

P13-2003-203

И. А. Голутвин, В. С. Григорьев¹, В. Г. Данилевич¹,
А. Ю. Дмитриев, В. В. Елша, Н. И. Замятин,
Е. В. Зубарев, Ф. Е. Зязюля², В. И. Козусь¹,
В. М. Ломако¹, Д. В. Степанков², А. П. Хомич²,
А. Е. Черемухин, Н. М. Шумейко²

**АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТРИПОВЫХ
КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ**

¹Белорусский государственный университет, Минск

²Национальный научно-учебный центр физики частиц
и высоких энергий при Белорусском государственном университете,
Минск

Введение

Для предливневой части (PRESHOWER, акроним – ES) торцевого электромагнитного калориметра [1] эксперимента CMS в ЦЕРН (Швейцария) необходимо изготовить 4288 микромодулей. Микромодуль состоит из кремниевого детектора и платы электроники считывания, они прикреплены к общей керамической пластине, которая, в свою очередь, приклеивается к алюминиевому основанию. Общий вид микромодуля в сборе с промежуточным вариантом электроники считывания показан на рис. 1.

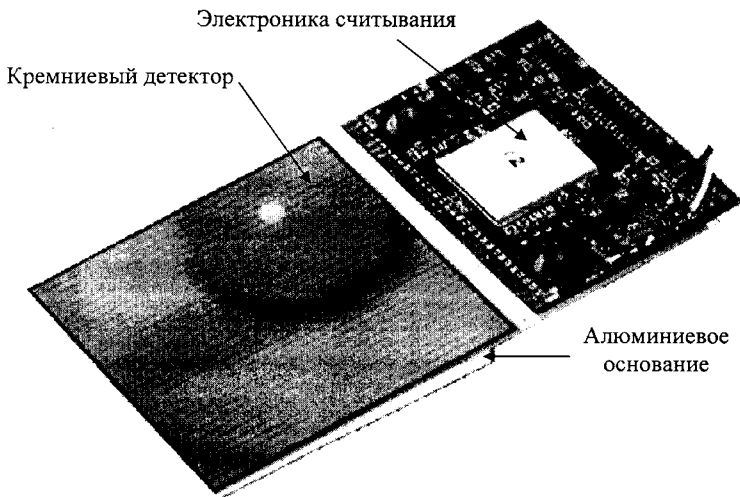
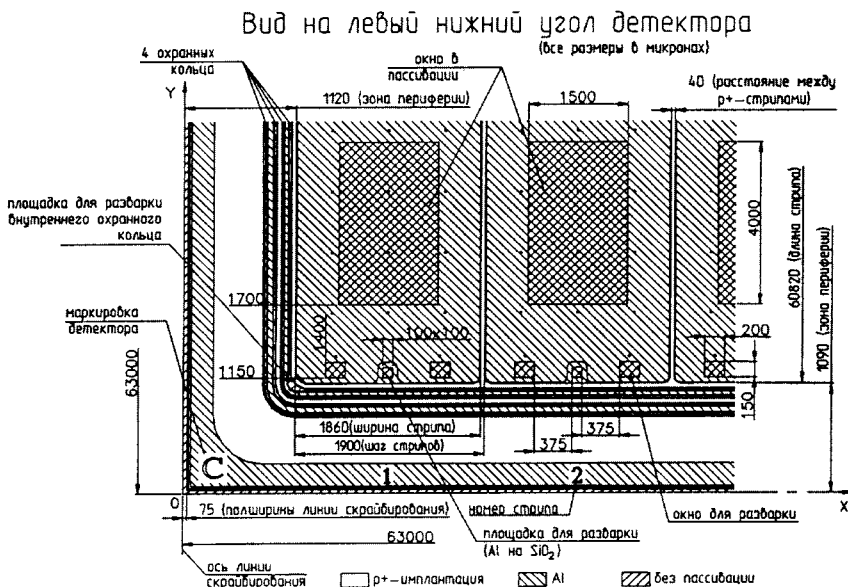


Рис. 1. Общий вид микромодуля

Кремниевый детектор размером $63 \times 63 \times 0,32$ мм изготовлен по планарной технологии из высокоомного кремния n-типа проводимости [2]. 32 полосковых p+-электрода выполнены методом ионного легирования и имеют шаг между электродами, равный 1,9 мм. Один общий p+-электрод изготовлен диффузионно-имплантационным методом. С целью обеспечения электрических контактов на электроды детектора наносится алюминий толщиной 0,7 мк. Для присоединения электрических контактов и тестирования предусмотрены вскрытия размером $1,5 \times 4$ мм в пассивирующем слое фосфорно-силикатного стекла, нанесенного со стороны p+-электродов. Топология детектора изображена на рис. 2. Устанавливаемый в микромодуль кремниевый детектор по своим электрофизическим параметрам должен соответствовать спецификации, определенной в рамках международного сотрудничества по эксперименту CMS для производителей детекторов. Параметры спецификации – напряжение полного

обеднения в пределах $25 \div 150$ В, напряжение пробоя не менее 300 В, суммарный темновой ток детектора менее 1 мкА – определяются из измерений вольт-амперной (ВАХ) и вольт-фарадной (ВФХ) характеристик каждого электрода детектора. Помимо электрических измерений спецификацией предусмотрено также измерение толщины детектора, его ширины в направлении поперёк стрипов и визуальная оценка качества скрайбирования кристалла, т.е. отсутствие сколов и механических дефектов.



Данные измерений ВАХ и ВФХ для каждого детектора и результат первичной обработки измерений ВАХ и ВФХ [3] должны храниться в базе данных в ЛФЧ ОИЯИ и передаваться в базу данных CRISTAL в ЦЕРН. Вклад России в создание предливневой части торцевого электромагнитного калориметра эксперимента CMS определится производством 1800 кремниевых детекторов в г. Зеленограде в течение двух лет. Входной контроль электрических параметров детекторов и сборка микромодулей будет производиться в ЛФЧ ОИЯИ. Общее число электрических статических измерений ВАХ и ВФХ составит 57600. Описываемая уникальная установка, названная «Аппаратно-программный комплекс» (АПК), разработана и реализована с целью обеспечения большого количества электрических измерений с кремниевыми детекторами с момента начала их массового производства. АПК удовлетворяет требованиям эксперимента

CMS по параметрам и производительности электрических измерений с кремниевыми детекторами.

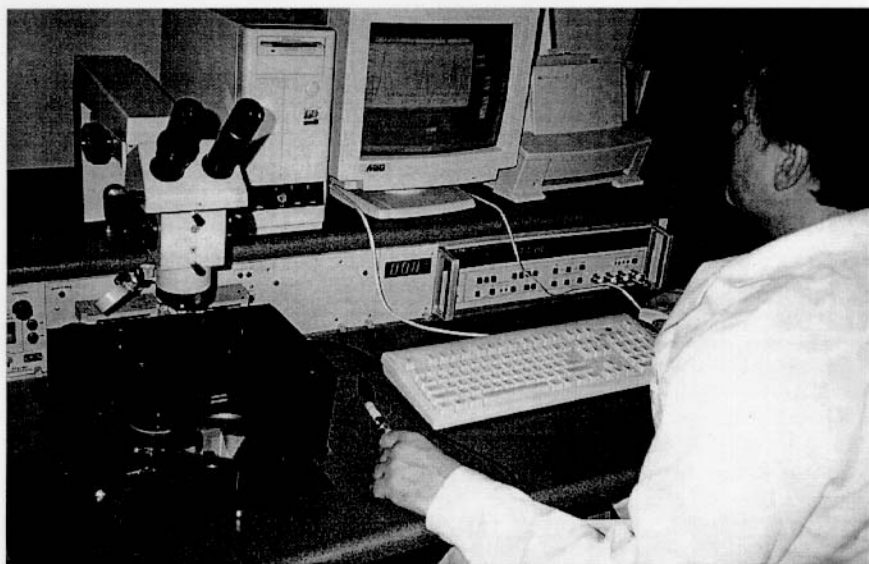


Рис. 3. Рабочее место оператора АПК

Назначение и состав аппаратно-программного комплекса

Аппаратно-программный комплекс предназначен для высокопроизводительных измерений статических ВАХ при прямом и обратном напряжениях смещения р-п-переходов и ВФХ кремниевых 32-стриповых детекторов, а также для ведения базы данных измерений. Комплекс представляет собой полностью укомплектованное рабочее место оператора, общий вид которого представлен на рис. 3. АПК состоит из следующих основных частей:

- стола оператора,
- зондового устройства,
- генератора напряжения обратного смещения,
- генератора тока прямого смещения,
- блока коммутации зондов и режимов измерений,
- измерителя иммитанса типа E7-14,
- платы контроллера канала общего пользования минского производства,
- платы L-032 асинхронного цифрового ввода-вывода на шину ISA,
- платы L-154, содержащей ЦАП и АЦП,
- блока питания электроники комплекса,
- блока цифровой индикации измерений.

Наличие в составе АПК персонального компьютера, лазерного принтера и блока аварийного сетевого питания совместно с блоком розеток с защитой от сетевых перегрузок и высокочастотным фильтром является стандартным для подобного рода измерительных устройств.

АПК обеспечивает измерение ВАХ и ВФХ детекторов без механической перекоммутации зондов к детектору с целью повышения производительности измерений. Функциональная схема АПК изображена на рис. 4.

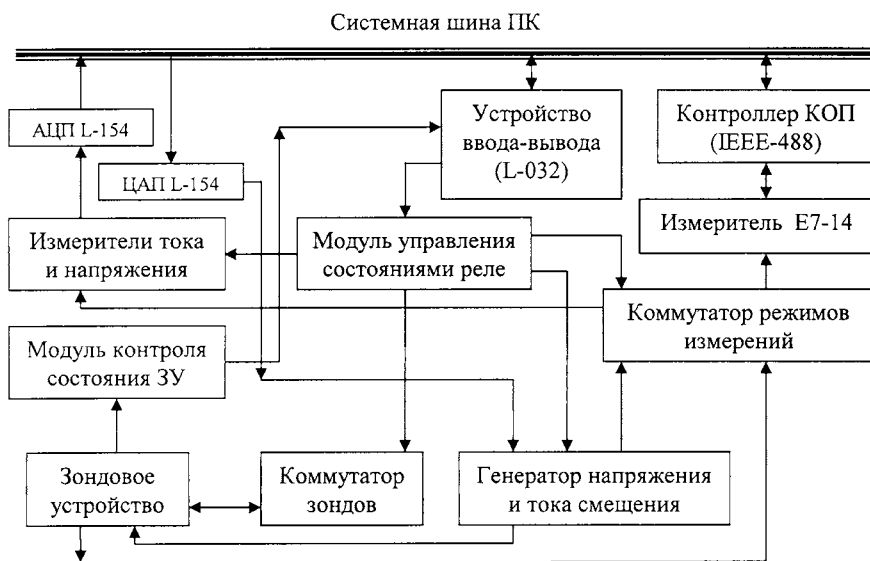


Рис. 4. Функциональная схема АПК

Зондовое устройство

АПК имеет зондовое устройство (ЗУ) для обеспечения гальванического контакта измерительной аппаратуры с 32 p+-электродами детектора с фронтальной стороны и одним n+-электродом с тыльной стороны. В качестве зондов с фронтальной стороны используются вольфрамовые иглы Г-образной формы, применяемые в электронной промышленности для тестирования микросхем. Зонды расположены вдоль линии перпендикулярно стрипам детектора с шагом 1,9 мм попарно-симметрично и составляют единый сменный зондовый блок. Во время проведения измерений кремниевый детектор помещается на рабочий столик, снабжённый вакуумным прижимом n+-электрода детектора к контактному электроду для подачи напряжения смещения, механическим кондуктором для фиксации положения детектора и специальным поворотным устройством для облегчения точного перемещения рабочего столика с детектором к зондовому

блоку. Для приведения зондов в контакт с р⁺-электродами детектора применяется пневматический привод, обеспечивающий перемещение рабочего столика по вертикали на 4 мм до соприкосновения с иглами.

Зондовое устройство имеет систему взаимной механической юстировки рабочего столика и зондового блока вокруг вертикальной оси в пределах $\pm 3^{\circ}$, продольного и поперечного перемещения на ± 4 мм и качания на $\pm 3^{\circ}$, что необходимо для осуществления одновременного соприкосновения всех игл с контактными площадками кристалла детектора. Точная настройка механического давления игл зондового блока по отношению к поверхности детектора необходима для того, чтобы обеспечить разрушение изолирующей окиси алюминия, всегда покрывающей электрод детектора, но не допустить «прокол» р⁺-электрода детектора и вывода его тем самым из строя.

Зондовое устройство оснащено:

- бинокулярным микроскопом для контроля юстировки детектора относительно зондов,
- электромагнитным и светозащитным экранами для предотвращения подсветки измеряемого детектора наружным рассеянным светом,
- светодиодной линейкой для измерения фототока короткого замыкания,
- датчиком температуры внутри ЗУ, помещённым вблизи рабочего столика,
- вакуумным манипулятором для подачи детектора на измерительный столик.

Общий вид ЗУ с открытой крышкой и установленным на рабочий столик детектором представлен на рис. 5. С целью обеспечения безопасности работы крышка зондового устройства снабжена микровыключателем, который блокирует все режимы измерений и отключает источники смещения при попытке доступа к высоковольтным частям ЗУ в рабочем режиме.

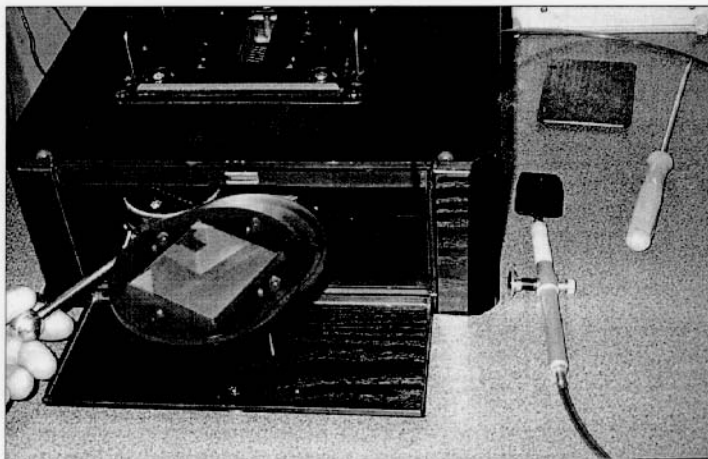


Рис. 5. Зондовое устройство с установленным детектором

Блок коммутации зондов и режимов измерений

Блок предназначен для подключения электродов детектора к измерителям тока и напряжения и к источникам тока или напряжения, а также к внешнему измерителю емкости. Предусмотрено подключение эталонных элементов сопротивления или ёмкости вместо электродов детектора с целью самоконтроля. В состав коммутатора блока входят 55 герконовых реле с переключающими контактами, из них 52 с одним герконом (S1÷S36, S40÷S55) и 3 с двумя герконами (S37, S38, S39). Электрическая схема блока представлена на рис. 6. Эталонные элементы сопротивления и ёмкости подключаются с помощью четырёх реле S33÷S36. Электроды детектора, не подключённые к входу измерителя тока, посредством реле S44÷S47 могут быть подключены к нулевой шине непосредственно или через набор резисторов в диапазоне 0,1÷100 кОм. Наличие резистора в цепи подключаемого электрода необходимо для выявления при измерении ВФХ случаев междуэлектродного короткого замыкания, вызванных дефектами процесса фотолитографии при изготовлении детектора.

Реле S40, S41, S55 предназначены для переключения в режим измерения междустриповой изоляции. Реле S37, S38 обеспечивают переход в режим измерения ВФХ. Реле S43 служит для перехода в режим измерения фототока короткого замыкания при включении светодиодной линейки. Реле S48÷S52 управляют выбором диапазонов измерителя тока, реле S53 отвечает за переключение диапазонов измерителя напряжения. Реле с одной переключающей группой имеют тип РЭС55А, с двумя – РГК15, высоковольтные реле – RM94P-12. На электрической схеме (рис. 6) электроды кремниевого детектора обозначены диодными символами, пунктирной линией ограничены элементы схемы, расположенные в ЗУ. На схеме обозначены буквами:

- M1, M2, M3 – операционные усилители (ОУ AD820AN, K140УД17А),
- TD – датчик температуры (TMP35 FT9 в корпусе TO92),
- ККОП – контроллер канала общего пользования,
- АУСД – адаптер управления и сбора данных,
- УКУ – устройство контроля и управления состояниями реле,
- ДСЗУ – датчики состояния зондовой установки.

Измерение ВАХ детекторов

Измерение прямой ветви ВАХ детекторов проводится в режиме генератора тока, а обратной – в режиме генератора напряжения с программной установкой величины тока или напряжения. Управление генераторами осуществляется от персонального компьютера с помощью платы цифрового ввода-вывода L-032 и цифроаналогового преобразователя, входящего в состав платы L-154, а измерение аналоговых сигналов на выходах преобразователей и датчика температуры происходит с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП) в составе этой же платы (производитель – АОЗТ «L-card» [4]).

Измеритель тока представляет собой преобразователь ток–напряжение, выполненный на ОУ М1, М2. Преобразование ток–напряжение в диапазоне измерения тока $10^{-10} \div 10^{-4}$ А осуществляется на ОУ М1, на пределах 10^{-3} и 10^{-1} А – на ОУ М2. Схемы защиты обеспечивают защиту входов при токовых перегрузках до 0,1 А непрерывно для ОУ М1 и до 1,7 А для ОУ М2. Измеритель тока является неинвертирующим в диапазоне измерения $10^{-10} \div 10^{-4}$ А и осуществляет инверсию полярности на пределах 10^{-3} и 10^{-1} А. В схеме измерителя применены прецизионные термостабильные резисторы типа МРХМ (10 МОм, $\pm 0,05$ %), С2-29В-2 и специально подобранные по величине с точностью $\sim 1 \div 2$ % высокоомные резисторы типа КЭВ-2.

Параметры генератора тока

1. Величина задаваемого тока, мА	0–10	0–100
2. Дискретность установки тока, мкА	2,5	25
3. Напряжение на выходе генератора не более, В	10	10
4. Полярность выходного тока	любая	

Параметры генератора напряжения

1. Выходное напряжение, В	0–10	5–50	50–500
2. Дискретность установки напряжения, мВ	2,5	12,5	125
3. Полярность выходного напряжения	любая		
4. Время установления не более, с	0,02		
5. Максимальный ток нагрузки, мА	5		

Параметры измерителя тока детекторов

1. Верхний предел измерения тока, А	10^{-10}	10^{-8}	10^{-6}	10^{-4}	10^{-3}
2. Дискретность измерения, А	10^{-12}	10^{-11}	10^{-9}	10^{-7}	10^{-6}
3. Время установления по уровню $0,1 \div 0,9$, мс, не более	50	0,5	0,02	0,01	0,005
4. Полярность измеряемого тока	любая				

Погрешность измерения тока в диапазоне $10^{-8} \div 10^{-1}$ А менее 1 % и определяется в основном точностью резисторов в цепи обратной связи ОУ и дифференциальной нелинейностью АЦП. В диапазоне $10^{-10} \div 10^{-8}$ А погрешность возрастает до 5 %, а в диапазоне $10^{-12} \div 10^{-10}$ А она оценивается величиной ~ 50 %. В последнем случае основной вклад в погрешность вносят токи утечки входных цепей и схемы защиты от перенапряжений по входу ОУ.

В состав измерителя напряжения входят два операционных усилителя М3, М4. Измеритель позволяет контролировать постоянное напряжение любой полярности в диапазоне от 10 мВ до 1000 В, перекрываемый двумя пределами измерения – 10 и 1000 В. Измеритель напряжения реализован в виде последовательно включённых высокоомных резисторов и измерителя тока, выполненного на ОУ М3. ОУ М4 выполняет функцию выходного масштабного усилителя. Погрешность порядка $\pm 0,2$ % измерителя достигается подбором коэффициента усиления масштабного усилителя при одновременном контроле эталонным цифровым вольтметром.

Параметры измерителя напряжения

1. Верхний предел измерения напряжения, В	10	1000
2. Дискретность измерения напряжения, мВ	2,5	25
3. Время установления не более, мс	10	10
4. Полярность измеряемого напряжения	любая	

Измерение ВФХ детекторов

Для измерения ВФХ необходим цифровой измерительный мост, способный измерять ёмкости при высоком напряжении смещения. В качестве такого моста выбран измеритель иммитанса Е7-14. Входные цепи измерителя доработаны так, чтобы обеспечить возможность измерения при постоянном напряжении на измеряемой ёмкости до 500 В. Измеритель имеет два уровня синусоидального измерительного сигнала: $(2 \pm 0,4)$ В и (40 ± 8) мВ действующего значения.

Параметры измерителя ёмкости

1. Частота измерительного сигнала, Гц (с погрешностью установки менее 0,01 %)	100	1000	10 000
2. Напряжение смещения, В	0–500	0–500	0–500
3. Величина измеряемой ёмкости, пФ	1–16 000	1–16 000	1–16 000
4. Полярность напряжения смещения	любая		

Погрешность измерения ёмкости одного полностью обеднённого электрода детектора (величина ~ 40 пФ) на частоте измерительного сигнала 1000 Гц и при малых темновых токах (< 100 нА) составляет величину $\sim (\pm 0,1 \text{ пФ} + S)$, где S – систематическая погрешность (величина $\sim 0,25$ пФ), вызванная паразитной ёмкостью игл зондового устройства по отношению к его корпусу. Она может быть учтена при калибровке, если вместо детектора установить равный по толщине диэлектрик.

Измерение фототока короткого замыкания

В АПК предусмотрена возможность измерения фототока короткого замыкания при подсветке рассеянным светом от светодиодной линейки без калибровки квантового выхода. Эти измерения носят качественный характер и предназначены для контроля электрического контакта игл зондового блока с контактными площадками на электродах детектора. Величина протекающего тока при этом не нормируется. Измерения проводятся при замкнутом на общую шину $p+$ -электроде детектора через резистор величиной 1 кОм.

Управление процессом измерения

Наличие персонального компьютера в составе АПК позволяет создать современный многооконный программный пакет для обслуживания измерений, реализующий преимущества операционной системы MS-Windows. В качестве среды программирования выбрана Delphi, поскольку она имеет в своём составе развитые средства для работы с базами данных, средства автоматизации разработки многооконного графического интерфейса с пользователем и не предъявляет специфических требований к аппаратным средствам реализации интерфейса с оборудованием. Для управления подсистемами АПК применены регистры ввода-вывода в стандарте ISA. Для связи с промышленным измерителем иммитанса E7-14 применён контроллер канала общего пользования (ККОП) минского производства, который реализует программно-аппаратный подход к реализации стандарта IEEE-488.

Программно осуществляется задание режимов измерения, управление процессом измерения и обработка данных. Программное обеспечение позволяет осуществлять:

- выбор режима измерений (ВАХ прямой или обратной ветви, ВФХ, долговременная стабильность тока при заданном постоянном обратном смещении, измерение фототока короткого замыкания и т.д.),
- отображение результатов измерений на экране монитора в цифровом и графическом виде,
- ведение базы данных результатов измерений всех параметров и их первичной обработки.

Для всех режимов измерений обеспечивается программируемое ограничение максимально допустимых величин напряжения на детекторе и тока детектора в

дополнение к аппаратной аварийной защите от короткого замыкания цепи детектора. Программный пакет АПК состоит из четырёх основных программ:

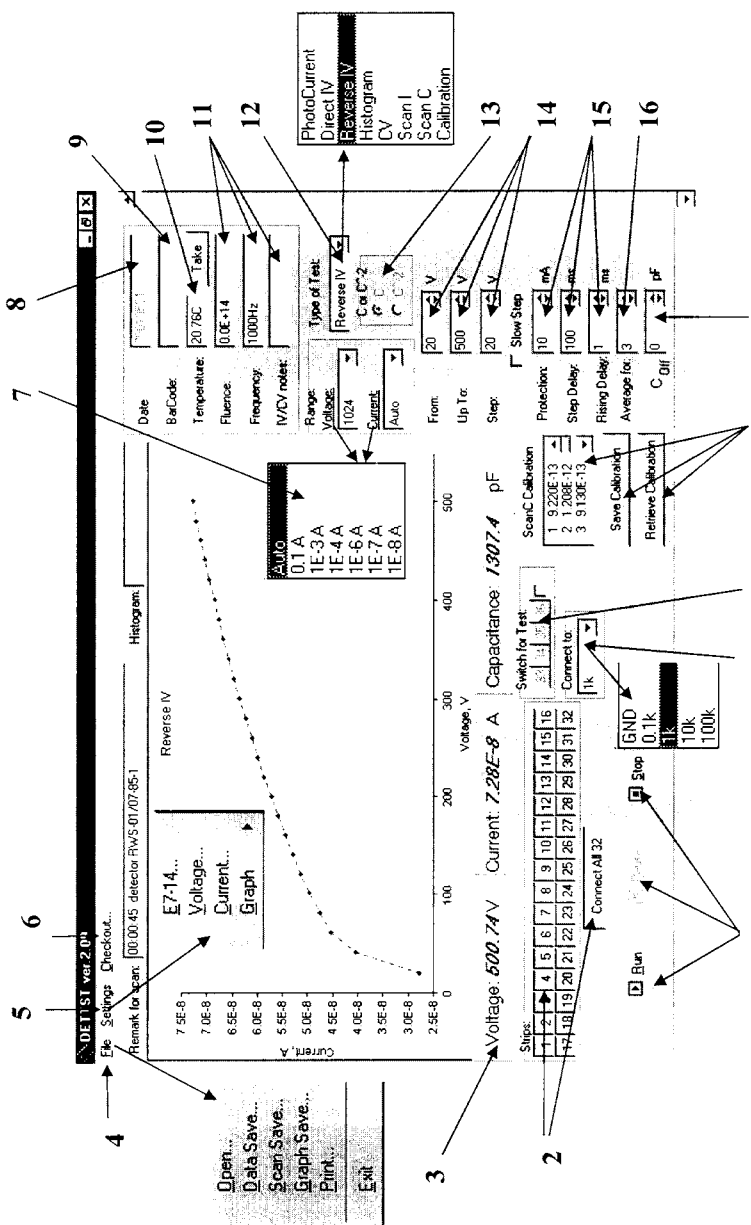
- DETTST.EXE – управление процессом электрических измерений (ВАХ, ВФХ и т.д.);
- SEN_SUM.EXE – первичная обработка данных измерений, представление данных в графическом виде, создание Detector Summary (DS) File;
- LPP_DB.EXE – работа с базой данных (занесение и просмотр данных измерений, ведение списка детекторов, сортировка детекторов по параметрам и т.д.);
- STABILITY.EXE – измерение долговременной стабильности темнового тока детекторов при задаваемом постоянном обратном смещении.

Меню программного обеспечения позволяет управлять следующими основными режимами аппаратной части при производстве измерений:

- величиной скорости нарастания ступенчатого напряжения обратного смещения,
- величиной временной задержки между моментом измерения тока или ёмкости детектора и моментом окончания нарастания напряжения смещения с целью устранения влияния переходных процессов,
- начальным и максимальным напряжениями смещения при измерении ВАХ или ВФХ,
- номерами сканируемых электродов детектора при измерении,
- количеством циклов считывания величины тока или ёмкости для последующего усреднения.

Интерфейс программы DETTST.EXE для управления процессом электрических измерений представлен на рис. 7. Цифрами обозначены:

- 1 – кнопки запуска, приостановки и завершения измерения;
- 2 – кнопки выбора номеров подключаемых электродов детектора;
- 3 – окно отображения значений текущих измерений*;
- 4 – окно управления файлами данных (запись, считывание и т.д.);
- 5 – окно инициализации АПК и настройки режимов измерителя иммитанса E7-14;
- 6 – окно отображения состояний (вкл./выкл.) всех реле АПК (не развёрнуто);
- 7 – окно выбора пределов измерения тока и напряжения;
- 8 – окно отображения даты и времени*;
- 9 – окно введения номера штрихкода измеряемого детектора*;
- 10 – окно отображения температуры в ЗУ, измеряемой датчиком*;
- 11 – окна введения дополнительной информации*;
- 12 – окно выбора режимов измерений;
- 13 – окно выбора способа отображения ВФХ, т.е. $C = f(U)$ или $C^{-2} = f(U)$;
- 14 – окна задания начального, конечного и шага приращения напряжения;
- 15 – окна задания параметров временной диаграммы при измерении;
- 16 – окно задания количества повторяемых циклов измерений для последующего усреднения;



1 20 19 18 17

Рис. 7. Интерфейс программы DETST.EXE

- 17 – окно введения паразитной ёмкости (вычитается из текущего значения);
- 18 – окно и кнопки для отображения и редактирования калибровочных данных ВФХ;
- 19 – кнопки выбора подключаемых образцовых резисторов и ёмкостей для проверки и калибровки АПК;
- 20 – окно выбора способа подключения р+-электродов детектора к нулевой шине.

Примечание: значком «*» обозначены параметры, передаваемые в выходной файл данных измерений.

Настройка параметров временной диаграммы при измерении ВАХ необходима для предотвращения искажений, вызванных наличием электрических переходных процессов в схеме АПК при коммутациях реле и работе регулятора напряжения. Может потребоваться индивидуальная настройка для конкретного детектора, если сама природа измеряемого тока во времени имеет особенности. На рис. 8 представлена временная диаграмма при измерении ВАХ для стандартного режима сканирования токов р+-электродов детектора при ступенчатом поднятии напряжения от изначально задаваемого U_{start} до конечного U_{max} . Оператор, пользуясь окном 15 (см. рис. 7), может регулировать скорость нарастания ступенчатого напряжения обратного смещения детектора и управлять моментом

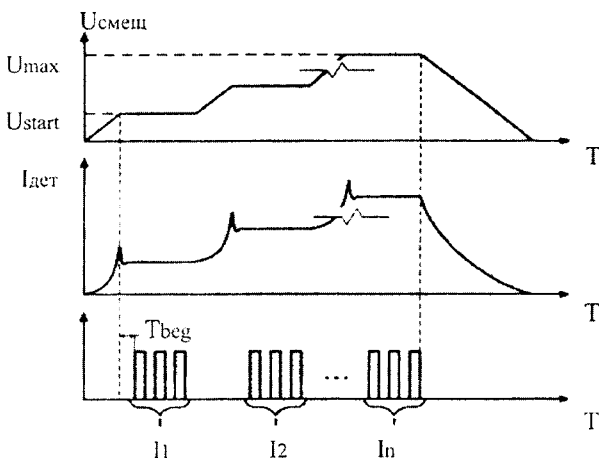


Рис. 8. Временная диаграмма при измерении ВАХ для стандартного режима измерения

начала (T_{beg}) циклов измерений тока электрода детектора I_n . Скорость нарастания напряжения смещения влияет на величину выброса тока электрода детектора при переходном процессе. Критерием правильности настройки служит отсутствие дальнейших изменений величины измеренного тока при возрастании T_{beg} .

В режиме измерения ВФХ предусмотрена возможность отображения обратного квадрата измеряемой ёмкости в зависимости от напряжения смещения и последующего вычисления напряжения полного обеднения. При выборе в окне 13 (см. рис. 7) такого способа отображения появляется дополнительное окно с изображением графика зависимости $C^{-2} = f(U)$, в котором восходящая и горизонтальная часть ВФХ фитируется двумя прямыми линиями методом наименьших квадратов, а напряжение полного обеднения вычисляется как координата точки их пересечения (рис. 9). Области фитирования обеих линий выбираются оператором с помощью мыши.

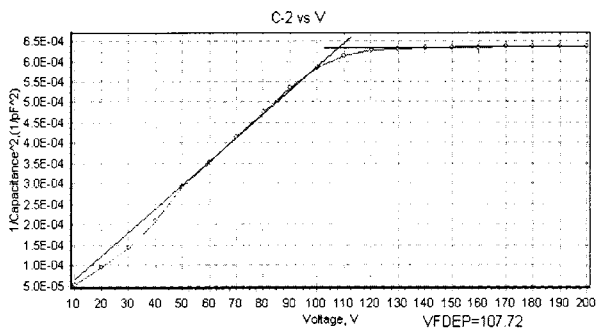


Рис. 9. Вычисление напряжения полного обеднения детектора по графику ВФХ

Стандартный режим измерения детекторов

Под «стандартным» режимом понимается такой режим измерений, который обеспечивает выполнение требований спецификации на детектор с достаточной точностью и не ухудшает производительность установки. Такой режим должен позволить определить напряжение пробоя каждого электрода детектора, которое не должно превышать 300 В, и напряжение полного обеднения, имеющее для исходного кремния с удельным сопротивлением $3 \div 4$ кОм·см и толщиной готового детектора (320 ± 10) мк величину $\sim 70 \div 110$ В. За напряжение обеднения детектора принимается максимальное напряжение полного обеднения среди его электродов. Подробные измерения ВАХ и ВФХ с малым шагом приращения смещения увеличивают точность определения этих параметров, но снижают производительность измерений, поэтому в качестве компромиссного выбран режим измерения, при котором ВАХ измеряется от 25 до 500 В с шагом приращения 25 В, а ВФХ от 10 до 150 В с шагом 10 В. После подъёма напряжения смещения на величину шага приращения происходит последовательное, в соответствии с номером электрода, подключение его к измерителю тока или ёмкости, т.е. происходит сканирование электродов по току или ёмкости. Результат измерения ВАХ и ВФХ записывается в выходной файл в кодах ASCII в форме таблицы, где первый столбец представляет напряжение смещения, столбцы с номерами от 2 до

33 – ток или ёмкость каждого отдельного электрода в амперах или фарадах. Два последних столбца с номерами 34 и 35 представляют собой величины токов или ёмкостей, измеренных при одновременном подключении всех электродов детектора к измерителям, т.е. результат измерений со всей пластины детектора и, соответственно, алгебраическую сумму токов или ёмкостей, измеренных отдельно для каждого из электродов. Имя каждого выходного файла с данными измерений ВАХ или ВФХ начинается с префикса «IV» или «CV», затем следует 14-значный номер штрихкода, содержащий информацию о типе пластины кремния, из которой изготовлен детектор, номере партии пластин и дате изготовления детектора, например, «33301011718125». Расширение типа файла «.DAT» добавляется автоматически. Размер файла ВАХ составляет 6,74 кбайт, ВФХ – 5,76 кбайт. Файлы содержат также дополнительную информацию о температуре, дате и времени, толщине детектора и комментарий. Пример выходных файлов измерения ВАХ и ВФХ приведён в приложениях А и Б соответственно.

Первичная обработка данных измерений

Программа SEN_SUM.EXE считывает с носителей информации данные электрических измерений и представляет их в графическом виде – ВАХ и ВФХ электродов детектора, а также распределение токов и ёмкостей по электродам при задаваемом напряжении. Программа производит первичную обработку результатов измерений – вычисляет напряжение обеднения каждого р+-электрода, величину темнового тока электрода при напряжении обеднения, величину напряжения пробоя и т.д. и представляет распределение напряжения полного обеднения и напряжения пробоя по электродам детектора в виде графика и гистограммы. Результат работы программы записывается в коде ASCII в так называемый DS-файл (Detector Summary file) в виде таблицы (см. приложение В). В первом столбце выходного DS-файла содержится номер электрода детектора, во втором – напряжение полного обеднения электрода, в третьем и четвёртом – темновой ток электрода при напряжении полного обеднения и при смещении 300 В соответственно, в пятом – напряжение пробоя. В шестом и седьмом столбцах представлены шумовые свойства детектора и электроники считывания, измеряемые отдельно на специальной установке в виде распределения по электродам среднеквадратичного уровня шума в каналах АЦП [5]. Уровень шума «детектор + электроника считывания», приведённый к входу зарядочувствительного усилителя в форме эквивалентного количества электронов, может быть вычислен после измерения коэффициента усиления электроники. Поскольку при шумовых измерениях используется один и тот же вариант электроники считывания, уровень шумов которой может быть легко измерен, вклад детектора в полный уровень шума может быть вычислен.

Полное имя файла складывается из префикса «DS», номера штрихкода, присвоенного детектору, и расширения типа файла «.dat», например, «DS33301011718125.dat». Таким образом, DS-файл содержит обобщённую

характеристику детектора, на основе которой делается вывод о его соответствии требованиям спецификации.

Вычисление тока электрода при любой заданной величине напряжения смещения происходит при помощи интерполяции ВАХ полиномом 3-й степени методом наименьших квадратов. Напряжение пробоя электрода определяется как напряжение, при котором производная тока по напряжению превышает допустимую величину, принятую как критерий начала пробоя по требованиям спецификации, именно $(dI/dV) > 0,01$ мкА/В. Вычисление напряжения полного обеднения производится по зависимости $C^{-2} = f(U)$ аналогично процедуре, описанной в разделе «Управление процессом измерения».

База данных

Отбор детекторов по напряжению полного обеднения, напряжению пробоя, темновому току и толщине детектора необходим для их оптимального размещения по радиусу предливневой части калориметра с точки зрения оптимизации эксплуатационных свойств кремниевых детекторов при работе совместно с применяемой электроникой считывания. Для расширения динамического диапазона зарядочувствительный усилитель электроники считывания имеет два коэффициента усиления – более высокий для больших радиусов и менее высокий для малых [6]. Флюенс быстрых нейтронов вдоль радиуса предливневой части калориметра [7] меняется от 2×10^{13} до $1,5 \times 10^{14}$ см⁻² по истечении 10 лет эксплуатации коллайдера. Пропорционально флюенсу возрастает темновой ток детекторов, что приводит к ухудшению соотношения сигнал–шум, поэтому детекторы с большим начальным током до начала эксплуатации рациональнее размещать на малых радиусах.

По мере роста флюенса адронов и накопления радиационных повреждений у детекторов сначала происходит уменьшение напряжения полного обеднения до момента наступления инверсии типа проводимости, затем начинается его возрастание [8]. Предполагается, что детекторы должны работать при полном обеднении и при максимально достижимой эффективности сбора заряда, определяемой рабочим напряжением. Соответственно этому требованию детекторы отбираются в группы по напряжению эксплуатации, чтобы минимизировать число высоковольтных источников питания для обратного смещения детекторов. Величина собираемого заряда при регистрации минимально-ионизирующих частиц пропорциональна толщине детектора, по этой причине необходимо отбирать детекторы по толщине. Более тонкие детекторы рациональнее применять на меньших радиусах, где ожидаемый уровень сигнала выше. Всё перечисленное привело к необходимости иметь специальные возможности для отбора детекторов по нескольким параметрам. С этой целью была создана сетевая база данных (СБД) типа клиент–сервер на платформе Interbase [9]. Система управления базой данных (СУБД) реализована в среде программирования Delphi в виде специализированного интерфейса пользователя СБД. С его помощью в СБД заносятся данные измерений ВАХ и ВФХ детектора, а также данные первичной обработки результата измерений. Поля записи представлены в виде строк, содержащих дополнительные

сведения о детекторе, и столбцов со значениями данных измерений и их обработки. Помимо занесения данных в СБД интерфейс программы LPP_DB.EXE позволяет ведение списка детекторов, поиск данных измерений детектора по задаваемым параметрам, просмотр содержимого IV-, CV-, DS-файлов и т.д. Важной особенностью программы является возможность производить отбор группы детекторов по задаваемым параметрам, тем самым реализован упрощённый аналог работы языка Structural Query Language (SQL). В качестве примера на рис. 10 показан вид интерфейса программы для получения списка детекторов, произведенных в России в период с января 2002 г., имеющих напряжение полного обеднения в пределах от 25 до 150 В, темновой ток менее 2 нА при смещении 300 В, напряжение пробоя более 300В, толщину от 290 до 310 микрон и ширину в пределах от 62950 до 63050 мк, изготовленных из кремниевых пластин с двусторонней полировкой, поставляемых фирмой WACKER Siltronic Ltd. Результат отбора группы детекторов по перечисленным параметрам представлен в виде списка детекторов с их штрихкодами, как это изображено на рис. 11. Список и перечень параметров, по которым отбирались детекторы в базе данных, может быть записан в отдельный файл.

<input checked="" type="checkbox"/> Full depletion voltage from V:	<input type="text" value="25"/>	to V:	<input type="text" value="150"/>		
<input checked="" type="checkbox"/> Break down voltage from V:	<input type="text" value="300"/>	to V:	<input type="text" value="500"/>		
<input type="checkbox"/> Current at FDV from, nA:	<input type="text" value="10"/>	to, nA:	<input type="text" value="1000"/>		
<input type="checkbox"/> Current at FDV +150 V from, nA:	<input type="text" value="10"/>	to, nA:	<input type="text" value="1000"/>		
<input checked="" type="checkbox"/> Current at V: <input type="text" value="300"/> from, nA:	<input type="text" value="20"/>	to, nA:	<input type="text" value="2000"/>		
<input checked="" type="checkbox"/> Thickness from, mcm:	<input type="text" value="290"/>	to, mcm:	<input type="text" value="310"/>		
<input checked="" type="checkbox"/> Date of production from (m/y):	<input type="text" value="1"/> <input type="text" value="2"/>	to:	<input type="text" value="1"/> <input type="text" value="5"/>		
<input type="checkbox"/> Fluence from, cm ⁻² :	<input type="text" value="0"/>	to, cm ⁻² :	<input type="text" value="0"/>		
<input type="checkbox"/> Frequency, Hz:	<input type="text" value="0"/>	to, Hz:	<input type="text" value="1000000"/>		
<input type="checkbox"/> Noise from, eV:	<input type="text" value="0"/>	to, eV:	<input type="text" value="1000000"/>		
<input checked="" type="checkbox"/> Russia	<input type="checkbox"/> Greece	<input type="checkbox"/> CERN	<input type="checkbox"/> India	<input type="checkbox"/> Taiwan	<input type="checkbox"/> another
<input type="checkbox"/> Wacker SS	<input checked="" type="checkbox"/> Wacker DS	<input type="checkbox"/> Topsil SS	<input type="checkbox"/> Topsil DS	<input type="checkbox"/> another	
<input checked="" type="checkbox"/> Sensor width from, mcm:	<input type="text" value="62950"/>	to, mcm:	<input type="text" value="63050"/>		

Рис. 10. Интерфейс программы LPP_DB.EXE для работы с сетевой базой данных в режиме отбора детекторов по параметрам

Num.	Barcode	Vfd, V	Ifd, A	Ifd+150V, A	Iat150V, A	Cat150V, F	Vbd, V	Thick., mkm
1	33301011416215	55.42	1.452E-7	1.672E-7	1.610E-7	1.3826E-9	399.7	306
2	33301011215619	53.91	1.159E-7	1.705E-7	1.563E-7	1.3838E-9	350.2	300
3	33301010041917	85.74	1.042E-7	5.746E-7	3.031E-7	1.3725E-9	360	307

Рис. 11. Результат отбора группы детекторов по перечисленным параметрам

Вычисление величины тока электрода детектора при заданном напряжении производится при помощи фитирования ВАХ кубическим сплайном по четырём последовательным точкам на графике ВАХ. В целях убыстрения работы с базой данных предусмотрена возможность ввода штрихкода, который наносится на упаковку детектора, с помощью лазерного сканера типа MS300-1, подсоединённого к персональному компьютеру через последовательный порт RS-232.

Производительность измерений

Для стандартного режима измерений был проведён хронометраж действий оператора и АПК, результат которого представлен в таблице 1. В хронометраж не включена работа с базой данных CRISTAL в ЦЕРН.

Таблица 1

Операция	Длительность, мин
Тестирование и подготовка АПК к работе, калибровка	3
Транспортировка детектора от места хранения и обратно, визуальный осмотр качества скрайбирования (микроскоп), упаковка, нанесение штрихкода, ведение учётной записи измерения, юстировка детектора в ЗУ	10
Измерение толщины детектора в 9 точках с последующим усреднением, ведение электронной таблицы данных	6
Измерение фототока короткого замыкания	2
Измерение ВАХ	21
Измерение ВФХ	23
Обработка результатов измерений, т.е. создание DS-файла	10
Работа с базой данных (запись результатов измерений)	2
ИТОГО:	77

Долговременная стабильность детекторов

Для исследования долговременной стабильности поведения темного тока детекторов при обратном смещении создана программа, реализующая

сканирование величин токов электродов детектора через равные промежутки времени при постоянном обратном смещении на детекторе.

Заключение

В Лаборатории физики частиц ОИЯИ разработан и реализован аппаратно-программный комплекс для контроля электрических параметров кремниевых 32-стриповых детекторов при их массовом производстве. Параметры и производительность АПК соответствуют требованиям эксперимента CMS. Применение АПК позволяет решить проблему входного контроля большого количества кремниевых стриповых детекторов для применения в составе торцевой части электромагнитного калориметра эксперимента CMS. Высокие эксплуатационные качества и надёжность работы АПК подтверждены при тестировании более 800 детекторов.

Приложение А

IV Measurement								
Barcode=33301011718125			DateIV=20010625	TempIV=20.76C	FluenceIV=0.0E+14			
Remark: 00:26:01 301mcm								
Voltage	Strip1	Strip2	Strip3	...	Strip31	Strip32	StripAll	StripSum
2.501E+01	9.18E-09	9.13E-09	9.28E-09	...	6.33E-09	7.77E-09	2.46E-07	2.25E-07
5.019E+01	1.30E-08	1.28E-08	1.29E-08	...	8.44E-09	1.22E-08	3.37E-07	3.11E-07
7.520E+01	1.37E-08	1.33E-08	1.33E-08	...	8.67E-09	1.77E-08	3.53E-07	3.27E-07
...
4.752E+02	1.64E-08	1.60E-08	1.60E-08	...	1.02E-08	1.62E-07	6.38E-07	6.01E-07
4.997E+02	1.66E-08	1.62E-08	1.62E-08	...	1.03E-08	1.75E-07	7.66E-07	7.29E-07

Приложение Б

CV Measurement							
Barcode=33301011718125		DateCV=20010625	TempCV=20.76C	Freq=1000Hz	FluenceCV=0.0E+14		
Remark: 00:21:19 301mcm							
Voltage	Strip1	Strip2	...	Strip31	Strip32	StripAll	StripSum
1.000E+01	1.212E-10	1.195E-10	...	1.132E-10	1.164E-10	3.6777E-09	3.6898E-09
2.001E+01	8.150E-11	7.638E-11	...	7.486E-11	7.868E-11	2.4357E-09	2.4360E-09
3.051E+01	6.341E-11	5.902E-11	...	5.885E-11	6.300E-11	1.9119E-09	1.9001E-09
...
1.401E+02	4.627E-11	4.270E-11	...	4.360E-11	4.655E-11	1.3982E-09	1.3872E-09
1.501E+02	4.624E-11	4.268E-11	...	4.358E-11	4.653E-11	1.3978E-09	1.3868E-09

Приложение В

Detector Summary						
Barcode=33301011718125		Thickness=301	DateIV=20010625	TempIV=20.76C	Fluence=0.0E+14	
		FreqCV=1000Hz	DateCV=20010625	TempCV=20.76C	DateNoise=20010626	
		TempNoise=21.01	NbNoisyUfd=0	NbNoisy300V=0	Remark: Detector summary for Russian detector RWS-01/05-81-25, produced in May 2001	
Strip#	Vfd	Ifd	Id at 300V	Vbkdw	NoiseVfd	Noise300V
0	5.55E+01	3.44E-07	4.04E-07	5.00E+02	0.00E+00	0.00E+00
1	5.55E+01	1.34E-08	1.42E-08	5.00E+02	41.94	53.577
2	5.44E+01	1.30E-08	1.39E-08	5.00E+02	39.051	47.358
3	5.46E+01	1.31E-08	1.39E-08	5.00E+02	40.576	49.54
4	5.45E+01	1.30E-08	1.38E-08	5.00E+02	41.804	51.556
5	5.47E+01	1.29E-08	1.38E-08	5.00E+02	41.066	48.199
...
29	5.38E+01	8.27E-09	8.76E-09	5.00E+02	35.01	36.587
30	5.36E+01	8.40E-09	1.01E-08	5.00E+02	32.985	36.989
31	5.33E+01	8.53E-09	8.99E-09	5.00E+02	44.291	36.64
32	5.45E+01	1.30E-08	5.15E-08	5.00E+02	41.099	37.672
33	5.43E+01	3.43E-07	4.03E-07	5.00E+02	0.00E+00	0.00E+00

Литература

- [1] R. Loos et al., CMS ECAL Preshower and Endcap Engineering Design Review, Volume 2: Preshower, November 2000.
- [2] A. Peisert, N. Zamiatin, Silicon sensors for the CMS Preshower, CMS NOTE-2000/061.
- [3] A. Go, A. Peisert, Preshower Silicon Production Sequence and Database, CMS-IN 2000-049.
- [4] <http://www.lcard.ru>.
- [5] Ph. Bloch et al., Noise measurements on Si sensors, Nucl. Instr. and Meth. A479 (2002) 265.
- [6] P. Aspell et al., Delta: A Charge Sensitive Front-End Amplifier with Switched Gain For Low Noise, Large Dynamic Range Silicon Detector Readout, CMS CR-2001/001.
- [7] CMS collaboration, The Electromagnetic Calorimeter Project, Technical Design Report, CERN-LHCC 97-33.
- [8] I. Golutvin et al., Radiation Hardness of Silicon Detectors for Collider Experiments. JINR Preprint E14-95-97, Dubna, 1995.
- [9] <http://www.interbase.com>.

Получено 3 ноября 2003 г.

Голутвин И. А. и др.
Аппаратно-программный комплекс
для измерения электрических статических параметров
стриповых кремниевых детекторов

P13-2003-203

Описывается автоматизированный аппаратно-программный комплекс (АПК) для контроля статических электрических параметров кремниевых стриповых детекторов, применяемых в составе торцевой части электромагнитного калориметра эксперимента CMS. Применение АПК позволяет решить проблему входного контроля большого количества кремниевых детекторов при их массовом производстве — 1800 детекторов в течение двух лет. Программная часть АПК реализована в среде программирования Delphi и содержит удобный интерфейс оператора для обработки и визуализации данных измерений, а также современные развитые средства под управлением MS-Windows для работы с сетевой базой данных. Высокие эксплуатационные качества и надежность работы АПК подтверждены при тестировании более 800 детекторов. Технические решения, реализованные в АПК, могут быть полезны при проектировании и создании автоматизированных аппаратов для контроля электрических параметров микростриповых детекторов.

Работа выполнена в Лаборатории физики частиц ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2003

Перевод авторов

Golutvin I. A. et al.
A Test-Bench for Measurement of Electrical Static Parameters
of Strip Silicon Detectors

P13-2003-203

An automated test-bench for electrical parameters input control of the strip silicon detectors, used in the End-Cap Preshower detector of the CMS experiment, is described. The test-bench application allows one to solve a problem of silicon detectors input control in conditions of mass production — 1800 detectors over 2 years. The test-bench software is realized in Delphi environment and contains a user-friendly operator interface for measurement data processing and visualization as well as up-to-date facilities for MS-Windows used for the network database. High operating characteristics and reliability of the test-bench were confirmed while more than 800 detectors were tested. Some technical solutions applied to the test-bench could be useful for design and construction of automated facilities for electrical parameters measurements of the microstrip detectors input control.

The investigation has been performed at the Laboratory of Particle Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2003

Редактор *О. Г. Андреева*
Макет *Е. В. Сабоевой*

Подписано в печать 05.12.2003.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,38. Уч.-изд. л. 1,87. Тираж 325 экз. Заказ № 54204.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/