессов роста, что крайне необходимо при осуществлении роста методами субмонослойной молекулярно-пучковой и субмонослойной миграционно-стимулированной эпитаксии, а также при росте многослойных структур, состоящих из большого количества однотипных структур. В случае соединения прямой связью ЭВМ 1 и ЭВМ 2 по последовательным или параллельным портам возможен запуск программы роста из ЭВМ 1 синхронно с программой считывания и обработки картин ДБЭО. При использовании ранее записанной на ВМ информации возможен автоматический запуск программы эмуляции процесса роста в ЭВМ 2 по ранее записанной звуковой метке. Имеется возможность запуска программы считывания и обработки картин ДБЭО синхронно с запуском программ роста и эмуляции роста по сигналу из ЭВМ 2.

Все программы выполнены в двух языковых вариантах: русском и английском и снабжены удобным для пользователя меню со всеми необходимыми для работы пояснениями, имеется возможность управления от мыши и клавиатуры.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описан недорогой и эффективный комплекс для визуализации и компьютерной обработки оптических картин дифракции быстрых электронов на отражение. Описанный комплекс позволяет наблюдать и анализировать все основные особенности, присущие методу ДБЭО при МПЭ. Использование комплекса позволило обнаружить эффект периодического расщепления профилей дифрак-

ционных рефлексов при росте GaAs (100) [5], сдвиг во временных зависимостях кривых интенсивности дифракции в различных точках [6], появление наклоненных на  $45^\circ$  по отношению к основным дифракционных рефлексов [7], а также выявить, что в гетероэпитаксиальной системе InAs/Si возможна реализация как чисто островкового механизма роста (Вольмера-Вебера), так и смешанного механизма роста с образованием смачивающего слоя и системы трехмерных островков (Странски-Крастанова) [8]. Представленный комплекс может быть включен в замкнутую систему автоматизации ростовых процессов методом МПЭ, а также обеспечить выращивание воспроизводимых квантоворазмерных структур с точностью контроля толщины напыляемой пленки до дэлей монослоя по предварительно заданной программе на оснащенной методикой ДБЭО установке МПЭ любого типа.

Описанный комплекс может быть использован для контроля и обработки оптических изображений результатов экспериментов и технологических процессов без существенных изменений аппаратной части с незначительным изменением программного обеспечения. Разработанное УВВИ может быть использовано для ввода в ПЭВМ любого монохромного оптического изображения, при этом его стоимость ниже имеющихся аналогичных систем.

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 98-02-18317) и научной программы "Физика твердотельных наноструктур" (проект 98-2029).

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Herman M.A., Sitter H.* Molecular beam epitaxy. Fundamentals and current status. 1989. Berlin. Springer Verlag. 376 p.
2. *Senichkin A.P., Bugaev A.S., Molchmovsky R.A.* // Abstracts Inter. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology". 1993. St.Petersburg. Ioffe Institute. P.102-103.
3. *Neave J.N., Joyce B.A., Dobson P.J., Norton N.* // Appl.Phys.A. 1983. V.31. P.1-8
4. *Гурьянов Г.М., Демидов В.Н., Корнеева Н.П., Цырлин Г.Э.* // ПТЭ. 1996. №3. С.167.
5. *Гурьянов Г.М., Демидов В.Н., Корнеева Н.П., Петров В.Н., Самсоненко Ю.Б., Цырлин Г.Э.* // ЖТФ. 1997. Т.67, №8. С.111-116.
6. *Cirlin G.E., Korneeva N.P., Demidov V.N. et al.* // «Compound Semiconductors 1996», Inst. Phys. Conf. Ser. № 155. 1997. IOP Published Ltd. P.821-824.
7. *Цырлин Г.Э., Корнеева Н.П., Демидов В.Н., Поляков Н.К., Петров В.Н., Леденцов Н.Н.* //

- ФТП. 1997. Т.31, №10. С.1230–1233  
8. *A.F.Tsatsul'nikov, at al G.E.Cirlin, A.Yu.Egorov,  
at al. // Abstracts 24th International. Conference*

*on the Physics of Semiconductors. 1998.  
Jerusalem. Israel. 2–7 August 1998. Mo-P24.*

## **SYSTEM FOR VISUALIZATION AND COMPUTER ANALYSIS OF THE REFLECTION HIGH-ENERGY ELECTRON DIFFRACTION PATTERNS**

**V.N. Petrov, V.N. Demidov, N.P. Korneeva, N.K. Polyakov, G.E. Cirlin**

*Institute for Analytical Instrumentation RAS, St.Petersburg*

An efficient and fast system for visualization, input into the computer and analysis of reflection high-energy electron diffraction patterns is described. The block diagrams and technical characteristics of the system, together with the units for control of the growth of semiconductor structures during molecular beam epitaxy, are presented. The software designed for this system ensuring handling patterns of reflection high-energy electron diffraction, including real time representation and automation of processes of the epitaxial growth, is described.