

А. В. КОСУЛЯ¹, д. т. н. В. Г. ВЕРБИЦКИЙ²

Украина, ¹Киевский национальный университет имени Тараса Шевченка,
²НТУУ «Киевский политехнический институт»

E-mail: alexandr250990@mail.ru, v.g.verbitskiy@gmail.com

ПРИБОР ДЛЯ ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА СОСТАВА МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРА МАСС

Разработана структура и основные функциональные узлы прибора-анализатора многоэлементных веществ в масштабе реального времени, который позволяет за короткое время и с высокой точностью проводить анализ материалов.

Ключевые слова: масс-спектрометрия, элементный анализ, координатно-чувствительный детектор, микроканальный умножитель.

Для современной спектроскопии актуальной является потребность в аналитической аппаратуре для количественного анализа многоэлементных веществ, которая позволила бы за короткое время и с высокой точностью проводить такой анализ в процессе создания новейших материалов в машиностроении, при поиске, добыче и переработке руд и отходов горно-обогатительного производства, получении сверхчистых материалов и пр.

Использование лазерного источника ионов в масс-спектрометрии позволяет значительно повысить точность измерений и сократить их длительность. Наличие источника ионов с лазерной десорбцией и удлиненная фокальная плоскость анализатора масс-спектрометра позволяют проводить одновременный элементный анализ твердых образцов, различных по составу и физико-химическим свойствам, без специальной подготовки проб [1].

Использование прибора со специально разработанной интегральной схемой и умножителем электронов в виде микроканальной пластины в качестве приемника ионов изотопов различных элементов в лазерном масс-спектрометре может позволить осуществлять регистрацию результатов анализа в масштабе реального времени и юстировку масс-спектрометра в зависимости от условий эксперимента [2, 3].

В настоящей статье описаны структура и основные функциональные узлы разработанного прибора, предназначенного для одновременного анализа всех входящих в состав вещества элементов в масштабе реального времени, в составе масс-спектрометра.

Принцип построения и основные узлы прибора

На рис. 1 продемонстрирован принцип построения зарядочувствительного прибора, ко-

торый позволит проводить элементный анализ твердых образцов [2].

На поверхность микроканальной пластины (МКП), расположенной в фокальной плоскости масс-спектрометра, поступают ионы, положение которых на МКП определяется отношением массы к заряду конкретных ионов изотопов исследуемых элементов. Каждый канал МКП, в который попадает ион, работает в качестве преобразователя «заряд — импульс». Этот импульс поступает на соответствующий электрод-датчик, который соединен с входом соответствующего усилителя-формирователя.

В результате падения ионов на микроканальную пластину и создания лавин электронов, заряжающих соответствующие электроды, на выходе усилителей-формирователей образуются счетные отрицательные импульсы, которые подаются на входы 10-разрядных счетчиков.

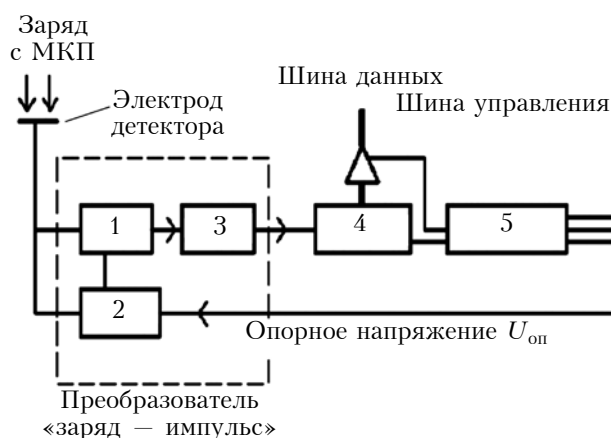


Рис. 1. Принцип построения детектора с использованием микроканальных пластин (один канал): 1 — ключ; 2 — разряд; 3 — импульс; 4 — счетчик; 5 — управление

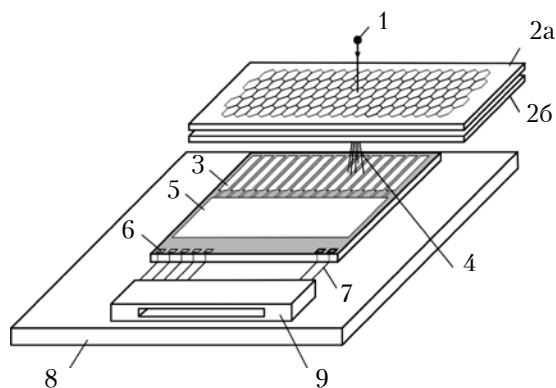


Рис. 2. Схема построения прибора:
 1 – ион; 2а, 2б – верхняя (МКП1) и нижняя (МКП2) микроканальные пластины; 3 – электроды-детекторы; 4 – лавина электронов; 5 – электрическая схема на кристалле; 6 – контакты на кристалле; 7 – соединяющие проводники; 8 – керамическая основа (корпус); 9 – разъем

Итак, для того чтобы ион, находящийся в фокальной плоскости масс-спектрометра, был зарегистрирован как единичное событие (один ион – один импульс счетчика), необходимо, во-первых, установить перед детектором преобразователь «ион – лавина электронов», во-вторых, лавина электронов должна изменить потенциал конкретного анода до величины, превышающей порог срабатывания компаратора. Только в этом случае компаратор переключится, сформирует единичный импульс счета для конкретного счетчика и включит формирователь напряжения заряда, который снова зарядит анод до необходимого потенциала. Для того чтобы избежать просчетов, этот процесс должен заканчиваться до прихода следующего иона на детектор, т. е. проходить достаточно быстро. Детекторная матрица вместе с компараторами, формирователями и счетчиками реализована на кремнии в виде специализированной однокристалльной БИС [4].

Конструкция прибора схематически показана на рис. 2.

В состав прибора входят следующие основные узлы:

- шевронная сборка микроканальных пластин в качестве преобразователя «ион – лавина электронов»;
- детекторная матрица (линейка электродов, реализованных на кремниевом кристалле методами микроэлектронной технологии);
- компаратор, формирователь импульса, счетчики;
- сигнальные и высоковольтные внешние выводы;
- корпус.

Микроканальный умножитель

В предлагаемой конструкции для преобразования энергии иона в лавину электронов используется шевронная сборка двух микроканальных пластин, которая вынесена в отдельный функциональный и конструктивный узел размерами

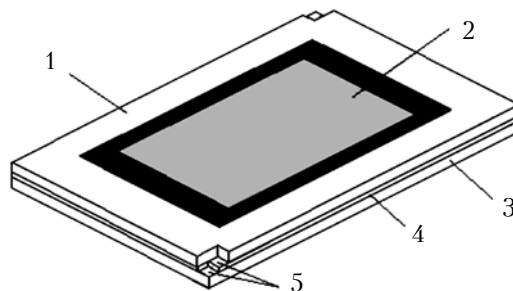


Рис. 3. Шевронный узел:
 1 – держатель МКП1; 2 – МКП1; 3 – держатель МКП2; 4 – промежуточный электрод; 5 – контакты

21,9×17,4×1,11 мм (рис. 3). Микроканальный умножитель реализует функции детектирования ионов, зарождения и усиления электронной лавины в результате электронной эмиссии в каналах МКП, которая может быть зарегистрирована на выходе чувствительным к заряду электродом детектора на кристалле. Использованы пластины F2370-01 производства Hamamatsu, Япония (параметры см. в табл. 1, расположение областей – на рис. 4)

Микроканальные пластины имеют размеры, оптимальные для размещения над зарядочувствительным участком кристалла, достаточно малый диаметр канала (меньше ширины одно-

Таблица 1

Основные параметры МКП F2370-01

Диаметр канала	12 мкм
Шаг ячеек	15 мкм
Угол наклона каналов θ	8°
Коэффициент рабочей поверхности	60%
Материал электродов	Inconel
Минимальное усиление	10 ⁴
Сопrotивление	20 – 120 МОм
Темновой ток	0,5 пА/см ²
Напряжение питания	1,0 кВ
Температура окружающей среды (указана в паспорте на МКП)	50 – 70°С

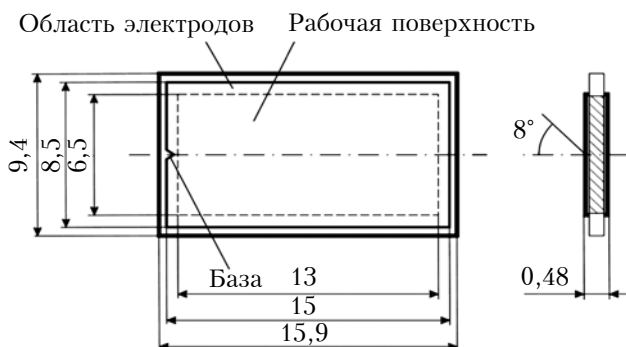


Рис. 4. Размеры областей на поверхности МКП F2370-01

го зарядочувствительного электрода БИС) для обеспечения высокого разрешения прибора.

Минимальное значение коэффициента усиления МКП1 составляет 10^4 при средней энергии электронов 30 эВ. При такой низкой плотности заряда на выходе МКП1 роль пространственно-го заряда незначительна, и рассеяние электронов между МКП1 и МКП2 определяется радиальной (поперечной) составляющей скорости электронов, вылетающих из МКП1. При приложении ускоряющего напряжения между МКП разлет электронов уменьшается, также уменьшается и число каналов МКП2, которые возбуждаются импульсом электронов, вылетающих из одного канала МКП1. При этом канал МКП2 быстрее вводится в режим насыщения, и общее усиление снижается. При приложении напряжения, равного 100 В, число каналов МКП2, возбуждаемых импульсом канала МКП1, снижается в 3 раза (при расстоянии между МКП 150 мкм).

Учитывая хрупкость и высокую стоимость микроканальных пластин, необходимо предпринять конструктивные меры, направленные на их защиту от механических нагрузок, которые могут возникать при установке МКП в конструкцию и эксплуатации в составе прибора в температурном диапазоне 0–150°C. Для этого каждая из МКП в составе детектора устанавливается в специальную керамическую рамку, размеры которой равны размерам МКП плюс 100 мкм (толщина 0,48 мм с допуском минус 10 мкм).

Корпус шевронного узла состоит из двух таких рамок, между которыми размещена еще одна, выполняющая роль промежуточного электрода. Рамки соединены между собой методом диффузионной сварки, что обеспечивает необходимую прочность конструкции и защищает хрупкие микроканальные пластины от трещин, сколов.

Средняя керамическая рамка имеет двустороннее металлическое покрытие толщиной в несколько микрометров, которое обеспечивает электрический контакт и механический прижим к микроканальным пластинам с внутренней стороны сборки по их периметру в области электродов. Контакты (поз. 5 на рис. 3) нужны для подключения потенциалов к среднему электроду [5].

Все керамические элементы изготавливаются из вакуумной керамики ВК-96 путем лазерной резки и последующего шлифования для обеспечения требуемой точности размеров.

Электрический контакт между МКП обеспечивается двумя слоями металлизированного полиимида толщиной 50 мкм каждый, из которого изготавливаются гибкие электроды для подвода высокого напряжения к МКП. Нижний промежуточный электрод устанавливается металлической стороной вниз и обеспечивает подачу потенциала к верхней поверхности нижней МКП, верхний промежуточный электрод — металлизацией вверх и обеспечивает подачу потенциа-

ла к нижней поверхности верхней МКП. После этого методом ультразвуковой сварки концы электродов присоединяются к металлизированным дорожкам на керамической основе корпуса. Такая конструкция за счет полиимида обеспечивает «мягкость» посадки МКП при прижимании [5].

Детекторная БИС прибора

Прибор для анализа многоэлементных по составу веществ в масштабе реального времени в составе масс-спектрометра выполнен на основе специализированной БИС УБ5709ИК01-2.11 по ТУ ШЖГК.431214.111ТУ. Ее функциональная схема приведена на рис. 5.

БИС содержит 384 независимых канала, каждый из которых подключен к собственному электроду-датчику, выполненному в виде металлизированной полоски на кристалле размером 18×2000 мкм. Размеры электродов и расстояние между ними выбираются исходя из соотношений чувствительности, разрешения прибора и быстродействия (паразитных емкостей). Максимальные размеры кристалла определяются возможностями технологии. Кристалл БИС предусматривает его дальнейшую установку на гибкий носитель типа «алюминий — полиимид» [6].

Сборка экспериментального образца устройства

Все операции по сборке элементов прибора проводятся под микроскопом типа МБС-9 для оптического позиционирования деталей. Элементы корпуса (за исключением рамок) соединяются между собой склеиванием компаундом СИЭЛ 159-322А с последующим высушиванием при температуре 150°C в течение трех часов. Толщина компаунда при таких операциях обычно составляет 10 мкм, высокая текучесть обеспечивает равномерное растекание по поверхности склеиваемых деталей. Следует отметить, что прочность такого соединения достаточна для экспериментальных образцов, однако при серийном производстве необходимо рассмотреть другие методы соединения керамики.

Микросхема извлекается из тары-спутника, и с помощью скальпеля отделяются технологические области по краям гибкого носителя кристалла БИС.

После сушки корпуса в него необходимо установить гибкий носитель, который имеет специальные выступы для позиционирования кристалла в колодце. Металлизированное дно колодца смачивается кремнийорганическим компаундом, после чего в него устанавливается кристалл, при этом носитель укрывает большую часть площади внутри держателя шевронного узла. Сушка должна проводиться в течение трех часов при температуре 150°C, как и при сборке корпуса.

Рамки с МКП и промежуточный электрод последовательно укладываются в держатель шевронного узла — специальную выемку на кор-

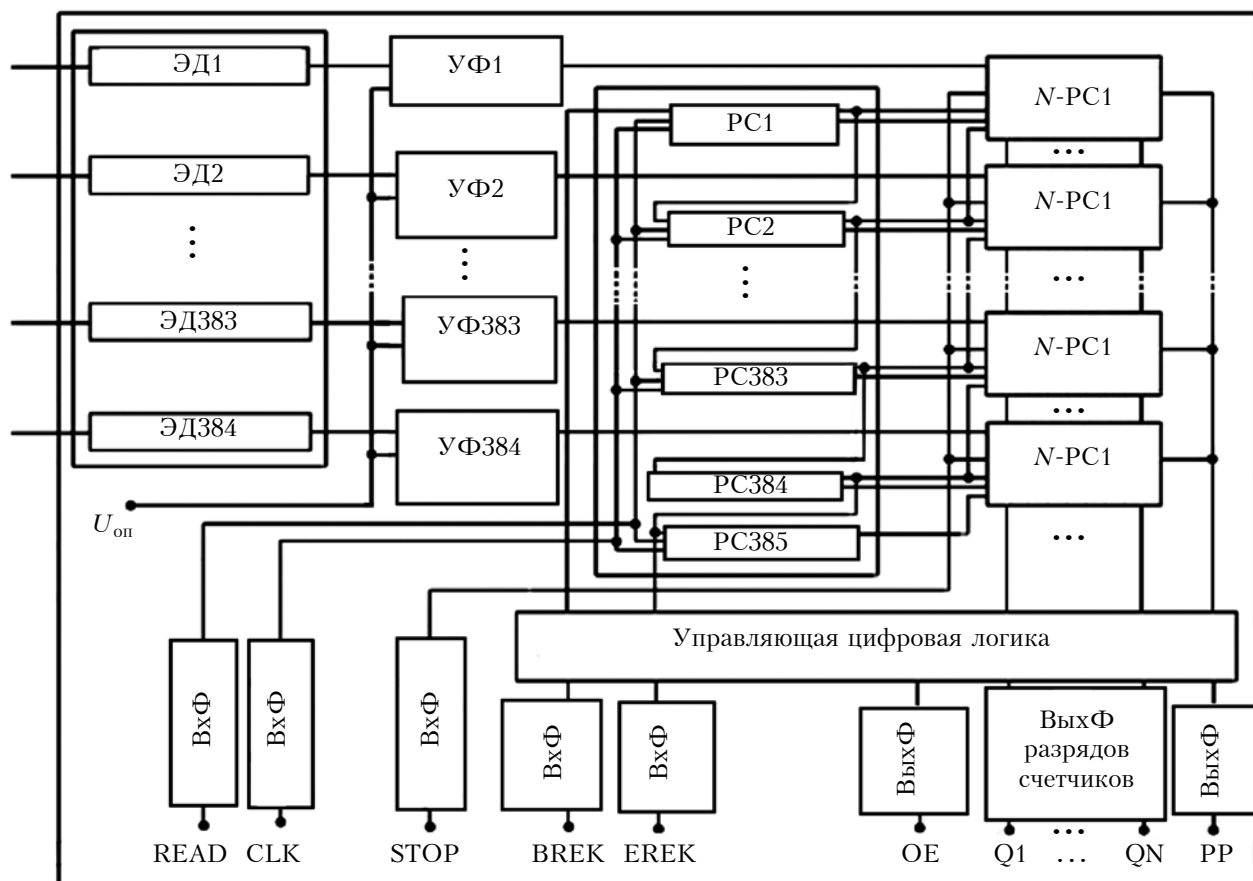


Рис. 5. Функциональная схема БИС:

ЭД – электрод-датчик; УФ – усилитель-формирователь; РС – регистр сдвига; N-РС – N-разрядный счетчик; ВхФ, ВыхФ – входной и выходной формирователи

пусе. Входная поверхность верхней МКП, на которую попадает ионный пучок, является фокальной плоскостью детектора, она расположена перпендикулярно базисной плоскости детектора. Расстояние между фокальной и базисной плоскостью (экраном) составляет 2,7 мм (является критическим размером для правильного позиционирования устройства в масс-спектрометре).

На рис. 6 показано схематическое изображение устройства в сборе.

Для закрепления экрана в корпус устанавливаются четыре стойки из диэлектрика (фторопласта) в целях обеспечения электрической изоляции между экраном и металлической пе-

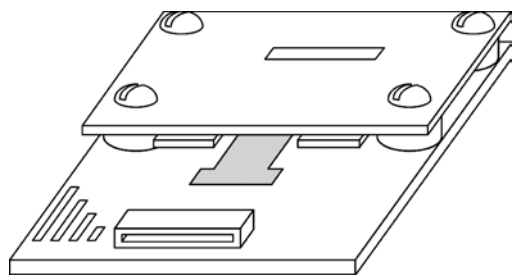


Рис. 6. Схематическое изображение прибора в сборе

редвижной кареткой масс-спектрометра. Стойки устанавливаются через отверстия в основании корпуса и закрепляются с помощью фторопластовых гаек, высота которых обеспечивает расстояние 1,5 мм между экраном и фокальной плоскостью, при этом расстояние до нижней (базовой) плоскости составляет 3,2 мм.

Последовательность операций сборки показана в табл. 2.

Таблица 2

Последовательность операций сборки прибора

Операция	Оборудование, режим
Входной контроль деталей	Микроскоп МБС-9
Сборка корпуса	Микроскоп МБС-9, компаунд СИЭЛ 159-322А
Сушка компаунда	Печь, 150°C, 3 ч
Контроль функционирования кристаллов	Прибор для контроля параметров БИС
Обрезка гибкого носителя	Скальпель
Приваривание кристалла на носитель	УСИМ-1
Установка кристалла в корпус	Кремнийорганический компаунд 159-191

Продолжение табл. 2

Установка разъема XF2M-2415	Паяльная станция SL-30, припой Sn60Pb40
УЗ-приваривание выводов носителя к металлическим дорожкам на корпусе	УСИМ-1
Контроль качества сваривания	Микроскоп МБС-9, тестер UT-2002
Проведение промежуточных испытаний	Устройство для контроля параметров БИС
Установка стоек крепления экрана	Пинцет
Установка элементов шевронного узла	Микроскоп МБС-9
УЗ-сварка выводов шевронного узла	УСИМ-1
Контроль качества сварки выводов шевронного узла	Микроскоп МБС-9
Приваривание пружинок к рамке	Паяльная станция SL-30, припой Sn60Pb40
Установка рамки с пружинами	Микроскоп МБС-9
Установка экрана	Микроскоп МБС-9
Закрепление экрана винтами	Отвертка

Устройство тестирования БИС

Устройство для тестирования должно обеспечивать проверку электрических параметров микросхем УБ5709ИК01-2.11 в составе прибора по техническим условиям ШЖГК.431214.111 ТУ и проведение исследований электрических параметров микросхем. Результаты каждой проверки должны выводиться на экран и сохраняться в файле.

Тестирование проводится в следующих направлениях.

1. Проверка контакта.

На выводы микросхемы поочередно подается напряжение $-1,5$ В и измеряется ток I_k . Норма: $|I_k| \geq 10$ мкА. (Режим и норма могут уточняться.)

2. Проверка замыканий.

Поочередная подача напряжения $U=1,5$ В на каждый из выводов микросхемы при заземленных остальных. При этом ток должен отсутствовать (измеренное значение тока должно быть не более единицы младшего разряда).

3. Проверка статических параметров микросхем.

Вначале измеряются входные и выходные токи микросхемы в соответствии с ТУ, а затем — ток потребления микросхемы в статике (I_{cc}) и в динамике (I_{CCD}), а также выходные напряжения (U_{OL} , U_{OH}).

На выводы микросхемы поочередно подается напряжение $-1,5$ В и измеряется ток I_k . Норма: $|I_k| \geq 10$ мкА. (Режим и норма могут уточняться.) При измерении тока потребления должна быть возможность изменения параметров режима в следующих минимальных пределах: напряжение питания $U_{cc}=4-6$ В, опорное напряжение $U_{оп}=1,5-4$ В, максимальная частота считывания информации с микросхемы $F_{сч}=0,5-5$ МГц при форме сигнала — меандр.

4. Проверка функционирования и динамических параметров микросхемы (частоты счета импульсов и чувствительности по каждому каналу, времени считывания информации со счетчиков).

Определяется минимальное значение амплитуды импульса U_2 (при этом должно выполняться условие $U_1 \leq U_2$, где U_1 и U_2 — амплитуды тестовых импульсов отрицательной полярности см. рис. 7), при котором по каналу считывается правильная информация.

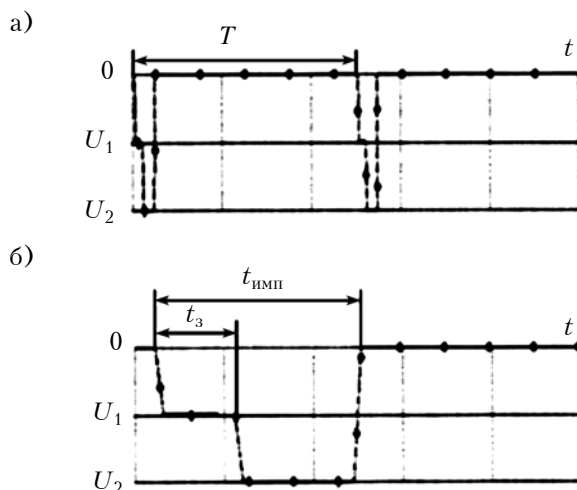


Рис. 7. Форма тестовых импульсов

В процессе проверки параметры режимов должны регулироваться в следующих минимальных пределах: $U_{cc}=4-6$ В, $U_{оп}=1,5-4$ В, длина тестовых импульсов $t_{имп}=2000-5000$ нс, период тестовых импульсов $T=5-20$ мкс, длительность задержки между фронтами тестовых импульсов $t_3=0-1000$ нс, $U_1=-(0,5-6)$ В, $U_2=-(0,5-12)$ В, $F_{сч}=0,5-5$ МГц при форме сигнала — меандр. При этом необходимо обеспечить: возможность изменения параметров U_{cc} , $U_{оп}$, t_3 , U_1 , U_2 с заданным шагом с проведением проверок на каждом шагу; возможность задания произвольного числа импульсов записи в диапазоне от 0 до 1023 (0 — 3FF в шестнадцатиричном коде) и проверки на соответствие этим значениям; возможность остановки записи на заданном произвольном количестве импульсов, записи по команде STOP. Результаты проверок (информация, которая считывается со счетчиков) или же только

неправильная информация должны выводиться на экран и сохраняться в памяти.

Схемотехническая реализация

Устройство для тестирования параметров БИС в составе прибора построено на основе микроконтроллера Atmel ATmega16, который выполняет интерфейсные функции между программным обеспечением персонального компьютера и исследуемой БИС. Для проведения испытаний устройство подключается к СОМ-порту ПК и внешнему источнику питания (12 В, 1 А), после чего управление устройством, выбор режимов тестирования БИС, выбор режимов работы устройства происходит автоматически путем подачи команд с ПК.

Функционально в составе устройства можно выделить три модуля — измерений, коммутации и формирователь тестовых импульсов.

Модуль измерений реализует обмен данными между ПК и БИС, а также руководит работой других узлов. Измерение напряжения и тока на выводах БИС выполняется с помощью шести десятиразрядных аналогово-цифровых преобразователей, входящих в состав микроконтроллера. В режиме проверки функционирования микропроцессор считывает значения со счетчиков и выдает результаты на ПК.

Кроме того, в состав модуля входит регулятор опорного напряжения и напряжения питания. Оба регулятора выполнены на основе десятиразрядных ЦАП DAC7611 (IC2, IC3). Необходимый уровень выходного напряжения преобразователей задается процессором по команде оператора. Выходное напряжение микросхемы через стабилизатор-усилитель подается на вывод питания БИС.

Режимы проверки контакта, замыкания, измерения входных и выходных токов, напряжений логического нуля и единицы требуют отдельной коммутации каждого вывода до входа измерителя. Для этого реализован модуль коммутации, состоящий из миниатюрных электро-механических реле, которые обеспечивают различные комбинации подключения выводов БИС к измерительным каналам преобразователей. Выбор электро-механического способа коммутации вместо электрического связан с необходимостью коммутации и измерения микро-токов (порядка 10 мкА). Управление модулем выполняет микроконтроллер.

Проверка функционирования счетчиков БИС требует подачи на выводы тестовых импульсов отрицательной полярности. Форма тестовых импульсов приведена на рис. 7.

Формирователь тестовых импульсов обеспечивает возможность регулирования необходимых

параметров импульсов — амплитуду U_1 , U_2 , период, задержку между U_1 и U_2 , выдачу заданного количества импульсов на тестовые выводы БИС. Формирователь имеет отдельный микроконтроллер ATmega8 меньшей мощности, соединенный через интерфейс SPI с главным контроллером модуля измерений. Главный контроллер передает контроллеру формирователя параметры импульса, которые задает оператор.

Заключение

Разработанный прибор, предназначенный для одновременного анализа всех входящих в состав вещества элементов в масштабе реального времени в составе масс-спектрометра, характеризуется следующими основными параметрами:

- детектирование элементов в широком диапазоне концентраций: от 10^{-7} до 1;
- 384 канала приема и обработки информации;
- чувствительность по каждому входу составляет 10^6 электронов/импульс;
- максимальная частота счета импульсов счетчиками 5—10 МГц;
- протокол обмена информацией микросхемы с периферией — последовательный, максимальная частота обмена — 4 МГц.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Nitta S., Kawasaki H., Suganuma T. et al. Desorption/Ionization Efficiency of Common Amino Acids in Surface-Assisted Laser Desorption/Ionization Mass Spectrometry (SALDI-MS) with Nanostructured Platinum // J. Phys. Chem. C. — 2013. — Vol. 117. — P. 238—245. — <http://dx.doi.org/10.1021/jp308380z>
2. Langstaff D. P., Bushell A., Chase, T., Evans, D. A. A fully integrated multi-channel detector for electron spectroscopy // Nuclear Instruments and Methods B. — 2005. — August. — P. 219—223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2005.06.187>
3. Борискин А. И., Еременко В. М., Мордик С. Н. и др. Исследование ионно-оптических характеристик лазерного масс-спектрометра с координатно-чувствительным микроэлектронным детектором // Журнал технической физики. — 2008. — Т. 78, № 7. — С. 111—117.
4. Сидоренко В. П., Вербицкий В. Г., Прокофьев Ю. В. и др. СБИС для микроэлектронного координатно-чувствительного детектора приборов элементного анализа материалов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 2. — С. 25—29.
5. Балдин А. А., Берлев А. И., Кудашкин И. В., Федоров А. Н. Детектор на основе микроканальных пластин для контроля пространственно-временных характеристик циркулирующего пучка нуклона // Письма в ЭЧАЯ. — 2014. — Т. 11, № 2. — С. 209—218.
6. Шеревеня А. Г., Цуканов Л. Н., Тучинский И. А., Жора В. Д. Конструкция и технология сборки БИС в бескорпусном исполнении на гибком носителе // В. сб.: Научно-технические достижения. — Москва: ВИМИ, 1984. — № 4. — С. 26—34.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 24.09 2015 г.*

ПРИЛАД ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТНОГО СКЛАДУ МАТЕРІАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ СПЕКТРА МАС

Розроблено структуру і основні функціональні вузли приладу-аналізатора багатоеlementних речовин в масштабі реального часу, який дозволяє за короткий час і з високою точністю проводити аналіз матеріалів.

Ключові слова: мас-спектрометрія, елементний аналіз, координатно-чутливий детектор, мікроканалний помножувач.

DOI: 10.15222/ТКЕА2016.1.39
 UDC 621.382.2./3

A. V. KOSULYA¹, V. G. VERBITSKIY²

Ukraine, ¹Taras Shevchenko National University of Kyiv,
²National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»
 E-mail: alexandr250990@mail.ru, v.g.verbitskiy@gmail.com

INSTRUMENTS FOR MEASURING ELEMENTAL COMPOSITION OF MATERIALS BY MASS SPECTRUM

The article reveals the development of the structure and basic functional units of the real time analyzer for multi-element substances, which allows short time and high accuracy material analysis.

The article reveals the design and sequence of operations for the assembly of an experimental device sample. Technical requirements for the LSI control device have been defined and used as the basis for the development of circuit diagram. Functionally the device consists of three modules: measurement module, switching module and test pulses driver. The measurement module implements the communication between PC and LSI and directs the work of other nodes. The switching module consists of miniature electromechanical relays that allow implementing various combinations for connection of LSI terminals to the measuring channels of transducers. Shaper of test pulses provides the ability to adjust necessary parameters of the pulse: amplitude U1 and U2, period, delay between U1 and U2, generation of a specified number of pulses on the test LSI terminals.

Keywords: mass spectrometry, elemental analysis, coordinate-sensitive detector, microchannel multiplier.

REFERENCES

1. Nitta S., Kawasaki H., Suganuma T., Shigeri Y., Arakawa R. Desorption/Ionization Efficiency of Common Amino Acids in Surface-Assisted Laser Desorption/Ionization Mass Spectrometry (SALDI-MS) with Nanostructured Platinum. *J. Phys. Chem. C*, 2013, vol. 117, pp. 238-245. <http://dx.doi.org/10.1021/jp308380z>
2. Langstaff D. P., Bushell A., Chase, T., Evans, D. A. A fully integrated multi-channel detector for electron spectroscopy. *Nuclear Instruments and Methods B*, 2005, August, pp. 219-223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2005.06.187>
3. Boriskin A. I., Eremenko V. M., Mordik S. N., Savin O. R., Skripchenko A. N., Storizhko V. E., Khomenko S. N. Ion-optical characteristics of a laser mass spectrometer with a coordinate-sensitive microelectronic detector. *Technical Physics*, 2008, vol. 53, iss. 7, pp. 927-933. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063784208070177>
4. Sidorenko V. P., Verbitskiy V. G., Prokofiev Yu. V., Kyziak A. Yu., Nikolayenko Yu. E. [VLSI for microelectronic coordinate-sensitive detector of the devices for element analysis of substance]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2009, no. 2, pp. 26-29. (Rus)
5. Baldin A.A., Berlev A.I., Kudashkin I.V., Fedorov A.N. Detector based on microchannel plates for monitoring space-time characteristics of a circulating beam at Nuclotron. *Methods of Physical Experiment Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2014, vol. 11, iss. 2, pp. 121-126. <http://dx.doi.org/10.1134/S1547477114020137>
6. Sherevenya A.G., Tsukanov L.N., Tuchinskii I.A., Zhora V.D. [Design and assembly technology LSI frameless performance on a flexible carrier]. *Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya*, Moscow, VIMI, 1984, no. 4, pp. 26-34.