

УДК 681.3.06-621.384.8

Система автоматизации квадрупольного масс-спектрометра в модуле роста пленок установки молекулярно-пучковой эпитаксии. Межин Н.Н., Варт А.К., Клейман В.Б., Шишкина С.А. // Научное приборостроение. Методы и приборы биотехнологии. Л.: Наука, 1988, с.87.

Рассматриваются методики, алгоритмы и принципы построения программного обеспечения системы автоматизации квадрупольного масс-спектрометра, входящего в состав модуля роста пленок установки молекулярно-пучковой эпитаксии. Лит. - 5 назв.,

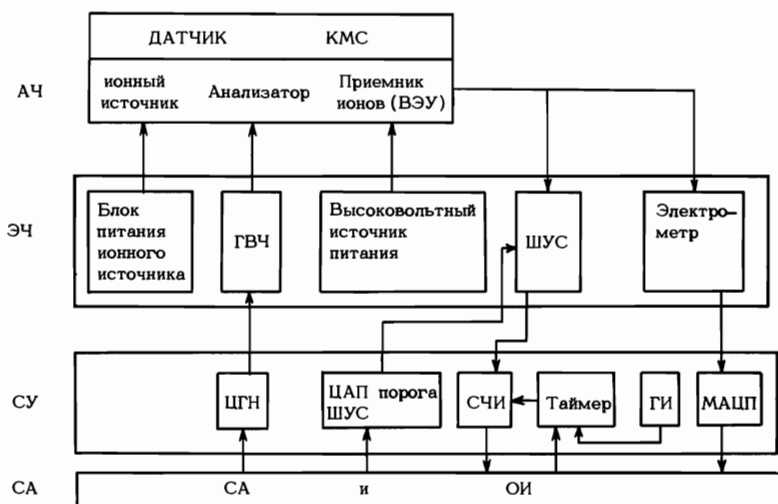
**СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ КВАДРУПОЛЬНОГО МАСС-СПЕКТРОМЕТРА  
В МОДУЛЕ РОСТА ПЛЕНОК УСТАНОВКИ МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИИ**

Установка молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) предназначена для выращивания в контролируемых условиях и исследования многослойных полупроводниковых пленочных структур. Одним из основных элементов установки МПЭ является модуль роста пленок, в котором реализуется процесс выращивания структур.

Структура и состав аналитической части (АЧ), системы управления (СУ) и системы автоматизации (СА) модуля, а также задачи, решаемые СА, описаны в работах [1, 2] .

**I. Основные структурные компоненты  
и назначение квадрупольного  
масс-спектрометра**

Квадрупольный масс-спектрометр (КМС) является измерительным элементом, обеспечивающим решение задач управления и контроля функционирования модуля роста пленок в различных режимах. Укрупненная структурная схема КМС и его СУ приведена на рис.1 и содержит



**Рис.1. Укрупненная структурная схема МС7303 и системы управления**

1) АЧ – датчик КМС, состоящий из ионного источника, анализатора и приемника ионов (вторичного электронного умножителя – ВЭУ);

2) электронную часть (ЭЧ) – блок питания ионного источника, генератор высокой частоты (ГВЧ) и высоковольтный источник, обеспечивающие работу и настройку датчика КМС, а также широкополосный усилитель (ШУС) и электрометр, формирующие выходной сигнал ЭЧ из сигнала, получаемого с ВЭУ в счетном или аналоговом режимах измерений соответственно;

3) СУ – аппаратный интерфейс между ЭЧ и управляющей ЭМ, выполненный в стандарте КАМАК и включающий в себя следующие модули:

цифровой генератор напряжения (ЦГН), обеспечивающий преобразование цифрового кода в напряжение управления ГВЧ (управление разверткой по массовым числам) [3] ,

многоканальный аналого-цифровой преобразователь (МАЦП), предназначенный для преобразования выходного сигнала электрометра в цифровую форму (аналоговый режим измерений),

цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), обеспечивающий установку значения порога ШУС,

счетчик импульсов (СЧИ), предназначенный для подсчета числа импульсов, поступающих с выхода ШУС, при работе с КМС в режиме счета импульсов,

таймер, формирующий длительность интервала измерений в режиме счета импульсов,

генератор импульсов (ГИ), предназначенный для выработки непрерывной последовательности импульсов, обеспечивающих работу таймера;

4) систему автоматизации и обработки информации (СА и ОИ), реализованную в виде программного обеспечения (ПО) на ЭМ типа СМ-1300 и предназначенную для автоматизации процессов управления КМС и обработки поступающей с него информации.

В процессе работы СА модуля решает с помощью КМС следующие задачи.

1. На этапе подготовки модуля к работе СА обеспечивает регистрацию в различных режимах и динамическое отображение на экране цветного видео-контрольного устройства (ВКУ) обзорных спектров остаточных газов в камере роста пленок и запись их в базу данных (БД). Предусмотрена обработка спектров из БД в режиме статического отображения, позволяющая выполнять многофункциональный количественный и качественный их анализ с целью оценки готовности модуля к росту структур.

2. На этапах контроля функционирования модуля и управления процессом роста СА обеспечивает регистрацию изменения интенсивностей пиков на заданных массовых числах с отображением информации на экране ВКУ и записью их в БД.

Кроме того, в СА предусмотрена возможность калибровки КМС, необходимой для управления им в процессе работы.

## 2. П р и н ц и п ы   в з а и м о д е й с т в и я   С А   и   К М С

Из всего ионного потока, образующегося в ионном источнике, через анализатор КМС на вход приемника ионов попадают лишь ионы, имеющие определенное значение  $m/e$ , где  $m$  – масса иона, выраженная в атомных единицах массы,  $e$  – заряд иона в единицах элементарного заряда [3]. Далее  $m/e$  будем обозначать  $M$  и называть массовым числом.

Настройка анализатора КМС на определенную величину  $M$  производится подачей на вход ГВЧ с выхода ЦГН управляющего напряжения, для чего на вход ЦГН подается формируемое в СА соответствующее значение кода. Существует функциональная зависимость между величиной кода управляющего напряжения  $U$  и значением  $M$  вида

[4, 5] :

$$U = A \cdot M + B + C(\sqrt{M/A} + M), \quad (1)$$

где коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  являются индивидуальными характеристиками конкретного прибора и ЦГН. Кроме того, значения  $A$ ,  $B$  и  $C$  могут изменяться со временем.

Отсюда ясно, что первоочередной задачей, возникающей при работе с КМС, является задача калибровки, т.е. вычисления и уточнения коэффициентов А, В и С, в дальнейшем называемых калибровочными коэффициентами. Выражение (1) будем называть калибровочной зависимостью. Решение задачи калибровки, принятое в СА, будет изложено ниже.

Другими входными параметрами СУ КМС являются подаваемый на ЦАП код порога ШУС, а также подаваемая на таймер величина интервала времени счета в единицах периода следования импульсов, формируемых с помощью ГИ. Величина интервала служит для управления СЧИ.

Сигнал, получаемый с датчика КМС, связанный с числом ионов, попавших на вход ВЭУ, будем называть интенсивностью, соответствующей заданному значению  $m/e$ . Интенсивность может быть измерена двумя способами.

Во-первых, это может быть величина прямо пропорциональная значению ионного тока, возникающего в приемнике ионов КМС. Такая величина является аналоговым сигналом и преобразуется в цифровой код с помощью МАЦП. В случае использования в качестве выхода КМС этой величины мы будем говорить об аналоговом канале измерений.

Во-вторых, интенсивность может формироваться непосредственно как число ионов, попавших в приемник ионов КМС в течение заданного интервала времени. Эта величина может регистрироваться с помощью ШУС цифровым счетчиком импульсов и является цифровым сигналом. В этом случае канал измерений называется счетным.

В разработанной СА имеется возможность использовать как аналоговый, так и счетный канал измерений.

### 3. К а л и б р о в к а К М С

#### Метод наименьших квадратов и особенности его применения для решения задачи калибровки

Для получения оценок значений калибровочных коэффициентов А, В и С из выражения (1) воспользуемся известным методом наименьших квадратов. Используемая модификация метода состоит в следующем.

Пусть дано

$$y_i = x_i^T \theta + \sigma_i, \quad i = 1, \dots, K, \quad (2)$$

где  $y_i \in R$  - известная величина измерения;  $x_i \in R^n$  - известный вектор воздействия,  $\theta \in R^n$  - неизвестный вектор параметров,  $\sigma_i$  - неизвестная величина, гауссов дискретный белый шум.

Требуется построить такой вектор оценок  $\hat{\theta}$ , чтобы дисперсионная матрица ошибки вида  $(\theta - \hat{\theta})(\theta - \hat{\theta})^T$  была бы минимальной.

Эта задача имеет решение вида

$$\hat{\theta}_k = Q_k^{-1} P_k, \quad (3)$$

где  $\hat{\theta}_k$  - оценка  $\theta$ , полученная по  $k$  измерениям,

$$\left. \begin{aligned} Q_k &= \sum_{i=1}^k x_i x_i^T, & Q_k &\in R^n \times R^n \\ P_k &= \sum_{i=1}^k x_i y_i, & P_k &\in R^n \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Матрица  $Q_k$  и вектор  $P_k$  могут пересчитываться по поступлению очередного,  $k+1$ -го измерения

$$\left. \begin{aligned} Q_{k+1} &= Q_k + x_k x_k^T \\ P_{k+1} &= P_k + x_k y_k \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Выражение (1) не позволяет воспользоваться изложенным методом, так как не допускает линейного представления вида (2).

Рассмотрим упрощенный вид калибровочной зависимости

$$U' = A \times M + B + C/M. \quad (6)$$

В отличие от (1) здесь имеет место представление

$$U' = x^T \theta,$$

где

$$x = \begin{Bmatrix} M \\ I \\ I/M \end{Bmatrix}, \quad \theta = \begin{Bmatrix} A \\ B \\ C \end{Bmatrix}.$$

Имеем

$$E = U - U' = \frac{-C\sqrt{|C/A|}}{(\sqrt{|C/A|} + M) \times M}, \quad (7)$$

где  $E$  — ошибка, вызванная изменением калибровочной зависимости, причем  $E \rightarrow 0$  при  $M \rightarrow \infty$ . Заметим также, что  $|E|$  монотонно убывает при  $M > 0$ .

Оценим величину ошибки настройки анализатора КМС на заданное массовое число при использовании упрощенной калибровочной зависимости (6). Будем считать, что значения  $M$  — целые и  $M \geq 1$ . Положим значения калибровочных коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $C$  равными соответственно 110, 40 и  $-40$ . Решив уравнение (1) относительно  $M$  при заданном  $U$ , получим:

$$M(U) = \frac{U - A\sqrt{\frac{C}{A}} - B + \sqrt{U^2 + U \cdot (2A\sqrt{\frac{C}{A}} - 2B) - 4A(B\sqrt{\frac{C}{A}} + C) + (A\sqrt{\frac{C}{A}} + B)^2}}{2A} \cdot 8.$$

Для оценки ошибки рассмотрим измерение разности  $M(U) - M(U')$ , где  $U'$  — получено с использованием (6). Результаты численного эксперимента приведены в таблице.

Для задач, решаемых СА модуля роста пленок с помощью КМС, считается достаточной точность калибровки 0,2 единицы  $M$ . Из таблицы видно, что калибровка КМС с использованием упрощенной калибровочной зависимости (6) удовлетворительна при всех значениях  $M$ , имеющих физический смысл.

Итак, для оценки калибровочных коэффициентов воспользуемся методом (2)–(5), исходя из формулы (6). Такая оценка уже не будет оптимальной в смысле минимума дисперсионной матрицы ошибок, так

Таблица

$M$	$M(U')$	$M - M(U')$
1	0,88	0,12
2	1,96	0,04
4	3,988	0,012
12	11,998	0,002

как величина  $\sigma_i$ , помимо близкой к белому шуму компоненты, определяющей ошибку измерений, будет содержать добавку, связанную с упрощением калибровочной зависимости, такую, что математическое ожидание  $M\{\sigma_i\} = \varepsilon$ . Однако, так как  $\varepsilon \xrightarrow{M \rightarrow \infty} 0$ , при увеличении числа различных значений  $M$ , используемых для калибровки, оценка, полученная по упрощенной модели, будет приближаться к оптимальной.

Заметим, что зависимость (6) мы используем только при оценивании калибровочных коэффициентов, а для управления КМС применяем полную калибровочную зависимость (1). Как показали эксперименты, такой путь позволяет еще точнее отработать реальную калибровочную зависимость.

### Алгоритмы решения задачи калибровки

Рассмотрим реализацию решения задачи калибровки КМС. Методика решения требует задания не менее трех различных пар соответствующих значений  $M$  и  $U$ . Можно формировать такие пары двумя различными способами.

Во-первых, на КМС имеется цифровой индикатор значения  $M$ , соответствующего заданному значению  $U$ . Однако, так как показания цифрового индикатора могут существенно отличаться от истинного значения  $M$ , данный способ позволяет получить только приблизительные оценки калибровочных коэффициентов. В СА КМС этот способ называется "начальная калибровка по индикатору КМС".

Второй способ связан с установкой соответствия между величиной массового числа  $M$  и кодом управляющего напряжения  $U$  непосредственно по спектру остаточных газов в камере модуля роста пленок, т.е. по зависимости интенсивности от кода  $U$ . Вещества, входящие в газовый состав, на спектре образуют отдельные пики интенсивности, для каждого из которых "среднее" значение кода управляющего напряжения приблизительно соответствует определенному целому значению  $M$ . Способ определения этого "среднего" может быть различным в зависимости от метода калибровки.

1. Оператор визуально определяет "середины" пика, соответствующего известному целому значению  $M$ . Значение  $U$  определяется автоматически. Предполагается, что оператор имеет исходную информацию о составе газовой среды в камере модуля роста. Описанный способ калибровки также не позволяет получить наиболее точные значения калибровочных коэффициентов, но он предпочтительнее первого, так как использует непосредственно измеренные значения интенсивности. В СА этот способ называется "начальная калибровка по спектру".

2. Наиболее точным способом калибровки, реализованным в СА, является автокалибровка [4]. Этот способ отличается от начальной калибровки по спектру тем, что "середины" пика определяются автоматически.

Алгоритм автокалибровки заключается в следующем. Оператор задает список целых значений массовых чисел  $M$ , содержащий не менее трех различных значений. Предполагается, что этим значениям  $M$  в спектре соответствуют пики. Таким образом, для проведения автокалибровки необходима исходная информация о наличии пиков в спектре, а также должны быть известны исходные значения калибровочных коэффициентов (полученные, например, путем начальной калибровки), обеспечивающие ошибку настройки анализатора КМС на каждое из заданных значений  $M$  менее, чем 0,5 единицы  $M$ . В окрестности значения  $U$ , соответствующего заданному  $M$  и вычисленному по исходным калибровочным коэффициентам, снимается зависимость интенсивности от  $U$ . Радиус окрестности выбирается приблизительно равным 0,5 единицы  $M$ . Далее по выбранному критерию определяется значение  $U$ , соответствующее "середине" снятого пика. Эти значения  $U$  и  $M$  образуют требуемую пару для ме-

тогда калибровки. По требованию оператора используется один из двух критериев определения "середины" пика:

по центру тяжести вершины пика;

по положению вершины аппроксимирующей параболы, построенной по методу наименьших квадратов.

В процессах начальной калибровки по спектру и автокалибровки для отображения графической информации используется ВКВ. Это позволяет оператору управлять процессом начальной калибровки и контролировать процесс автокалибровки.

Описанная в настоящем разделе методика реализуется в СА подсистемой калибровки КМС.

#### 4. С н я т и е с п е к т р о в

##### Методика снятия спектра

Снятие одной точки спектра производится путем настройки анализатора КМС на заданное значение массового числа подачей по каналу управления разверткой КМС кода управляющего напряжения  $U$ , вычисленного с помощью калибровочной зависимости ( $I$ ), и снятия по аналоговому или счетному каналам измерений значения интенсивности.

Снятие одного значения интенсивности по аналоговому каналу измерений выполняется следующим образом. Шесть раз считывается величина цифрового кода с выхода МАЦП. Из шести полученных значений наибольшее и наименьшее отбрасываются и результирующее значение интенсивности получается как среднее арифметическое оставшихся четырех значений кода МАЦП.

Снятие одного значения интенсивности по счетному каналу измерений сопряжено с трудностями, связанными с неодинаковой разрядностью СЧИ (24 разряда) и форматом представления целой переменной в ЭВМ (16 разрядов). С целью приведения 24-разрядного числа  $X$  к 16-разрядному  $Y$  производится преобразование значения интенсивности, снимаемого с СЧИ, вида:

$$Y = \log_a (X+1), \text{ где } a = 2^{24/32767}.$$

Обратное преобразование вида  $X = a^Y - 1$  дает относительную погрешность не более 0,025%. Значение интенсивности в счетном канале измерений снимается без статистической обработки.

Снятие спектра в диапазоне значений массовых чисел от  $M_1$  до  $M_2$ , где  $M_1 < M_2$ , производится путем установки кода управляющего напряжения  $U_i = U(M_i)$ , определяемого выражением ( $I$ ), и снятия точек спектра, начиная с  $U_1$ , с постоянным шагом  $\Delta U$  до значения кода управляющего напряжения, ближайшего к  $U_2 = U(M_2)$ . При этом возможно снятие спектра с заданным числом усреднений в точке, т.е. процедура снятия одной точки повторяется заданное число раз подряд и снятым значением интенсивности считается среднее арифметическое, а также с заданным числом усреднений по диапазону, т.е. процедура снятия спектра от  $M_1$  до  $M_2$  повторяется заданное число раз и по соответствующим значениям интенсивности в каждой точке вычисляется среднее арифметическое.

Важной задачей при работе в аналоговом канале измерений является установка шкалы МАЦП, т.е. автоматический выбор коэффициента усиления МАЦП, равного  $2^n$ , где  $n \in \{0, 1, 2, 3\}$ . Для этого осуществляется пробный проход по заданному диапазону снятия при  $n=0$  с целью получения максимального значения интенсивности.

ти и устанавливается максимальное усиление, при котором это значение интенсивности остается меньшим  $\frac{32767}{1,3}$ . Константа 1,3 определяет запас увеличения полученного максимального значения интенсивности при снятии спектра. При записи в БД значения интенсивности снятой точки спектра коэффициент усиления МАЦП учитывается путем приведения к шкале, соответствующей  $n=0$ .

Максимальное значение интенсивности, полученное на пробном проходе диапазона снятия, используется для нормировки графика спектра при отображении спектра во время снятия.

С целью нормировки пробный проход по диапазону снятия производится и при работе в счетном канале измерений.

### Способы алгоритмической реализации снятия обзорных спектров СА

Снятие обзорного спектра в диапазоне целых массовых чисел от  $M_{01}$  до  $M_{02}$  ( $M_{01} \leq M_{02}$ ) означает снятие в пределах от  $M_1=M_{01} - 0,5$  до  $M_2=M_{02} + 0,5$ .

Снятие обзорных спектров реализовано в двух основных режимах.

В первом режиме производится снятие и синхронное отображение спектра в режиме циклически повторяющейся развертки в диапазоне заданных массовых чисел от  $M_1$  до  $M_2$ . Оператор задает число усреднений в точке, а также все необходимые параметры счетного канала измерений в случае его использования. Предварительно автоматически выполняется пробный проход по диапазону с целью нормировки отображаемого спектра и, в случае работы с аналоговым каналом измерений, установка шкалы МАЦП. Шаг изменения кода управляющего напряжения  $U$  рассчитывается автоматически, чтобы число снимаемых точек спектра было ограничено максимальным числом отображаемых точек (400), по формуле

$$\Delta U = (U_2(M_2) - U_1(M_1)) / 399, \text{ причем } \Delta U - \text{целое и } \Delta U \geq 1.$$

В процессе снятия спектра в этом режиме оператор имеет возможность выполнять следующие функции:

изменять число усреднений в точке спектра;

изменять масштаб по оси ординат (интенсивностей) в задаваемое число раз;

повторно выполнять нормировку (и установку шкалы МАЦП при работе с аналоговым каналом);

изменять код порога ШУС, а также величину интервала измерений (при работе со счетным каналом).

Снятие обзорного спектра в таком режиме дает оператору широкие возможности по оперативному качественному анализу газовой среды в камере ростового модуля, регулировке параметров ЭЧ КМС, настройке параметров измерительных каналов для последующей работы с КМС.

Второй режим снятия обзорных спектров не позволяет изменять параметры каналов измерения в процессе снятия. Снятие и синхронное отображение на экране ВКУ спектра в заданном оператором диапазоне массовых чисел производится порциями, каждая из которых включает в себя не более десяти целых значений  $M$ . Снимаемые значения интенсивности могут по требованию оператора записываться в БД. В этом случае в БД формируется также справочная информация о снятом спектре. Перед началом снятия спектра оператор указывает:

число усреднений в точке;

число усреднений по диапазону (только при записи спектра в БД);

тип нормировки – по всему диапазону или в пределах снимаемой порции (при работе с аналоговым каналом одновременно с нормировкой устанавливается шкала МАЦП);



шаг изменения кода ЦГН;

параметры счетного канала измерений (в случае его использования).

Описанная в настоящем разделе методика реализуется в СА подсистемой снятия и динамического отображения спектров.

## 5. Статическое отображение спектров

Задачей статического отображения является вывод на экран ВКУ спектров, записанных в БД. Возможно одновременное отображение двух спектров для их визуального сравнения. В процессе отображения спектры разбиваются на страницы, целиком помещающиеся на экран. Размер страницы и начальное значение массового числа  $M$  определяются оператором. В пределах страницы возможно выполнение следующих основных операций:

сглаживание спектра по 15 точкам;

получение интенсивности в точке спектра;

получение интенсивности пика по трем критериям (абсолютному максимуму, центру тяжести и параболической аппроксимации);

растяжение и сжатие спектра по вертикали;

получение нормализованного спектра;

получение разрешающей способности КМС.

Переход к следующей странице (вперед или назад) выполняется по команде оператора.

Описанная в настоящем разделе методика реализуется в СА подсистемой статического отображения спектров.

## 6. Фоновая регистрация интенсивности заданных пиков

Режим фоновой регистрации интенсивности заданных пиков предназначен для периодической регистрации с записью в БД значений интенсивности пиков, соответствующих заданному оператором списку массовых чисел [4, 5]. Производится снятие и отображение на экран ВКУ пиков на заданных значениях  $M$  и вычисление их интенсивности как среднего арифметического трех соседних снятых значений интенсивности в центре тяжести пика. На экране ВКУ также отображаются получаемые зависимости интенсивности пиков от времени. Начальное положение середины диапазона снятия пика вычисляется по результатам последней калибровки, далее это положение определяется по центру тяжести пика, снятого при предыдущей регистрации.

Оператор имеет возможность вывести на устройство печати таблицу значений интенсивности в отредактированном формате. Фоновая регистрация пиков может выполняться параллельно с некоторыми другими работами, выполняемыми СА ростового модуля.

Описанная в настоящем разделе методика реализуется в СА подсистемой фоновой регистрации интенсивности пиков.

## 7. Программная реализация алгоритмов работы с КМС

Структура БД

БД СА и ОИ КМС сформирована на основе стандартной файловой системы ОС РВ

и включает в себя файлы, содержащие следующие структуры данных:

описатель конфигурации аппаратуры КАМАК и измерительных каналов;

справочную информацию по спектрам;

списки интенсивностей спектров;

калибровочные параметры КМС: калибровочные коэффициенты и справочную информацию о последней калибровке;

описатель параметров пиков фоновой регистрации, таких как список значений  $M$  регистрируемых пиков, число снятых точек и т.п.;

список интенсивностей пиков фоновой регистрации.

БД СА и ОИ КМС допускает хранение не более 18 обзорных спектров и одного списка интенсивностей пиков фоновой регистрации. Общий объем информации не превышает 1500 Кбайт. Файлы, содержащие списки интенсивностей спектров, обрабатываются с использованием метода прямого доступа, все прочие файлы – методом последовательного ввода-вывода.

### Структура подсистем, их функции и взаимодействие

Функционально СА и ОИ КМС может быть представлена в виде совокупности пяти взаимосвязанных подсистем (см.рис.2).

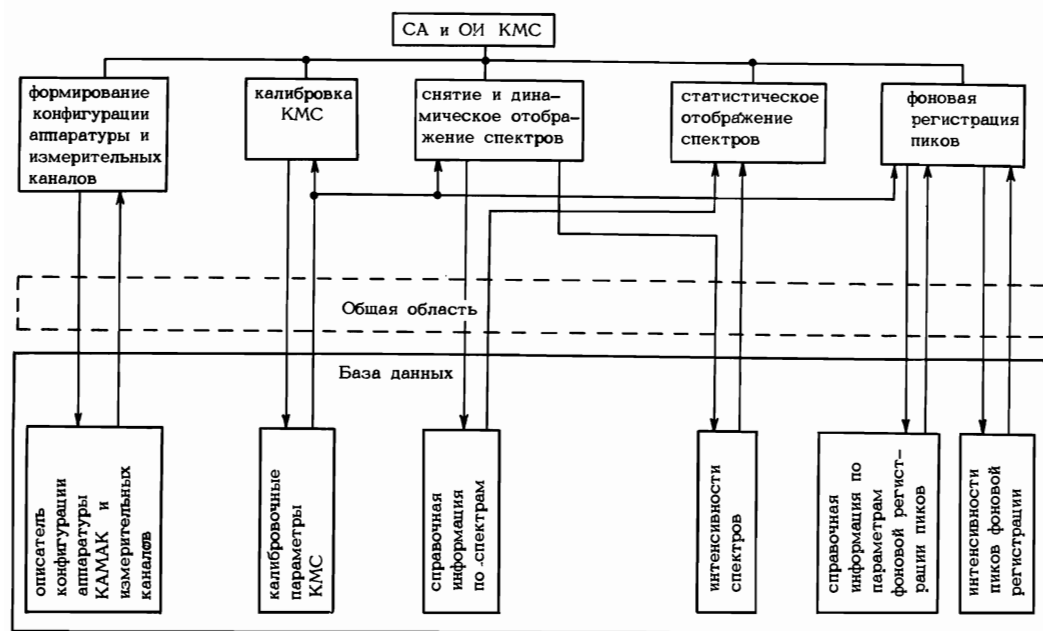


Рис.2. Функциональная схема СА и ОИ КМС

Подсистема описания конфигурации аппаратуры КАМАК и измерительных каналов в частности формирует блоки управления модулями КАМАК в разделяемой общей области, используя в качестве исходных данных соответствующий файл-описатель.

Функции, реализуемые прочими подсистемами, описаны в разделах 3-6.

Каждая подсистема представляет собой множество взаимодействующих задач. Взаимодействие подсистем и задач внутри каждой подсистемы по данным организуется двумя способами: с помощью разделяемой общей области и непосредственно через БД.

Использование общей области обеспечивает необходимую реактивность СА, поскольку позволяет разместить общие, часто используемые параметры системы в памяти ЭВМ и сокращает число обращений к диску. Размер области - 8 Кбайт.

Для организации взаимодействия задач внутри подсистем по управлению используются такие функции ОС РВ, как обслуживание задач по приоритетам, аппарат глобальных флагов, выгружаемость задач во время ввода данных с терминала, циклическая выгрузка задач.

Использование этих функций позволяет совмещать работу подсистемы фоновой регистрации пиков с работой других подсистем, ведущих диалог с оператором.

### Особенности организации взаимодействия СА и ОИ КМС с оператором

В процессе функционирования СА и ОИ КМС обеспечивает диалоговый режим работы, реализуемый распределенной по задачам системой управления диалогом (СУД). СУД обеспечивает два способа организации диалога: по инициативе системы и по инициативе оператора.

Все запросы СУД, инициируемые системой, можно разделить на три группы: запрос-меню, запрос-альтернатива и запрос значения параметра [2].

Запросы, инициируемые оператором, обрабатываются в режиме функциональной клавиатуры (ФК).

Режим ФК обслуживает запросы оператора двух типов: выполнение выбранной функции и изменение значения параметра. Выбор функции производится нажатием соответствующей клавиши. Изменение значения параметра может выполняться двумя способами: инкрементно/декрементно или по выполняемому СУД запросу. В первом случае значение параметра увеличивается или уменьшается на некоторую величину при однократном нажатии определенных клавиш. Во втором случае СУД реализует стандартный запрос значения параметра. Для реализации режима ФК использована функция операционной системы обработки асинхронного системного прерывания по незапланированному вводу символа.

## 8. Р е з у л ь т а т ы о п ы т н о й э к с п л у а т а ц и и и и х о ц е н к а

Методика калибровки КМС обеспечивает управление разверткой по шкале массовых чисел с точностью не хуже 0,02 единиц М. Время калибровки зависит от числа массовых чисел, по которым она выполняется, причем на обработку одного массового числа затрачивается около 20 с.

Методика снятия обзорных спектров и статического отображения обеспечивает возможность как оперативного качественного контроля, так и детальной количественной оценки состава газовой среды в камере модуля роста.

Обеспечение возможности параллельной работы в режиме фоновой регистрации позволяет качественно контролировать процесс роста структур в камере ростового модуля, проведение операций по настройке элементов АЧ модуля.

В целом разработанная СА и ОИ КМС в модуле роста пленок удобна для практической работы и позволяет решать многочисленные исследовательские задачи установки МПЭ. Для расширения класса решаемых задач и совершенствования разработанных методик можно предложить:

проведение экспериментов с целью разработки методик использования КМС для контроля процентного состава молекулярных пучков, формирующих эпитаксиальные структуры;

разработку методик калибровки и фоновой регистрации пиков счетного канала измерений;

расширение функциональных возможностей по обработке спектров в режиме статического отображения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Межин Н.Н.//Научное приборостроение. Приборы и средства автоматизации для научных исследований. Л.: Наука, 1986, с.73-79.
2. Межин Н.Н.//Научное приборостроение. Приборы и средства автоматизации для научных исследований. Л.: Наука, 1987, с.79-85.
3. Слободенюк Г.И. Квадрупольные масс-спектрометры. М.: Атомиздат, 1974, - 272 с.
4. Галль Р.Н., Кузьмин А.Ф., Раков Ю.Н., Павленко В.А.//Кинетическая масс-спектрометрия и ее аналитические применения. М.: Наука, 1979, с.62-71.
5. Кузьмин А.Ф., Ланин Е.В., Раков Ю.Н., Турчин А.В.//Масс-спектрометрия и химическая кинетика. М.: Наука, 1985, с.125-128.