

УДК 681.3:621.382-181.4.774.002.5

Особенности программного обеспечения системы автоматизации диагностического модуля установки молекулярно-пучковой эпитаксии. Домнич М.Б., Дуравина Л.Н., Песчанский В.А., Терентьева Е.А. // Научное приборостроение. Автоматизация научных исследований. Л.: Наука, 1988, с.36

Описываются состав, возможности и особенности программного обеспечения системы автоматизации диагностического модуля установки молекулярно-пучковой эпитаксии. Рассматриваются декомпозиция функций, выполняемых системой автоматизации, способы повышения ее быстродействия; расширение возможностей по настройке прибора и его контролю, программный метод повышения качества снимаемых спектров. Лит. - 2 назв., ил. - 2.

ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ
 ДИАГНОСТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ УСТАНОВКИ МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИИ

Централизованная модульная установка молекулярно-пучковой эпитаксии разработана в НТО АН СССР. Она обеспечивает выращивание полупроводниковых пленочных структур путем осаждения на подложку газовой фазы напыляемых веществ в условиях высокого вакуума, контролируемой температуры подложки и заданного состава газовой фазы; исследование полученных структур.

Рассматриваемая диалоговая система автоматизации (ДСА) осуществляет управление работой входящего в состав установки модуля для исследования угловых и энергетических распределений электронов на поверхности образцов, выращенных в ростовом модуле.

Программное обеспечение системы автоматизации реализовано на ЭВМ СМ-1300 (емкость оперативной памяти 32 К слов, накопитель на магнитных дисках - 4,8 Мбайт), работает в среде исполнительской операционной системы, построенной на основе версии 2.1 ОС РВ. Большая часть программ написана на Фортране, остальные - на Ассемблере и PLII. Взаимодействие ЭВМ с электронными блоками аппаратуры осуществляется с помощью интерфейса КАМАК.

ДСА обеспечивает проведение следующих экспериментов:

получение угловых зависимостей эмиссии вторичных электронов $N = f(\nu, \varphi)$ (N - интенсивность потока вторичных электронов, ν и φ - угловые координаты подвижного малогабаритного энергоанализатора (МЭА)) при постоянной энергии E настройки МЭА;

получение кривых энергетического распределения вторичных электронов $N = f(E)$ ($N = df(E)/dE$) при фиксированном положении МЭА.

Кроме того, ДСА выполняет такие вспомогательные функции, как подготовку к экспериментам; частичный контроль работы аппаратной части прибора и программного обеспечения; настройку прибора на эксперимент; получение статистических характеристик снимаемого сигнала; обработку, отображение и хранение в базе данных снятых зависимостей.

В состав программного обеспечения ДСА входят подсистемы диалога, подготовки к эксперименту, управления ходом эксперимента, обработки, иллюстративной графики, работы с оперативной базой данных. Структура ДСА приведена на рис.1.

Подсистема диалога предоставляет пользователю возможность управлять ходом выполнения экспериментов в режиме диалога с системой автоматизации, обеспечивает выдачу сообщений на видеотерминал и запускает все остальные подсистемы.

Подсистема подготовки к эксперименту позволяет выполнить подготовку образца и прибора, необходимую для проведения основных экспериментов (снятие спектра и угловой зависимости). Эта подсистема реализует:

нагрев и охлаждение образца исследуемого вещества до заданной температуры;

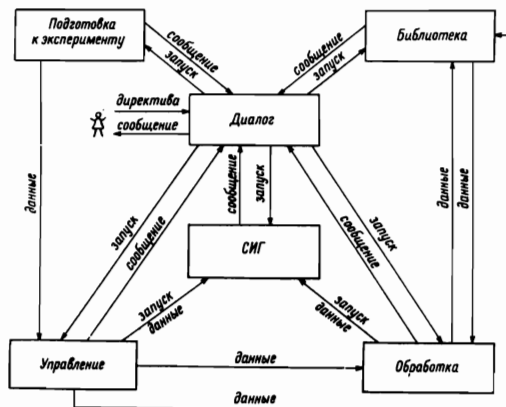


Рис.1. Структурная схема диалоговой системы автоматизации диагностического модуля

измерение угловых координат МЭА;
установку МЭА в положение с заданными угловыми координатами;
выбор конфигурации информационного канала, определяемой источником возбуждения (электронная пушка или источник рентгеновского излучения), режимом работы МЭА (абсолютного или относительного разрешения) и режимом регистрации интенсивности потока прошедших МЭА электронов (счет импульсов с выхода электронного умножителя или синхронное детектирование);
автокалибровку шкалы энергии настройки МЭА;
автонормировку – определение коэффициента нормировки значений интенсивностей потока вторичных электронов, составляющих спектр;
тестирование модулей крейтов КАМАК – выполнение одиночных команд или последовательностей команд, задаваемых с видеотерминала, с индикацией на терминале сигналов приема команды, готовности модуля, прочитанных данных;
подбор порога дискриминации широкополосного усилителя в канале счета импульсов с целью оптимизации отношения сигнал/шум;
установку значений параметров, необходимых для проведения эксперимента.
Подсистема управления ходом экспериментов "Снятие спектра" и "Снятие угловой зависимости" обеспечивает:
управление перемещением МЭА с учетом конфигурации зоны разрешенных положений;
установку напряжения на выходе высоковольтного усилителя, определяющего настройку МЭА на заданную энергию, и контроль значения установленного напряжения;
регистрацию интенсивности потока вторичных электронов при заданной конфигурации информационного канала;
устранение выбросов при снятии спектра;
запись в файл снятой зависимости;
запуск подсистемы иллюстративной графики;
координацию перечисленных действий в ходе эксперимента;
реализацию заданного числа повторений снятия спектра и накопление результатов;
сбор статистических данных об интенсивности потока вторичных электронов, регистрируемых при постоянной энергии настройки и фиксированном положении МЭА.
Подсистема обработки реализует операции дифференцирования, интегрирования, сглаживания, вычитания спектров, устранения трапецеидального фона и влияния аппаратной функции.

Подсистема иллюстративной графики осуществляет отображение результатов экспериментов на видеоконтрольном устройстве и планшетном самописце.

Подсистема работы с оперативной базой данных выполняет запись полученных зависимостей и дополнительной справочной информации о них в базу данных, считывание данных из базы для просмотра и обработки, получение различных справок об информации, хранящейся в базе данных.

Ниже будут описаны некоторые особенности программного обеспечения, относящегося к подсистемам подготовки к эксперименту и управления ходом эксперимента, разработанным авторами статьи.

К моменту начала разработки уже имелись системы автоматизации для различных аналитических приборов, состоящие из перечисленных выше подсистем [1, 2]. Рассматриваемое в статье программное обеспечение (ПО) позволяет получить по сравнению с существующими ряд преимуществ:

- повышение быстродействия системы автоматизации;
- расширение возможностей ДСА по настройке прибора и его контролю;
- повышение качества получаемой с прибора информации.

Описываемые особенности разработанного ПО и определили, на наш взгляд, эти преимущества.

Функциональная декомпозиция. При разработке программного обеспечения произведена декомпозиция основных функций, направленных на обеспечение проведения экспериментов, на подфункции (функциональные блоки) с учетом следующих соображений.

1. "Естественная" автономность функций, позволяющая описывать и использовать функции как нечто целое. Формальным признаком автономности функций на всех уровнях является объем обмена информацией (например, число передаваемых параметров) между функциональными блоками одного уровня декомпозиции. Он должен быть мал по сравнению с объемом информации, перерабатываемым внутри блока. Блоки верхнего уровня декомпозиции обычно оформлены в виде задач (здесь и далее под задачей понимается задача в смысле операционной системы).

2. Выделение повторяющихся, многократно используемых функций.

3. Реализация в виде задачи с перекрытиями. Это требование выражается в необходимости выравнивания объема программ и относящихся к ним данных, реализующих соответствующие ветви дерева перекрытий. Кроме того, реализация с перекрытиями приводит к необходимости введения дополнительных функциональных блоков для исключения неоднозначности ссылок при программной реализации.

Повышение быстродействия системы. Используемые аппаратные и системные средства накладывают жесткие ограничения на объем оперативной памяти, отводимой одной задаче (прикладной задаче отводится 12,5 К слов). Известны два способа реализации функций, требующих большего объема памяти, чем выделено одной задаче:

построение совокупности взаимодействующих задач;

построение задачи с перекрытиями.

При реализации ДСА был избран второй путь, так как он имеет преимущества с точки зрения быстродействия. Действительно, время установки и снятия одной задачи с перекрытиями значительно меньше, чем время установки и снятия совокупности задач. Кроме того, при передаче управления от одной задачи к другой необходимо выгрузить на диск вызывающую задачу и загрузить в оперативную память вызываемую задачу, что требует значительного времени. В случае задачи с перекрытиями выгрузки не происходит вообще, загружается лишь сегмент дерева перекрытий, а не вся задача.

За счет построения задач с перекрытиями время реализации подготовительной стадии таких функций, как снятие спектра или снятие угловой зависимости, удалось уменьшить на 2-3 с.

Обмен данными. Значения всех параметров, используемых в системе, хранятся в общей разделяемой области. Передача значений параметров из программы в программу осуществляется, как правило, через общие области. При использовании общих областей соблюдается правило единственного назначения: никакое слово области не используется для хранения значений различных параметров. Обмен данными через общие области способствует повышению быстродействия ПО.

Результаты экспериментов записываются в файлы прямого доступа с фиксированной длиной записи.

Повышение качества получаемой с прибора информации

При снятии спектра наблюдаются относительно редкие, но резкие отклонения измеряемой интенсивности от ожидаемой - так называемые случайные выбросы. Как пра-

вило, измеряемая интенсивность представляет собой сумму сигнала и помехи малой амплитуды. Для улучшения качества снимаемого спектра – устранения выбросов и уменьшения влияния помехи малой амплитуды – используется предположение об ограниченности абсолютного значения производной от интенсивности по энергии, т.е. о том, что значения интенсивности, снятые при одинаковых или близких значениях энергии, близки между собой. Значительная разница интенсивностей в соседних по энергии точках возникает в двух случаях: при снятии пика (на его склонах); при случайных выбросах.

Эти две ситуации различаются тем, что при снятии пика повторные измерения интенсивности на соседних энергиях также дают большую разницу, а при случайных выбросах разность интенсивностей становится незначительной.

Для улучшения качества снимаемого спектра производится неоднократное снятие интенсивности при каждой энергии настройки МЭА. Если все значения интенсивности, снятые при одной и той же энергии, различаются незначительно, то в качестве окончательного значения интенсивности выбирается среднее арифметическое этих значений. Если хотя бы одно из снятых значений сильно отличается от остальных, в качестве окончательного значения интенсивности выбирается медиана – значение, для которого существуют одинаковые количества снятых значений, меньших и больших выбранного.

При реализации алгоритма измерения количество повторных снятий минимизируется с тем, чтобы существенно не увеличивать общее время эксперимента.

Для формального описания алгоритма введем следующие обозначения: $N(E)$ – значение интенсивности для энергии E , признанное верным; $N(E, i)$ – значение интенсивности, снятое в i -й раз для энергии E ; ΔE – шаг по энергии; ΔN – допустимое относительное отклонение интенсивности в случае измерения при одной и той же энергии.

Считаем, что если нет выброса, то:

$$|(N(E, i) - N(E, j)) / N(E, i)| \leq \Delta N,$$

и, кроме того, если не снимается пик:

$$|(N(E) - N(E + \Delta E)) / N(E)| \leq \Delta N(1 + k\Delta E).$$

В последнем неравенстве коэффициент k позволяет учесть рост отклонения при увеличении шага по энергии. Значение ΔN устанавливается экспериментально, значение коэффициента k принято равным 1.

Алгоритм устранения выбросов реализован следующим образом. Если для $N(E, 1)$ выполняется условие:

$$|(N(E, 1) - N(E - \Delta E)) / N(E, 1)| \leq \Delta N(1 + \Delta E), \tag{1}$$

то окончательным значением $N(E)$ считается:

$$N(E) = (N(E, 1) + N(E - \Delta E)) / 2.$$

Если условие (1) не выполняется, то для значения E измерение производится повторно. Если для вновь полученного значения $N(E, 2)$ выполняются условия:

$$|(N(E, 2) - N(E - \Delta E)) / N(E, 2)| \leq \Delta N(1 + \Delta E),$$

$$|(N(E, 2) - N(E, 1)) / N(E, 2)| \leq \Delta N,$$

(2)

то окончательным значением $N(E)$ считается:

$$N(E) = (N(E, 2) + N(E, 1) + N(E - \Delta E)) / 3.$$

Если условия (2) не выполняются, то считается, что одно из измеренных значений является выбросом. В качестве окончательного значения интенсивности $M(E)$ выбирается среднее по величине из трех имеющихся значений: $N(E - \Delta E)$, $N(E, 1)$, $N(E, 2)$.

Помимо устранения выбросов примером улучшения с помощью программных средств качества информации, снимаемой с прибора, является проведение автокалибровки в канале счета импульсов. Автокалибровка осуществляет корректировку коэффициентов, связывающих энергию настройки МЭА с напряжением на выходе высоковольтного усилителя, определяющим эту энергию. Корректировка осуществляется по реперным пикам, для них точно известны значения энергии, на которых достигается максимальная интенсивность. С точки зрения аппаратуры наиболее сложно выполнить точную фиксацию напряжения на выходе высоковольтного усилителя, при котором достигается максимум интенсивности. Сложность состоит в обнаружении максимума сигнала на фоне помех. Для сглаживания спектра при поиске положения репера находится полоса из следующих подряд $(2l-1)$ точек с максимальной суммой интенсивностей. Считается, что глобальный максимум интенсивности в диапазоне автокалибровки совпадает с максимумом в найденной полосе.

Контроль работы и настройка прибора. ДСА предусматривает автоматическую диагностику (с выводом сообщений оператору) следующих ошибок: ошибки ввода запрашиваемых параметров; наличие и допустимость значений параметров, используемых в экспериментах; ошибки работы с файлами; ошибки выполнения команд модулями КАМАК; ошибка в установке температуры образца (по величине аналогового сигнала, подаваемого на высокоточный регулятор температуры); ошибка настройки МЭА на заданную энергию (по величине напряжения на выходе высоковольтного усилителя, определяющего настройку); отсутствие перемещения МЭА после запуска одного из его двигателей; ошибочное направление перемещения МЭА; точность установки МЭА при его перемещениях.

В системе принята единая методика обработки ошибок. Первоначальная обработка ошибок осуществляется в тех программах, где они обнаружены. Обработка заключается в выработке номера сообщения об ошибке и формировании переменной части сообщения. Неизменные части текстов сообщений находятся в специальном файле. Вывод сообщения всегда осуществляется в головной программе. В случае ошибки задача аварийно заканчивается. Для привлечения внимания оператора сообщения об ошибках имеют специальный графический признак.

При создании ПО обращалось внимание на то, чтобы задачи помимо своего прямого назначения – управления проведением эксперимента – являлись эффективным средством отладки совместной работы прибора, модулей КАМАК и программного обеспечения. Ниже приведены примеры использования задач для комплексной отладки.

1. "Измерение угловых координат МЭА" использовалось для исследования статической погрешности основного измерительного прибора для аналоговых сигналов – многоканального АЦП.

2. "Снятие спектра" использовалось для контроля линейности характеристики многоканального АЦП.

3. "Установка МЭА в положение с заданными угловыми координатами" применялась для определения зоны разрешенных положений МЭА.

Кроме того, в состав ПО включен ряд задач, специально предназначенных для

контроля работоспособности аппаратуры и настройки прибора.

1. Задача тестирования модулей крейтов КАМАК. Она позволяет без выхода из диалога задавать и выполнять одиночные команды КАМАК, производить сброс и пуск крейтов КАМАК, вводить, редактировать и выполнять последовательности КАМАК-команд, контролировать ход выполнения команд по значениям сигналов приема команды и готовности модуля, а в случае команд чтения – по значениям прочитанных данных.

2. Задача определения статистических характеристик интенсивности потока вторичных электронов. Некоторые из этих характеристик: математическое ожидание интенсивности и математическое ожидание модуля амплитуды шума, используются для вычисления отношения сигнал/шум.

Пусть $M(E)$ – математическое ожидание интенсивности суммы сигнала и фона при энергии настройки E ; $F(E)$ – математическое ожидание величины фона при той же энергии настройки E ; $N(E, i)$ – интенсивность суммы зашумленного сигнала и фона при i -м измерении; $SM(E) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K |N(E, i) - M(E)|$ – математическое ожидание модуля амплитуды шума. Тогда отношение S сигнал/шум имеет вид: $s = (M(E) - F(E)) / SM(E)$.

3. Задача определения порога дискриминации широкополосного усилителя. Зависимость числа импульсов N в канале счета импульсов на выходе вторичного электронного умножителя от амплитуды (A) имеет вид, показанный на рис.2, а. Для получения оптимального отношения сигнал/шум необходимо "считать" только импульсы с амплитудой, большей A_n . По величине A_n определяется порог дискриминации широкополосного усилителя. Для нахождения значения порога P_{opt} , соответствующего амплитуде A_n , снимается характеристика вида $N=f(P)$ в канале счета импульсов при постоянном значении энергии E настройки МЭА и времени регистрации сигнала, причем энергия E выбирается в области, в которой нет пиков (например, $800 \text{ эВ} \leq E \leq 900 \text{ эВ}$). Зависимость $N=f(P)$ имеет вид, представленный на рис.2, б. Она является интегральной по отношению к кривой, приведенной на рис.2, а. После дифференцирования $N=f(P)$ получается зависимость $Nt=df(P)/dP$ вида, представленного на рис.2, в, по которой исследователь может выбрать значение порога дискриминации P_{opt} , соответствующего амплитуде A_n . Описанная система прошла проверку в ходе

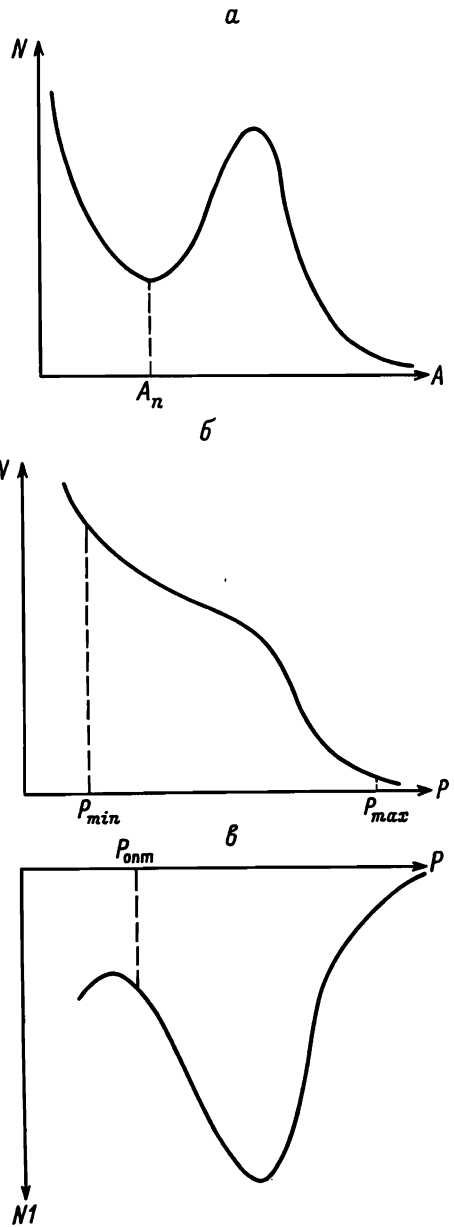


Рис.2. Зависимость числа импульсов от амплитуды

исследования. Описанная система прошла проверку в ходе

комплексной отладки модуля для исследования угловых и энергетических распределений электронов. Проверка показала эффективность разработанного программного обеспечения. Методика повышения качества ПО, примененная в описываемой разработке, может быть использована при создании систем автоматизации электронных спектрометров различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дерцакян И.А., Зданович В.В., Зыков А.И.//Вопросы атомной науки и техники. 1986, вып.1 (32). С.99-102. (Сер.Радиационная техника).
2. Павлюк О.В., Россиков В.В.//IУ Всес.конф."Диалог человек-ЭВМ". Киев, 1985. Ч.2. С.112-113.