

рис. 1а, микроплазмы для однородных образцов распределяются в сравнительно узком интервале напряжений. При этом значение перенапряжения на первой микроплазме  $\Delta U \leq 30$  В. В потенциально ненадежных элементах количество микроплазм возрастало с двух-трех до пяти-шести, и располагались они в более широкой области напряжений  $\Delta U \geq 100$  В (рис. 1б), поэтому в качестве контрольного параметра было выбрано значение перенапряжения на первой микроплазме  $\Delta U$ , либо разность между напряжениями включения первой и второй микроплазмы  $\Delta U_1$  (рис. 1а,б). Исследованные элементы подвергались наработке электрическим током, что позволило выявить высокую вероятность отказа ( $P > 0,5$ ) в группе образцов с высокими значениями  $\Delta U$  и  $\Delta U_1$ .

Другим эффективным методом прогнозирования надежности является измерение низкочастотного шума, который обычно связывается с дефектами структуры, состоянием поверхности и контактов. Измерялось среднее квадратическое значение флуктуаций обратного тока в диапазоне напряжений 200...900 В. Коэффициент корреляции флуктуаций и  $\Delta U$  оказался равным 0,85.

Причины понижения напряжения пробоя до значения 300...400 В, а также возникновения "мягкой" обратной ВАХ изучались с целью диагностики брака. Для диагностики использовались четырехзондовый метод измерения удельного сопротивления, измерения вольт-фарадных характеристик, послонное и селективное травление, измерение тока, индуцированного световым зондом.

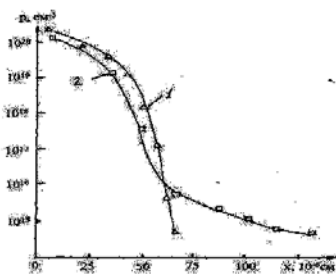


Рисунок 2 – Распределение концентрации дырок в  $p$ -области для контрольного (1) и бракованного (2) выпрямительных элементов

С помощью четырехзондового метода при послонном травлении установлено, что причиной понижения напряжения пробоя является

аномальная диффузия бора по дислокациям (рис. 2). Установлено прямыми наблюдениями, что причиной "мягкой" ВАХ являются локальные дефекты механической обработки.

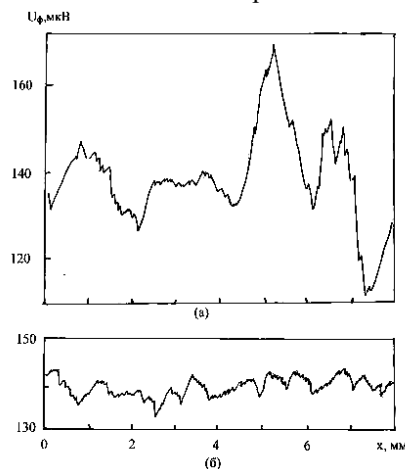


Рисунок 3 – Распределение фото-ЭДС на межфазовой границе полупроводник-электролит (а – кремниевая пластина с неоднородным распределением электрофизических параметров; б – контрольная пластина)

В работе показана возможность применения метода измерения фотоЭДС на межфазовой границе полупроводник-электролит для неразрушающего входного и операционного контроля полупроводниковых пластин и структур, используемых в производстве силовых диодов. Их особенностью является наличие поверхностного нарушенного слоя. Метод измерения фотоЭДС, однако, дает хорошие результаты на пластинах с удаленным нарушенным слоем. Применение аммиачно-перекисной отмывки кремниевых пластин, поступающих в производство, а также выпрямительных элементов позволило выявить на излучении  $He-Ne$  лазера с длиной волны  $\lambda = 0,63$  мкм образцы с макрофлуктуациями сигнала до  $\pm 30$  % на длине 1 мм (рис. 3). Исследование влияния длины волны излучения показали, что при  $\lambda = 0,8$  мкм, что соответствует ширине запрещенной зоны кремния, величина фотоЭДС возрастает в 7...8 раз. Такие измерения с высоким соотношением сигнал-шум можно также проводить с использованием интерференционного фильтра или источника "белого" света.

УДК 621.039.58

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БАЗОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ РЕГИСТРАЦИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Гришин С.А., Селянтьев В.А., Климов Я.А., Климова Д.А.

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Республика Беларусь

Создание многоканальных спектрометрических комплексов мониторинга ионизирующих излучений требует тщательных и всесторонних исследований и изучения основных базовых

элементов (сцинтилляторов, фотоприемных устройств, микроконтроллеров, ПЛИС, систем на кристаллах, алгоритмических и программных

средств), на основе которых эти комплексы разрабатываются [1–2].

Для изучения работы базовых элементов многоканальных спектрометров нами была разработана и изготовлена система регистрации ионизирующих излучений, структурная схема и внешний вид которой представлены на рис.1 и рис.2.

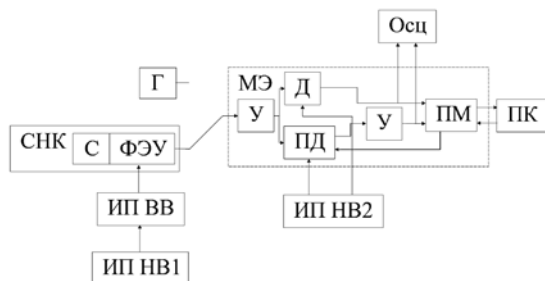


Рисунок 1 – Структурная схема системы регистрации ионизирующих излучений

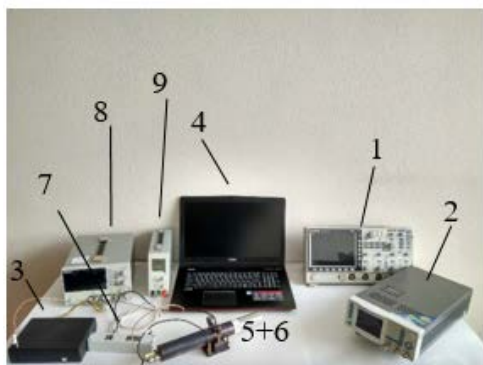


Рисунок 2 – Система регистрации ионизирующих излучений

В состав системы регистрации входят: Осц (1) – осциллограф; Г (2) – генератор; МЭ (3) – модуль электроники с дискриминатором (Д), пиковым детектором (ПД), усилителем (У), процессорным модулем (ПМ); ПК (4) – персональный компьютер; С (5) – сцинтиллятор; ФЭУ (6) – фотоэлектронный умножитель; ИП ВВ (7) – источник питания высоковольтный; ИП НВ1,2 (8,9) – источники питания низковольтные.

ФЭУ и сцинтилляторы размещаются в светонепроницаемом корпусе (СНК). Генератор служит для исследования характеристик Д и ПД, осциллограф - для измерений напряжений и исследования формы сигналов, мультиметр - для контроля уровня высокого напряжения, подаваемого на ФЭУ.

МЭ состоит из аналоговых и цифровых схем и процессорного блока на базе микроконтроллера (ПМ).

Аналоговые схемы усиливают сигналы ФЭУ и осуществляют пиковое детектирование, удерживая значение амплитуды импульсного сигнала неизменным на время работы аналогово-цифрового преобразователя (АЦП).

Цифровые схемы реализуют амплитудный дискриминатор (Д), который формирует цифровой

импульс при превышении сигнала заданного порога, и цифровой ключ, который необходим для перевода ПД в режим слежения. Значения порогов подбираются экспериментально с учетом уровней шумов и помех.

Для оцифровки сигналов, обработки накопления и пересылки данных на ПК используется процессорный модуль (ПМ) на базе микроконтроллера. ПМ имеет встроенный АЦП, который запускается дискриминатором при появлении импульса. После накопления данных ПМ отправляет их на ПК, где происходит их дальнейшая обработка и визуализация на экране монитора в виде графиков спектров.

Блок-схема алгоритма работы ПМ представлена на рисунке 3. До поступления сигнала дискриминатора контроллер находится в режиме ожидания. При поступлении сигнала с дискриминатора запускается АЦП. По окончании цикла преобразования АЦП вырабатывает сигнал «сброс», который поступает на ПД для перевода АЦП в режим слежения и записи данных с АЦП в буфер. После записи в буфер ожидается окончание сигнала «сброс» ПД. При заполнении буфера данные пересылаются на ПК для дальнейшей их обработки и визуализации на экране монитора, затем процесс повторяется.

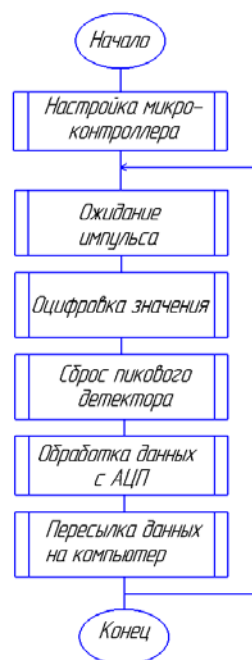


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма работы микроконтроллера

Разработанное программное обеспечение (ПО) верхнего уровня служит для задания режимов работы, обработки принимаемых данных (с использованием методов статистики, аппроксимации, фильтрации и амплитудного анализа) и их визуализации на экране монитора. ПО совместимо по протоколу передачи и формам представления информации с ПО комплекса

средств тестирования многоканального бортового спектрометра [3].

С использованием системы регистрации ионизирующих излучений и ПО проведены исследования характеристик различных типов сцинтилляторов (NaI(Tl), CsI, пластиковые сцинтилляторы), ФЭУ (ФЭУ-85, ФЭУ-60, Hamamatsu R5611 и др.), усилителей сигналов при их различных сочетаниях в виде устройств «сцинтиллятор + ФЭУ+ усилитель».

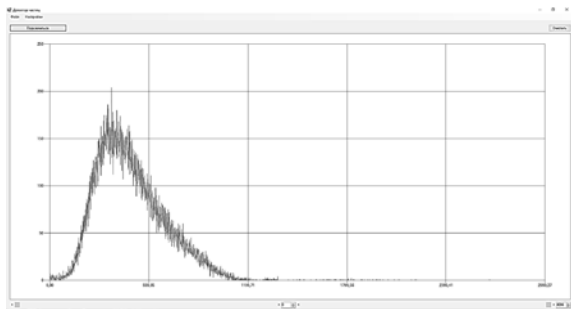


Рисунок 4 – Амплитудное распределение фонового излучения при исследовании устройства «сцинтиллятор NaI(Tl)+ФЭУ-85+усилитель»

В ходе проведения экспериментов

- исследовалось влияние температуры,
- определялись уровни темновых токов,
- оценивалось влияние контактного слоя «сцинтиллятор-ФЭУ»,
- подбирались и исследовалась элементная база (ОУ, диоды, микроконтроллеры и др.),
- находились оптимальные значения порогов для дискриминатора,
- дорабатывалось и отлаживалось ПО,
- строились и анализировались спектры излучений.

В качестве иллюстрации работы ПО, на рисунке 4. представлен спектр, полученный при

исследовании устройства «сцинтиллятор NaI(Tl)+ФЭУ-85+усилитель».

#### Выводы:

1. Разработана система регистрации ионизирующих излучений.
2. Разработано тестовое программное обеспечение, позволяющее оперативно задавать параметры испытаний и режимы работы, проводить экспресс обработку сигналов и их амплитудный анализ.
3. С использованием разработанной системы регистрации и программного обеспечения проведены экспериментальные исследования различных типов ФЭУ, сцинтилляторов и микросхем, позволившие найти оптимальные сочетания элементов для устройств «сцинтиллятор + ФЭУ+ электроника», что крайне важно для создания интеллектуальных детекторных модулей регистрации ионизирующих излучений.

1. Аппаратно-программные средства для наземной обработки бортовых спектрометров заряженных частиц / А.Г. Батищев [и др.] // Журнал «Ядерная физика и инжиниринг». - 2014, том 5. - №3. - С. 247-256.
2. Пейтон А. Дж. Аналоговая электроника на операционных усилителях : справ. пособие / А. Дж. Пейтон, В. Волш. – М.: БИНОМ, 1994. – 352 с.
3. Гришин С.А., Селянтьев В.А., Недвецкий Н.С., Киселева Д.А. Программное обеспечение для работы с экспериментальным образцом комплекса средств тестирования блоков бортового сцинтилляционного спектрометра заряженных частиц в околоземном и космическом пространстве. Национальный центр интеллектуальной собственности Свидетельство № 968 от 29.08.2017.

E-mail: grs@mail@mail.ru

УДК 621.317.422:593.816.2:621.318.1

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ ТЕСТИРОВАНИЯ ДЛЯ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЙ БЛОКОВ МНОГОСЛОЙНОЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОЙ ДЕТЕКТОРНОЙ СИСТЕМЫ

Гришин С. А.<sup>1</sup>, Селянтьев В. А.<sup>1</sup>, Недвецкий Н. С.<sup>1</sup>, Волкович М.Н.<sup>1</sup>, Климентовский В.В.<sup>1</sup>, Колдашов С. В.<sup>2</sup>, Александрин С. Ю.<sup>2</sup>, Батищев А. Г.<sup>2</sup>, Гальпер А. М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Для бортовой научной аппаратуры космических аппаратов (КА) характерна высокая стоимость ее доставки к месту функционирования и, во многих случаях, невозможность устранения неполадок после запуска. Приоритетной задачей при создании такой аппаратуры является снижение риска возникновения отказов. Традиционно это подразумевало проведение большого объема наземных испытаний, как отдельных блоков, так и всей аппаратуры КА, на что затрачивалось много времени и средств. В условиях

современного рынка космических услуг важными требованиями, предъявляемыми к бортовой космической аппаратуре и наземным системам, являются снижение их стоимости и сокращение сроков разработки. Таким образом, существует необходимость в создании современных автоматизированных систем для проведения наладки, наземных испытаний и калибровки бортовой научной аппаратуры КА [1–2]. ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси совместно с