

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

99-192

P10-99-192

И.К.Взоров, А.В.Калмыков, С.А.Корнев,
В.Ф.Минашкин, В.В.Сиколенко

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА ОБЛУЧАЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

1999

Введение

Под воздействием облучения сильноточным импульсным пучком электронов и ионов в локальных приповерхностных областях образца происходит повышение температуры до 2000-3000 К.^{/4/} Распределение термического градиента приводит к появлению ударной волны высокого давления. Это давление может достигать 1-10 ГПа.^{/5/} Всё это воздействует на облучаемый образец, изменяет его структуру. Для изучения физических процессов, протекающих в образцах под воздействием таких факторов, необходимо произвести измерение и анализ электрических параметров, в первую очередь вольт-амперных характеристик, удельного сопротивления, ёмкостных характеристик. При облучении полупроводниковых образцов экспериментально снятая зависимость ёмкости от напряжения смещения позволяет определять концентрацию доноров, величину контактного потенциала и получать информацию о внутренних глубоко лежащих примесных уровнях. Результаты измерений ёмкости, как функции частоты, широко используются для определения времён релаксации, соответствующих различным ловушечным состояниям.

Система экспресс-анализа (СЭА), созданная в ЛСВЭ ОИЯИ для совместной работы с импульсным сильноточным источником электронов и ионов (ИСИЭИ)^{/1/} предназначена для автоматического измерения электрических параметров облучаемых образцов, что позволяет оперативно вводить коррективы в режимы облучения. Измерительная система СЭА автоматически снимает вольт-амперные характеристики плёночных структур металл-диэлектрик-полупроводник, измеряет четырёх зондовым методом удельное сопротивление, измеряет ёмкостные параметры образца, позволяет снимать вольт-фарадную характеристику на фиксированных частотах в диапазоне от 1-500 кГц.

Аппаратура СЭА выполнена в стандарте КАМАК и занимает один крейт. На рис. (1) показана блок-схема конфигурации системы экспресс-анализа. Снятие вольт-амперных характеристик и измерение удельного

сопротивления образца осуществляется блоком ВАХ совместно с блоком УСМ. Ёмкостные параметры и вольт- фарадные характеристики измеряются блоком ВФХ. Выходные сигналы блока УСМ и блока ВФХ через мультиплексор КК04^{3/}

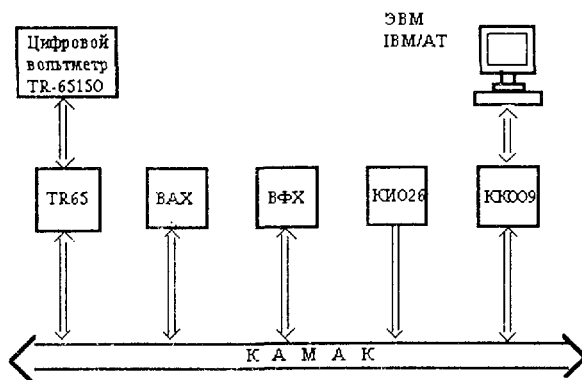


Рис.1. Структурная блок-схема системы СЭА

заводятся для измерения на цифровой вольтметр TR65150, который через адаптер TR65 подключен к магистрали КАМАК. В качестве управляющей ЦВМ используется компьютер типа IBM/AT, подключенный через контроллер КК009 и платы связи ПК009. Пакет программ, поддерживающий работу СЭА, обеспечивает управление аппаратурой всей системы, осуществляет предварительную обработку с выводом на печать, заносит результаты

измерения в базу данных, являясь частью общего программного обеспечения установки ИСИЭИ.

Измерение вольт - амперных характеристик

Снятие вольт-амперной характеристики образца осуществляется блоками ВАХ и УСМ, выполненными в стандарте КАМАК. В блоке ВАХ сосредоточено управление, а в блоке УСМ находятся : усилитель мощности , усилитель высокого напряжения и источник высокого напряжения на 300В.

Технические характеристики блока ВАХ:

Диапазон задания напряжения: 1-200В;

Шаг дискретного напряжения: 0,05В для $U < 20В$;

0,5В $U > 20В$;

Точность задания напряжения: 0,25%

Количество точек измерения: $n = [(U_{max} - U_{min}) / U_{шаг}] + 1$;

Время измерения 1 точки: $t = 0,4$ сек;

Блок “вольт - амперных характеристик “(ВАХ) работает в следующих режимах:

- измерение тока по заданному напряжению;
- снятие вольт-амперной характеристики;
- измерение удельного сопротивления.

В режиме снятия вольт-амперной характеристики, как исходные данные, задаются параметры:

- минимальное заданное напряжение U_{min} ;
- максимальное заданное напряжение U_{max} ;
- напряжение шага смещения $U_{шаг}$.

На рис.2 показана функциональная схема блока ВАХ. Управляемый источник напряжения построен на базе десяти разрядного цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) К572ПА1. Аналоговый сигнал с выхода ЦАП передаётся в блок УСМ, где находится силовая часть управляемого источника напряжения.

F(21)A(0) W13 - подключение АЦП (делитель на выходе усилителя УС24);

F(22)A(0) - подключение усилителя УС24;

F(23)A(0) W13=1 - подключение АЦП (делитель на выходе усилителя УС200);

W14=1 - подключение АЦП ($R_{ш}=1 \text{ Ом}$).

W15=1 - подключение АЦП ($R_{ш}=100 \text{ Ом}$)

W16=1 - подключение АЦП ($R_{ш}=1000 \text{ Ом}$).

W=0 - отключение АЦП.

На рис.3 показана функциональная схема блока УСМ. С выхода усилителя УС200 снимается напряжение $U(\max)=200\text{В}$ с минимальным дискретным шагом $U(\text{шаг})=0,5\text{В}$. Мощность усилителя 20Вт ; ток $I=10 \text{ мА}$. Для облучаемых полупроводниковых образцов при снятии вольт-амперной характеристики требуется минимальный дискретный сигнал смещения

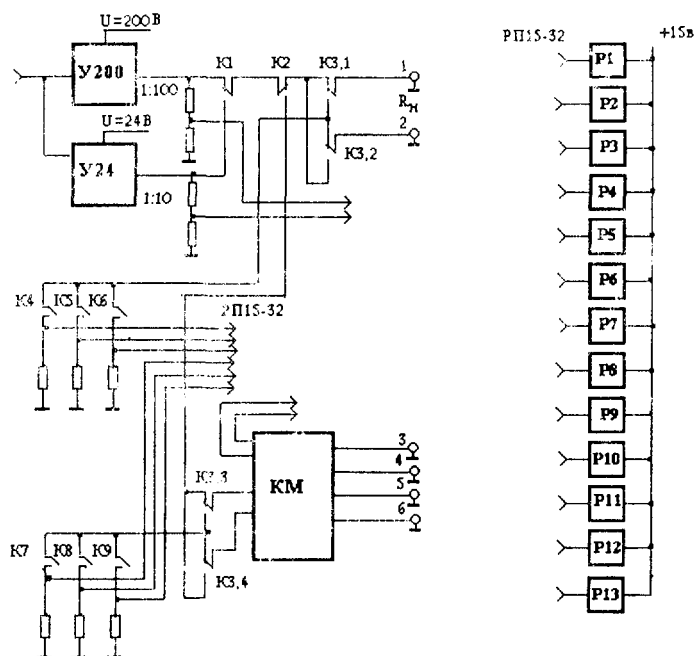


Рис.3. Функциональная схема блока УСМ

Ушаг=0,05В. Такой сигнал формируется на усилителе мощности УС24 ($I_{n\max}=1A$; $U_{\max}=20В$; $P=20Вт$). Коммутация нагрузки посредством контактов (3.1;3.2) реле РЗ даёт возможность снимать как прямую, так и обратную ветвь вольт-амперной характеристики. Токовые шунты (1 Ом;100 Ом;10000 Ом), предназначенные для измерения тока в нагрузке, подключаются в цепь измерения посредством реле (Р4;Р5;Р6).

Все измерения осуществляются цифровым вольтметром TR65150, связанным с магистралью КАМАК через адаптер TR65. На рис.4 приведена функциональная схема адаптера. Данные, приходящие от вольтметра TR65150 в двоично-десятичном коде, заносятся в буферные регистры БР1 и БР2, по сигналу "Запись"(ЗП). На входе шины данных адаптера установлены преобразователи ПР1 и ПР2, преобразующие 12В в сигналы 5В. Сигнал L,

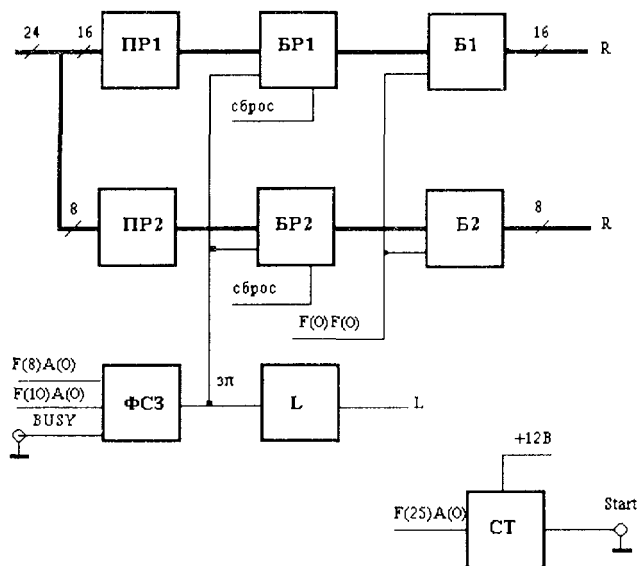


Рис. 4. Функциональная схема адаптера TR65

сформированный по окончании записи, показывает, что данные можно считывать в ЦВМ.

Команды КАМАК адаптера TR65:

F(0)A(0) - чтение данных с буферного регистра BP1;

F(0)A(1) - чтение данных с буферного регистра BP2;

F(10)A(0) - формирование сигнала "ЗП";

F(16)A(0) - запись данных в буферный регистр BP1;

F(16)A(1) - запись данных в буферный регистр BP2;

F(25)A(0) - запуск измерения.

Для блока ВАХ и адаптера TR65 написаны управляющие программы:

<VaxDr> - драйвер блока ВАХ;

<VaxIni> - процедура инициализации;

<MZR200>, <MZR24> - процедуры коррекции линейности канала задания дискретного напряжения смещения;

<TR65Dr> - драйвер адаптера;

<TRIni> - процедура инициализации;

<TETR> - процедура преобразования двоично-десятичного кода.

На рис. 5 представлена блок-схема алгоритма процедуры <IzmVax>, под управлением которой снимается вольт-амперная характеристика. Ввиду того, что величина сопротивления нагрузки может быть от десятков Ом до сотен мОм, на начальном этапе определяется значение измерительного токового шунта, величина которого может принимать значение: 1 Ом; 100 Ом; 10000 Ом. Затем задаётся напряжение на нагрузке. Информационный канал задания дискретного напряжения на нагрузке показан на рис.6. Суммарная ошибка, возникающая в канале по мере прохождения сигнала^[2], выражается формулой

$$\delta S = 1/2 U_{\text{мзр}} + E_{\text{сдв}} + \kappa \Delta E + f(E_{\text{вх}}/C^0),$$

где $1/2 U_{\text{мзр}}$ - ошибка квантования, равная $1/2$ значения младшего значащего разряда /МЗР/; $E_{\text{сдв}}$ - напряжение на нагрузке при отсутствии входного сигнала. Это напряжение образуется из $E_{\text{см}}$ операционного усилителя и падения напряжения на транзисторах усилителя мощности; $\kappa \Delta E_{\text{вх}}$ - погрешность

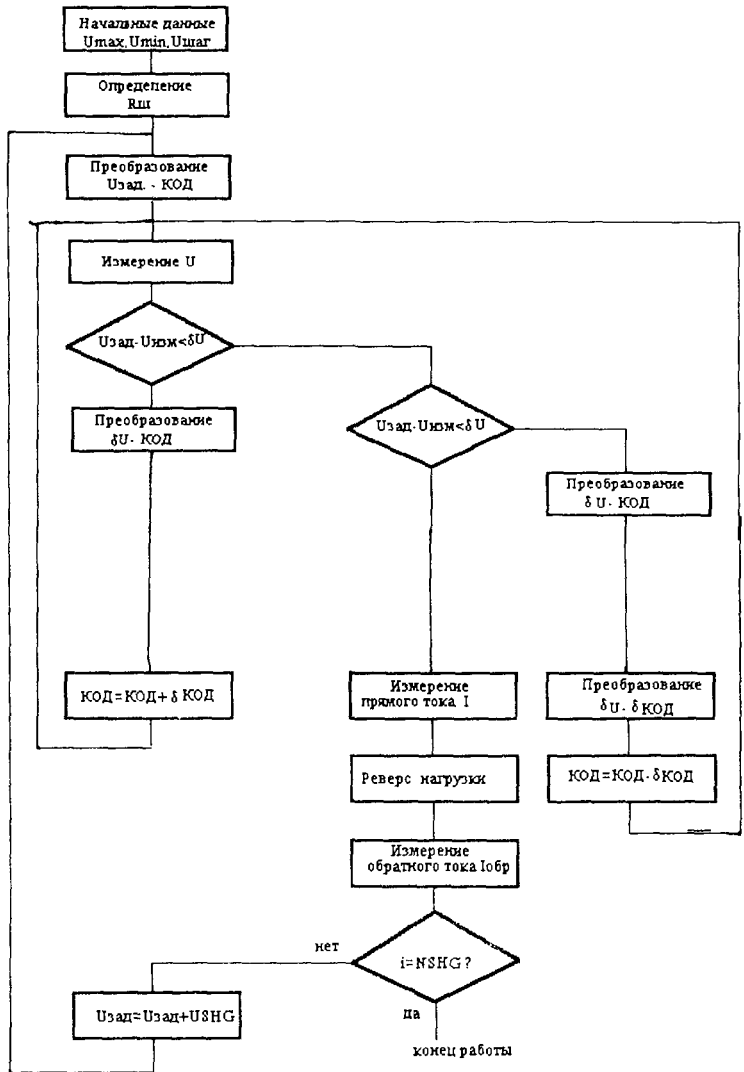


Рис.5. Алгоритм процедуры $\langle I_{zm} V_{ax} \rangle$. Снятие вольт-амперной характеристики

коэффициента передачи канала; $f(E_{вх}/C^0)$ - ошибка из-за влияния температуры на элементы канала. К погрешностям, возникающим в канале, добавляется ошибка численных преобразований в ЦВМ.

Для точного задания напряжения был применён метод минимизации рассогласования $\Delta U = U_{зад.} - U_{изм.}$. Измерение напряжения производится цифровым вольтметром TR65150, который находится в цепи обратной связи. Заданное напряжение сравнивается с измеренным. В среднем требуется 2-3 итерации, чтобы рассогласование ΔU попало в заданный диапазон точности. При $U_{зад.} < 20$ В диапазон точности $\delta U = 0,05$ В, значение младшего значащего разряда $U_{мзр.} = 0,02$ В. Дискретное напряжение снимается с усилителя УС24. При $U_{зад.} > 20$ В диапазон точности $\delta U = 0,5$ В, $U_{мзр.} = 0,2$ В. Работает усилитель УС200.

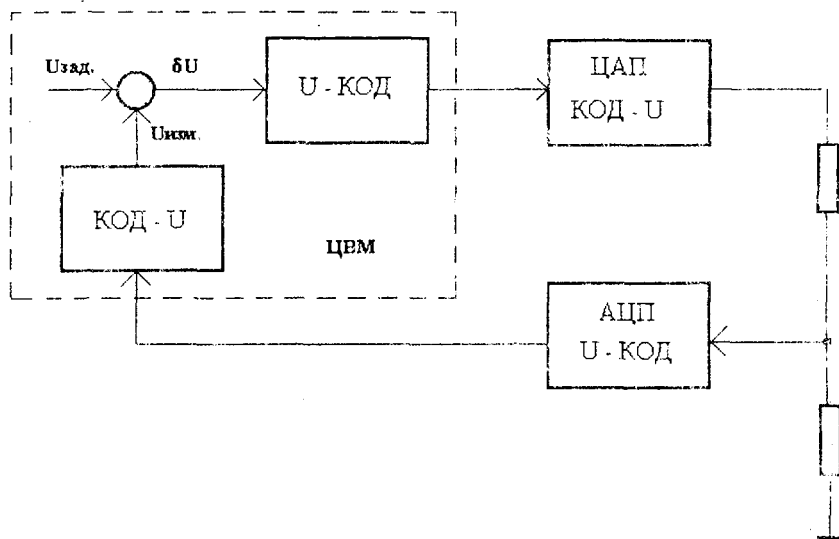


Рис.6. Информационный канал задания напряжения на нагрузку

Проводится измерение как прямого, так и обратного тока, протекающего через нагрузку.

В режиме работы: “измерение тока по заданному напряжению” имеется возможность избирательного подключения токовых шунтов.

Измерение удельного сопротивления

Для измерения удельного сопротивления использован “четырёх зондовый метод”^{6/}. Зонды расположены в вершинах квадрата. Ток пропускается через зонды, образующие одну из сторон квадрата, а напряжение снимается с другой пары зондов. Тогда удельное сопротивление вычисляется по формуле $\rho = 2\pi S / (2 - \sqrt{2}) \cdot U_{3,4} / I_{1,2}$, где S - расстояние между зондами. Расположение зондов в вершинах квадратов обеспечивает снижение ошибки измерения. Это достигается за счёт выполнения измерений при пропускании тока последовательно через каждую пару соседних зондов. Каждый раз измерение разности потенциалов производят дважды: при пропускании тока через зонды в прямом и обратном направлении, с последующем вычислении среднего значения удельного сопротивления по результатам восьми измерений. Таким способом исключается влияние продольной термо-ЭДС, возникающей на образце вследствие градиента температуры. При измерении параметров полупроводников возникает погрешность от эффекта фотопроводимости и фото-ЭДС. Поэтому при измерении образец помещают в закрытый объём. Система зондов представляет собой матричную головку с расстоянием между иглками $S=8$ мм, с контактами из серебра. Усилие прижима иглолок может регулироваться.

Для измерения удельного сопротивления был создан коммутатор КМ на базе реле РЭС-22, расположенный в блоке УСМ (рис.3), Управление коммутатором осуществляется из блока ВАХ буферным регистром БРК1 (рис.2) Регистр команд БРК4 управляет подключением измерительных токовых шунтов.

Команды КАМАК блока ВАХ для режима измерения удельного сопротивления:

F(3)A(0) - режим работы УДС;

F(17)A(0) W13 - задание токов $I_{(6.3.)}$, измерение $U_{(4.5.)}$;

F(17)A(0) W14 - задание токов $I_{(4.5.)}$, измерение $U_{(6.3.)}$;

F(17)A(0) W15 - задание токов $I_{(3.4.)}$, измерение $U_{(5.6.)}$;

F(17)A(0) W16 - задание токов $I_{(5.6.)}$, измерение $U_{(3.4.)}$;

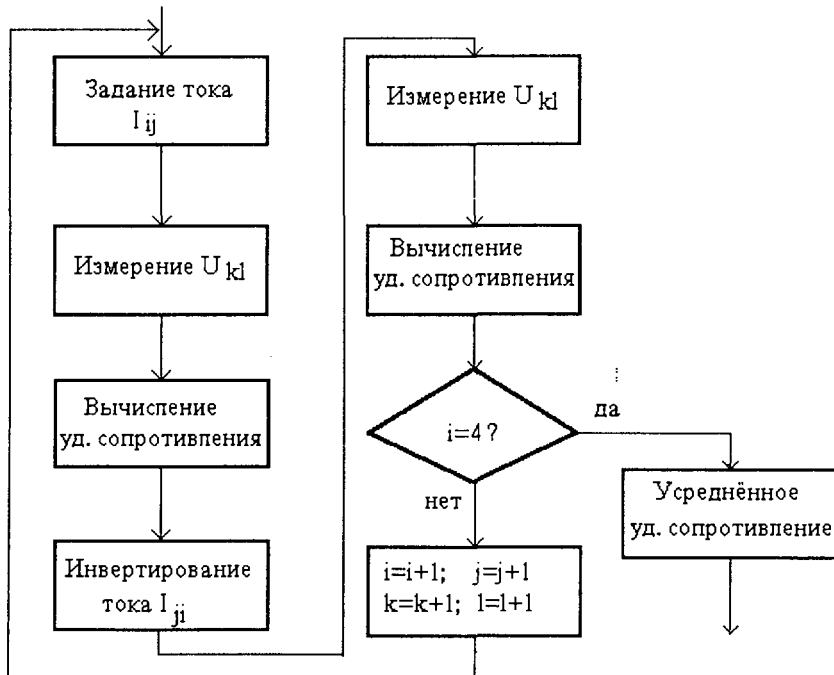


Рис.7. Алгоритм работы процедуры <IzmUdS>. Измерение удельного сопротивления

F(20)A(0) W13 - подключение измерительного шунта 1 Ом;

F(20)A(0) W14 - подключение измерительного шунта 100 Ом;

F(20)A(0) W15 - подключение измерительного шунта 10000 Ом;

Управление СЭА в режиме измерения удельного сопротивления осуществляется программой <IzmUdS>. На рис.7. показана её блок-схема.

Измерение ёмкостных характеристик

Вольт-фарадные методы измерения параметров полупроводников основаны на определении зависимости ёмкости структуры, обусловленной наличием объёмного заряда в поверхностной области полупроводника, от приложенного к ней напряжения.

Автоматическая система экспресс-анализа, спроектированная для обработки облучаемых образцов, позволяет снимать вольт-фарадные характеристики (ВФХ) на различных фиксированных частотах от 1-500 кГц.

Дискретный шаг изменения напряжения смещения $U(\text{шаг}_{\min})=0,05\text{В}$, для диапазона смещения напряжения 1-20 В. Для диапазона напряжений смещения 1-200 В минимальный шаг смещения $U_{\min}=0,5\text{В}$.

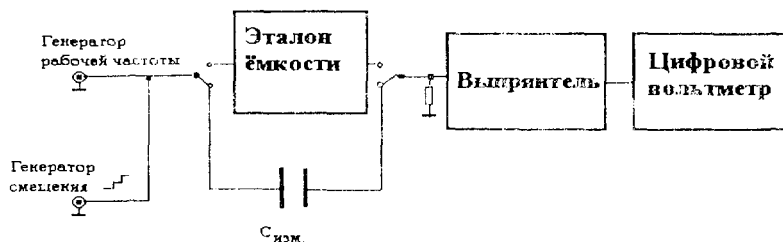


Рис.8. Упрощенная схема измерения ёмкости

На рис.8 приводится упрощенная схема измерения ёмкости в зависимости от изменения смещения постоянного тока, подаваемого на образец.

В основу измерения положен метод сравнения токов. Сравниваются токи, проходящие через эталонные ёмкости на фиксированной частоте, с токами через ёмкость образца на той же частоте.

На начальном этапе измерения проводится калибровка измерительного канала. На эталонные конденсаторы от генератора рабочей частоты подается синусоидальное напряжение 30 мВ с заданной частотой. Эталонные конденсаторы образуют “магазин” ёмкостей: диапазон эталонных конденсаторов 50-1500 пФ, количество дискретных комбинаций ёмкостей - 2^5 , шаг изменения ёмкости - 50 пФ. Результаты измерения токов, проходящих через эталонные ёмкости, в виде таблиц заносятся в память ЦВМ. После этого на той же рабочей частоте измеряется ток, пропущенный через образец. По табличным данным эталонных конденсаторов определяется ёмкость образца. На рис.9 представлен фрагмент зависимости $C_{эт}=f(I_{эт})$. Здесь применена линейная аппроксимация. Отсюда:

$$C_{изм}=C_{i-1}+(C_i-C_{i-1})*(I_{изм}-I_{i-1})/(I_i-I_{i-1}).$$

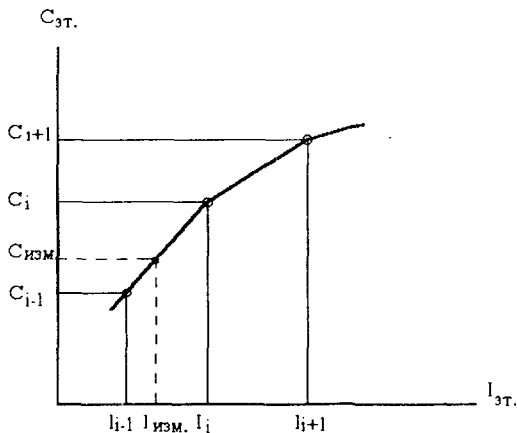


Рис.9. Фрагмент характеристики $C_{эм}=f(I_{эм})$

Такие измерения, когда токи эталонных конденсаторов и ток образца промеряются на одном и том же измерительном канале и практически в одно и

то же время, позволяют значительно уменьшить температурные и приборные погрешности, которые обычно присутствуют при измерениях.

При снятии вольт-фарадной характеристики осуществляется подача ступенчатого напряжения смещения на образец. После этого измеряется ток, текущий через образец, и определяется значения ёмкости по приведённой методике.

Для измерения ёмкостных параметров облучаемых образцов был разработан в стандарте КАМАК блок ВФХ. На рис.10 представлена его блок-схема. По команде F(16)A(0) в буферный регистр BP1 по шинам W1-W6 заносятся данные для управления ключами K₀-K₅, которые осуществляют коммутацию эталонных конденсаторов при снятии характеристики $I_{gr}=f(C_{gr})$. По команде F(6)A(0) происходит подключение эталонных конденсаторов в режиме калибровки. F(4)A(0) - подключение облучённого образца в режиме измерения. F(20)A(0) - измерение заданного напряжения смещения. F(22)A(0) - измерение тока, проходящего через образец. F(18)A(0) - инициализация буферного регистра BP1 и управляющих триггеров. С генератора синусоидального напряжения ГЗ-112/1 приходит опорный сигнал $U_{оп}=30\text{мВ}$. Ступенчато изменяющееся напряжение смещения задаётся от блока ВАХ.

Управляющие программы блока ВФХ:

<VfxDr> - драйвер блока ВФХ;

<VfxIni> - процедура инициализации .

На рис.11 показана блок- схема процедуры <IzmVfx>, работающей в режиме снятия вольт-фарадной характеристики. В качестве исходных данных задаются:

U_{max} - максимальное напряжение смещения;

U_{min} - минимальное напряжение смещения;

$U_{шаг}$ - дискретное изменение напряжения смещения.

На начальном этапе работы процедуры производится калибровка тракта измерения. После этого задаётся напряжение смещения и измеряется ток, протекающий через образец. По калибровочной характеристике и измеренному току определяют значение ёмкости образца.

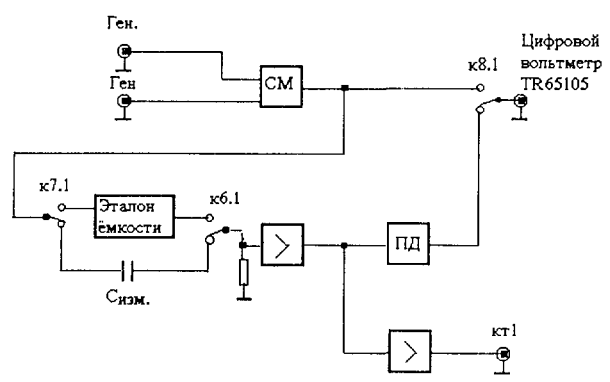
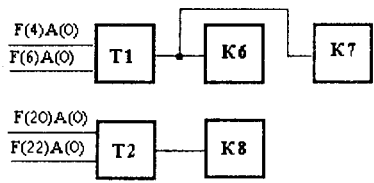
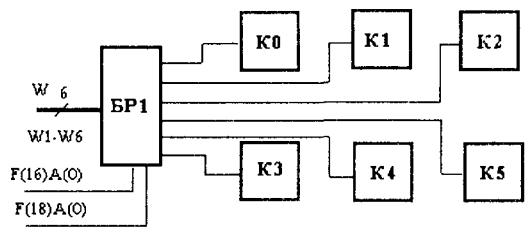


Рис.10. Функциональная схема блока ВФХ

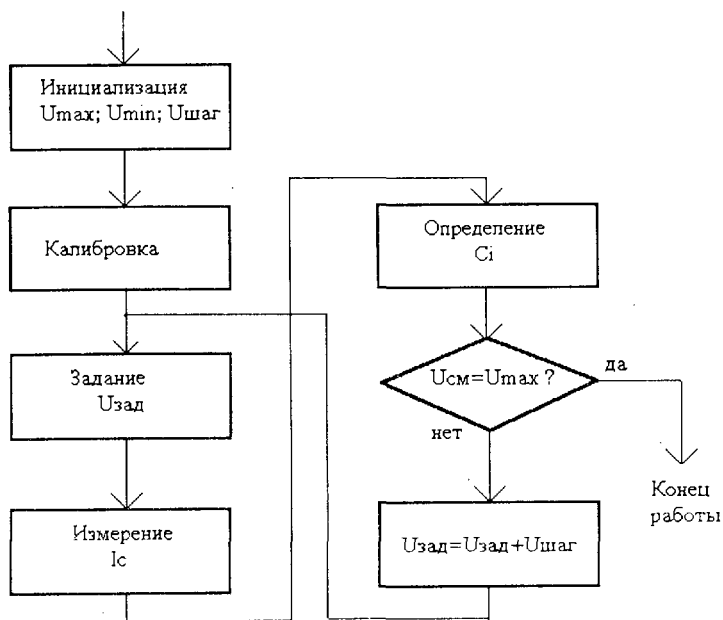


Рис.11. Алгоритм работы процедуры <IzmVfx>.

Снятие вольт-фарадной характеристики

Программное обеспечение системы экспресс-анализа облучаемых образцов

Пакет программ, поддерживающий работу СЭА, является частью общего программного обеспечения установки ИСИЭИ. Он представляет собой оверлейную структуру. На рис 12 приведён алгоритм работы программы <ISIEI>, которая является главной оверлейной программой.

Оверлейные модули:

<IzmIU1>- оверлейный модуль измерения тока, протекающего через образец при заданном напряжении;

<IzmIU> - процедура измерения тока;

<Kamak> - библиотечный модуль, в котором находятся драйверы и процедуры инициализации блоков системы СЭА;

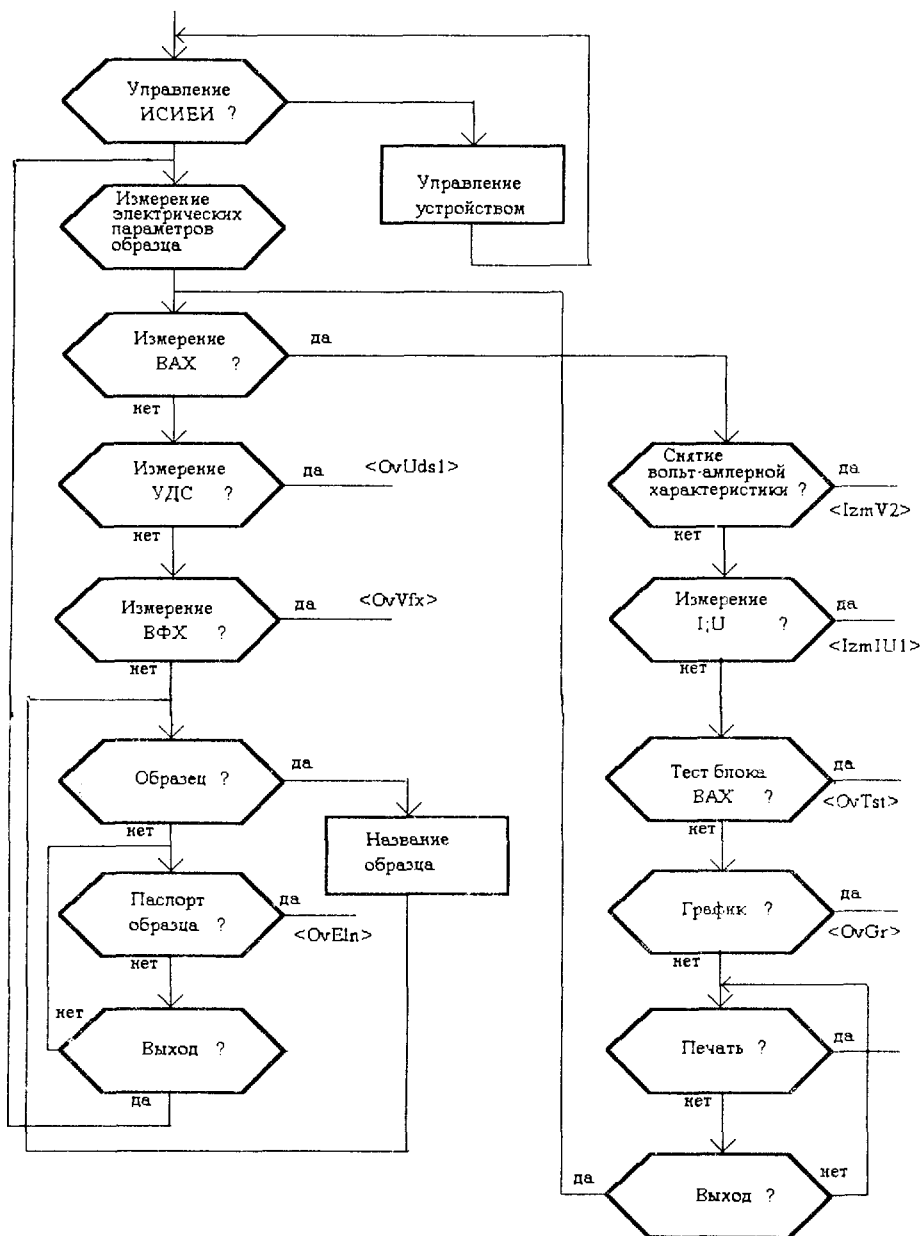


Рис. 12

- <VaxLb1> - библиотечный модуль, содержащий процедуры
пользовательского интерфейса;
- <IzmV2> оверлейный модуль снятия вольт-амперной
характеристики;
- <IzmVax> - процедура, поддерживающая работу системы СЭА в
режиме измерения вольт- амперной характеристики;
- <VaxRR> - тестирование блока ВАХ в режиме измерения
вольт-амперной характеристики. Тест выполняется в
по-командном режиме. После выполнения каждой команды
в просмотрном окне высвечиваются результаты отклика
блока на команду;
- <VaxT1> - тестирование блока ВАХ в режиме измерения
удельного сопротивления;
- <TR65Ts> - тестирование адаптера TR65;
- <VfxTs> - тестирование блока ВФХ;
- <OvEln> оверлейный блок базы данных;
- <Eliona> - процедура, поддерживающая работу базы
данных. Данные заносятся как с клавиатуры, так и из
буферной памяти ЦВМ, где находятся результаты
измерения;
- <OvGr> оверлейный модуль построения графиков;
- <Graphus> - процедура вывода результатов измерения в
виде графика. Имеется возможность выделения фрагмента
графика и его масштабирования.

Пользовательский интерфейс представлен в виде табличных окон с
многоуровневой структурой.

В качестве примера использования системы измерения СЭА на рис.13
приведены снятые вольт-фарадные характеристики кремниевого образца Si (n-
проводимость, кристаллическая решётка типа 111). Кривая (1) - до облучения,

- (2) - после облучения. Образец облучался электронным пучком:
- энергия пучка $W=260$ кэВ; ток пучка электронов 800 А;
 - частота импульсов 1 Гц; время облучения 20 мин.

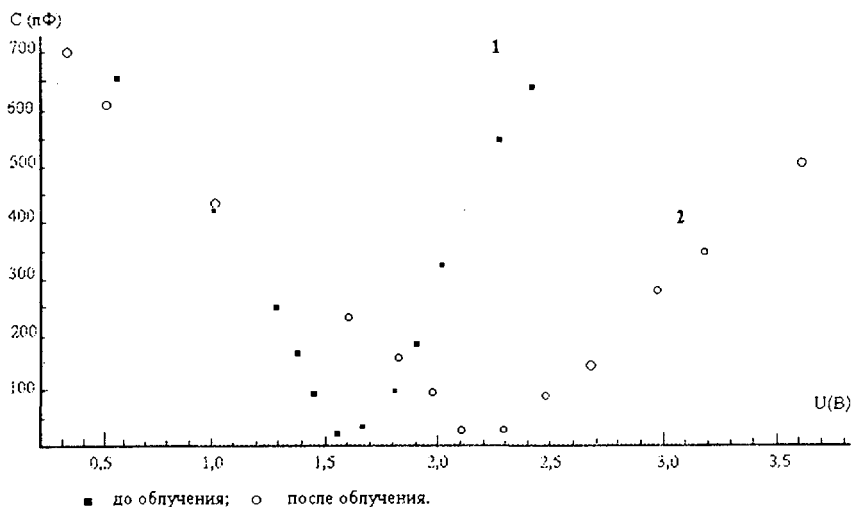


Рис.13. Вольт-фарадная характеристика образца: плёнка углерода - подложка Si (n - проводимость; кристаллическая решётка типа 111). 1- до облучения; 2 - после облучения

Заключение

Реализована система экспресс-анализа (СЭА), работающая совместно с импульсным сильноточным источником электронов и ионов.

Система СЭА автоматически измеряет электрические параметры облучаемых образцов, что даёт возможность оперативно вводить коррективы в режимы облучения. Общее управление и обработка результатов измерения осуществляется от ЦВМ IBM/AT. Управляющая и измерительная аппаратура выполнена в стандарте КАМАК. Разработаны электронные блоки ВАХ и УСМ, предназначенные для измерения удельного сопротивления “четырёх зондовым” методом и снятия вольт-амперной характеристики.

В режиме снятия вольт-амперной характеристики:
максимально задаваемое напряжение $U(\max)=200$ В;
минимальный шаг изменения напряжения $U(\text{шаг})=0,05$ В;
точность задания напряжения 0,25%.

Разработанный блок ВФХ осуществляет измерение ёмкостных характеристик:

диапазон измеряемых ёмкостей 0-1600 пФ;

диапазон рабочих частот 1-500 кГц;

точность измерения ёмкости 0,5%.

В режиме снятия вольт-фарадных характеристик:

диапазон заданных напряжений смещения 1-200 В;

минимальный шаг изменения напряжения смещения $U(\text{шаг})=0,05$ В.

Разработан блок адаптера TR65, через который цифровой вольтметр TR65150 подключен к магистрали КАМАК. Написан пакет тестовых и рабочих программ, поддерживающих работу системы СЭА.

Литература:

1. С.А.Коренев. Сообщение ОИЯИ № 9-81-703, Дубна, 1981.
2. А.В.Калмыков и др. Сообщение ОИЯИ № Р9-98-158, Дубна, 1998.
3. В.А.Антюхов и др. Сообщение ОИЯИ 10-11636, Дубна, 1978.
4. С.А.Коренев и др. Техника эксперимента, №3, 1995.
5. Е.А.Абромян, В.А.Альтеркоп, Г.Д.Кулешов, Интенсивные электронные пучки, Москва, Энергоатомиздат, 1984.
6. Л.П.Павлов, Методы измерения параметров полупроводниковых материалов, Москва, Высшая школа, 1987.
7. Ю.К.Акимов и др., Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. М., Энергоатомиздат, 1988.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 июля 1999 года.