

# Новый методологический подход к контролю качества электронной продукции для космических систем с использованием [масс-спектрометрического комплекса МКМ-1](#).

Федичкин И.Л.<sup>1</sup>, Тюкальцев Р.В.<sup>1</sup>, Романов П.А.<sup>2</sup>, Древаль Г.Н.<sup>3</sup>, Соколов А.Н.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ООО «ИТА», <sup>2</sup>ФТИ РАН им. А.Ф. Иоффе <sup>3</sup>ОАО «Российские космические системы», <sup>4</sup>Филиал ОАО «Корпорация «Комета» Научно-проектный центр оптико-электронных комплексов наблюдения.

*Предложена реализация нового методологического подхода проверки на надёжность отбраковки продукции микроэлектронной промышленности для космической отрасли. Рассмотрены факторы, влияющие на надёжность работы интегральных схем (ИС) и модульных конструктивов. Создан приборный и методический инструмент для проведения исследований по определению зависимости влагосодержания и концентраций активных радикалов от температуры внутри полости корпусов изделий в широком диапазоне температур 20°C - 800°C. Проанализированы изделия предприятий микроэлектроники и космической промышленности, изготовленные при различных технологических методах организации производства. Оптимизированы условия, необходимые при подготовке корпусов, проверено качество исходных материалов, выявлены негативные факторы, влияющие на надёжность продукции.*

*Ключевые слова: масс-спектрометр, измерение содержания паров воды, космические технологии, подкорпусное пространство микросхемы*

## **Введение**

Повышенными требованиями к надёжности бортовой аппаратуры космических аппаратов объясняются повышенные требования к их электронным компонентам. Деструктивные характеристики космической агрессивной среды, в том числе глубокий вакуум, большой перепад температур, механические или химические факторы могут негативно повлиять на электрические параметры изделия [1]. На работу различных устройств негативно влияют адсорбаты, конденсат влаги, водород, кислород, углеводороды, аммиак, галогениды и другие летучие вещества [2].

Микропримеси, имеющие высокую химическую активность и находящиеся в материалах, используемых в производстве электронных компонентов, влияют на электрические характеристики материалов и снижают надёжность работы устройств. Возникающая в связи с этим нестабильность свойств исходных материалов может также повлиять в краткосрочной и долгосрочной перспективе на безотказность работы. Поэтому при разработке оптико-электронной аппаратуры, используемой в космосе и работающей в экстремальных условиях, важнейшая задача – обеспечение условий функционирования, при которых отсутствуют вещества-источники появления криоосадков и коррозии. Криоосадок может возникать из-за веществ, входящих в состав клеев (например, ВК-9, К-300), экранно-вакуумной тепловой изоляции, кабелей (различные компаунды для заливки разъемов). Исключить появление таких веществ можно только после проведения элементного масс-спектрометрического анализа материалов, используемых в аппаратуре, и определения веществ с наибольшим газовыделением.

В связи с повышенными требованиями к аппаратуре, производимой для космоса [3], необходимо контролировать в подкорпусном пространстве ИС и модульных изделий содержание не только влаги, но и всех микропримесей, содержащихся в конструкционных элементах, а также проводить идентификацию и определение присутствующих органических веществ, химически активных радикалов и продуктов газовой выделенной. Созданный нами на базе времяпролётного масс-спектрометра [комплекс МКМ-1](#) [4] анализирует до 400

компонентов в одном цикле измерения за 2,4 сек. и соответствует всем вышеуказанным требованиям. Комплекс может быть использован для анализа газового состава атмосферы внутри стандартных герметичных устройств, стеклянных ампул, баллонов, модульных сборок и, в том числе, проверки их на герметичность. Результаты измерений, полученные на комплексе МКМ-1 – основа для понимания физико-химических процессов, которые протекают внутри названных устройств и вызывают изменения, приводящие к отказам и сбоям.

### Механизмы коррозии в подкорпусном пространстве электронных изделий

При тестировании продукции электронной промышленности, начиная с 60-х гг. прошлого века, проверяются микросхемы на содержание подкорпусной влаги. Влага без наличия примесей не может вызывать ни электрических неисправностей, ни коррозии внутри корпусов многокристальных модулей, микросхем и гибридных схем. Это было показано по результатам тщательно спланированного эксперимента в работе [5]. Набор корпусов, содержащих различные кристаллы с различными электрическими функциями корпусировали в среде, содержащей пары воды 1000, 6000, 10000 ppm. В течение 1000 ч. микросхемы были протестированы с помощью электрических тестов при  $-55^{\circ}\text{C}$ ,  $+125^{\circ}\text{C}$  и  $+25^{\circ}\text{C}$ .

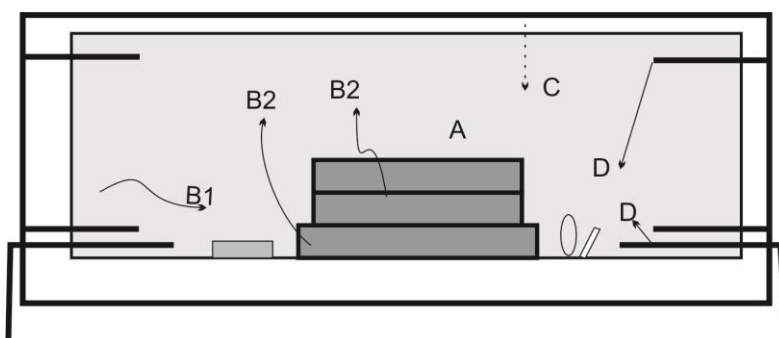


Рис.1. Источники влаги в микросхеме: А – газ, заполняющий микросхему; В1 – материал корпуса микросхемы; В2 – материалы, использованные в микросхеме (клеи и др.); С – диффузия через мембраны; D – течи

Анализ остаточного газа показал, что в испытуемых корпусах имелась не только вода с объёмной концентрацией, повышенной по сравнению с исходной, но и аммиак, метанол, водород и метилэтилкетон. На рис.1 представлены возможные источники влаги в микросхемах. Наличие воды в устройствах нежелательно потому, что она обеспечивает перенос имеющихся загрязнителей, которые вызывают коррозию и сбои. Многочисленные упоминания о таких механизмах коррозии и сбоях приведены в работах [5-16], а подробное описание – в статье [17]. В работе [18] Кейн и Домингос описывают механизм коррозии и экспериментальные способы выявления её причин. Примеси, вызывающие коррозию, воздействуют посредством отрицательных или положительных ионов, использующих воду в качестве носителя. Процесс коррозии усиливается и наличием электрического тока в цепи работающей микросхемы. Отрицательный ион в кислой среде может произойти от ионов:  $\text{Cl}^-$  – из соляной кислоты ( $\text{HCl}$ ),  $\text{F}^-$  – из плавиковой кислоты ( $\text{HF}$ ),  $(\text{NO}_3)^-$  – из азотной кислоты ( $\text{HNO}_3$ ),  $\text{SO}_4^-$  – из серной кислоты ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ),  $\text{PO}_4^-$  – из фосфорной кислоты ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ).

Положительный ион коррозии может произойти от:  $\text{Na}^+$  – из гидроксида натрия ( $\text{NaOH}$ ) и  $\text{K}^+$  – из гидроксида калия ( $\text{KOH}$ ). Два примера агрессивных химических реакций:



Коррозия может происходить и без водного носителя при наличии отрицательного радикала  $\text{OH}^-$ , или отрицательных ионов  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{I}^-$ , диссоциирующих из галогенизированных органических растворителей, которые часто применяются при обработке поверхностей в подготовке корпусов и кристаллов.

Проведенные нами исследования состава парогазовой фазы, находящейся под корпусами различных ИС, выявили присутствие в ней гидроксильной группы  $\text{OH}$ , содержание которой в различных образцах микросхем было от 0,1% до 0,35% независимо от количества присутствующих молекул  $\text{H}_2\text{O}$ . Источник их появления – различные клеевые и полимерные структуры, используемые при фиксации кристалла, корпусировании и т.п. Учитывая высокую химическую активность гидроксильной группы  $\text{OH}$ , представляется важным контролировать ее концентрацию во время контрольных испытаний микросхем на допустимое содержание влаги [19].

Процесс коррозии зависит не только от наличия соответствующих загрязняющих веществ и электролитического транспортного средства, но и от pH-среды. Наименьшее влияние на коррозию оказывается при pH в интервале 4,5-7,5. В работах [12] и [20] отмечены разные скорости отказов для одной и той же pH-среды с одинаковой концентрацией воды в подкорпусном пространстве ИС. Это было обусловлено различными концентрациями фосфора и фтора в пробах. В результате обработки данных Грейвс и Гурани [21] сообщили о больших колебаниях содержания фтора в примесях алюминия, вызванные различиями в процессе плазменной обработки. Вывод: важно соблюдать внутрикорпусную чистоту и минимизировать концентрацию воды.

В современной микроэлектронной промышленности за рубежом анализу примесей в конструкционных материалах микросхем уделяется серьезное внимание. Для этого используются различные методы анализа микропримесей. За рубежом аппаратные средства выпускает фирма Oneida Research Services, Inc. Параллельно с задачей анализа внутренних паров воды, которую фирма ORS успешно решала последние 30 лет, сейчас предлагаются дополнительные аналитические методы определения негативного влияния полимеров, эпоксидных смол, покрытий и клеев, используемых в производстве пассивных или активных компонентов. Дегазация растворителей, наполнителей или продуктов реакции и их осаждение на внутренних поверхностях также являются факторами снижения надёжности микроэлектронных устройств.

### **Возможности комплекса МКМ-1**

До настоящего времени базовым прибором, используемым в NASA для анализа подкорпусной влаги, был квадрупольный масс-спектрометр фирмы ORS. В течение трёх последних лет фирма заявила о новой разработке – создании прибора высокого разрешения «HR-IVA™ high resolution Time-of-Flight mass spectrometer» на базе времяпролётного масс-спектрометра для анализа не только подкорпусной влаги, но и газовых примесей в микрообъёмах [22]. По основным масс-спектрометрическим и техническим характеристикам он является [аналогом отечественного МКМ-1](#), разработанного в ФТИ АН СССР им. А.Ф. Иоффе и запатентованного лабораторией масс-спектрометрии в 1991 г. [23], принадлежит к одному с ним классу приборов и не уступает ему по функциональным возможностям и методическим приложениям.

Фирма ORS использует оборудование для идентификации неизвестных органических соединений по методу MEL-1080 «Идентификация неизвестных летучих и полунлетучих органических соединений», однако эти соединения не могут быть окончательно определены из-за сложности и большого количества осколочных масс-спектров [22]. В нашем приборе для решения этой задачи применен новый ионизационный источник [24], позволяющий в пределах одного измерительного цикла осуществить ионизацию с различными энергиями в диапазоне 10-150 эВ. Благодаря этому стало возможным определение как первичного состава высокомолекулярного соединения с низкой энергией диссоциации, так и детектирование ионов, экранированных осколочными пиками исследуемых соединений, что проиллюстрировано на рис. 2. В результате тестирования по ОСТ 11 073.013-2008 можно регистрировать ОН, так как интенсивность фонового осколочка с а.е.м. 17 уменьшена в 20 раз.

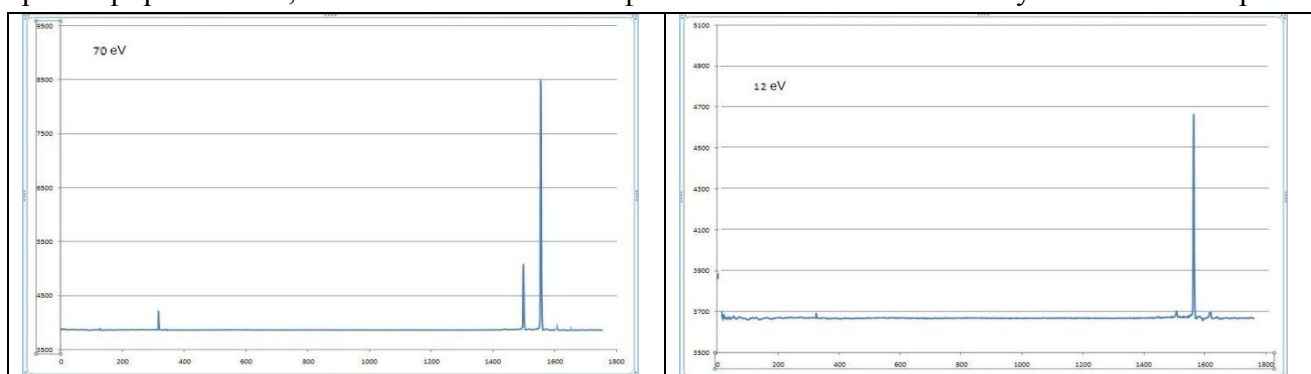


Рис. 2. Масс-спектры воды при различных энергиях ионизации: 70 эВ – слева и 12 эВ - справа

В физическую основу обоих приборов HR-IVA™ и МКМ-1 положены одинаковые принципы проведения замеров подкорпусной влаги и газовых примесей: измерение состава парогазовой фазы, проходящей через микрощель, образованную прокалывающей иглой в верхней крышке корпуса. Получаемое таким образом контролируемое отверстие, позволяет газам течь заранее рассчитанным потоком в масс-анализатор, который находится в этой же камере. Это обеспечивает, во-первых, независимость измерений от внутреннего объема образца и, во-вторых, позволяет удовлетворить метрологическим требованиям при проведении калибровки. Схожим образом в обоих приборах решены процессы калибровки: путём использования капсул, при вскрытии которых поток смеси по величине должен выдерживаться таким же, как и при измерениях.

На рис. 3 представлен интерфейс программы, с помощью которой осуществляется управление МКМ-1, и реализуются интегральный метод замера концентрации ОН<sup>-</sup> и Н<sub>2</sub>О, при котором точность измерений на порядок выше по сравнению с обычными точечными замерами. Это стандартный масс-спектрометрический метод количественного замера летучей компоненты, заключающийся в том, что через источник ионизации масс-спектрометра пропускается и суммируется весь объем газа, содержащийся в подкорпусном пространстве, что особенно важно для микросхем с объемами менее 10 мм<sup>3</sup>. Такой метод используется в измерениях, требующих особо высокой точности.

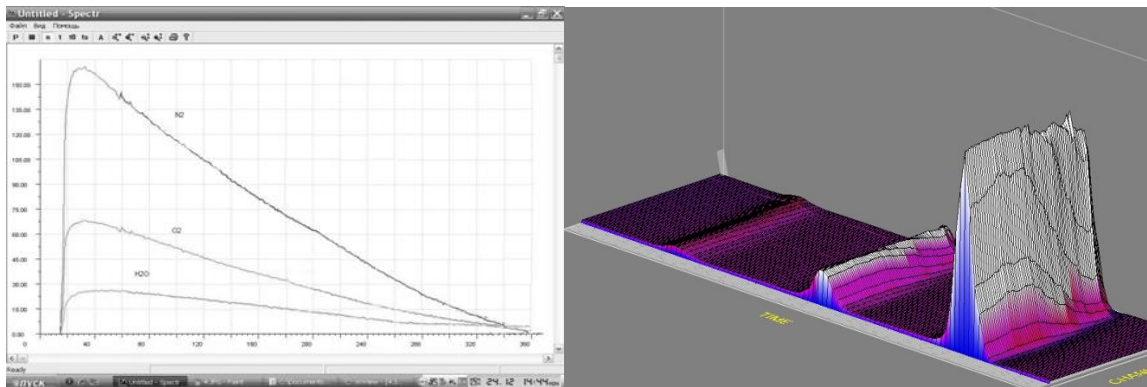


Рис. 3. Интерфейс программы управления прибором МКМ-1

Созданная аппаратура позволяет надёжно проводить замеры с высокой точностью, как для замкнутых герметичных объемов от  $0,01 \text{ мм}^3$  до  $200 \text{ см}^3$  (испарение по Кнудсену), так и для открытых поверхностей (испарение по Ленгмюру) в широком диапазоне температур:  $80^\circ\text{C}$ - $250^\circ\text{C}$ ,  $250^\circ\text{C}$ - $450^\circ\text{C}$ ,  $450^\circ\text{C}$ - $800^\circ\text{C}$ . Благодаря применению автоматизированного устройства пошагового микровскрытия создан инструмент для проведения комплексных исследований по определению зависимости концентрации активных веществ и радикалов от температуры внутри полости корпуса изделия. Это позволяет проводить целенаправленный отбор материалов, применяемых в микроэлектронной промышленности, т.е. выполнять метрологические исследования, необходимые для выработки технических требований (стандартов) к продукции микроэлектроники. На рис. 4 представлен 3D масс-спектр, снятый в режиме реального времени и иллюстрирующий изменение содержания паров воды при изменении температуры микросхемы.

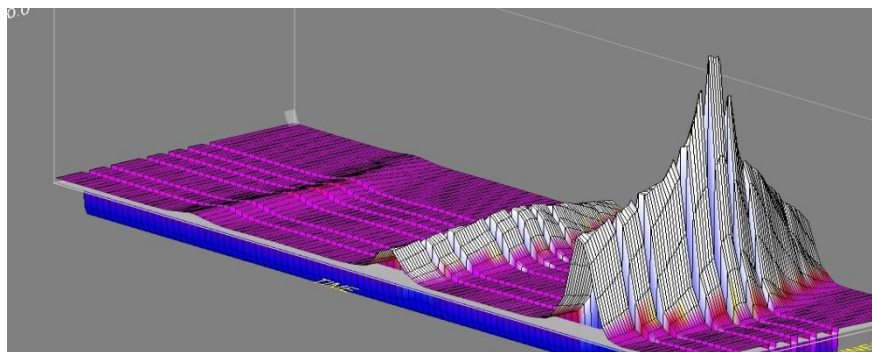


Рис.4. Изменение содержания паров воды при изменении температуры микросхемы

### Методика эксперимента

В комплексе МКМ-1 используется времяпролётный масс-спектрометр (ВМС), разработанный с учётом специфики требований по анализу паров воды и анализу микроконцентраций активных примесей, находящихся в подкорпусном пространстве микросхем.

Основополагающим принципом работы прибора МКМ-1 является то, что вскрытие образца и выпуск из него анализируемого газа осуществляется в одной камере с масс-спектрометром. Это позволяет избежать потерь газовых примесей, неизбежных при 2-камерной схеме, когда вскрытие производится в одной вакуумной камере, а спектрометр находится в другой камере. В этой схеме часть газовых примесей адсорбируется на стенки камеры вскрытия, вентиль и газопровод, ведущий в камеру спектрометра. Однокамерная



схема, реализованная в МКМ-1, позволяет наблюдать в режиме реального времени за процессом десорбции влаги и примесей с поверхности образца перед вскрытием и тем самым свести до минимума их фоновый уровень.

Процесс проведения измерений является двухстадийным: испытуемая микросхема помещается в шлюзовую камеру, и после откачки до высокого вакуума перемещается в камеру вскрытия, в которой находится ионный источник масс-спектрометра.

На рис. 5 представлена схема работы комплекса МКМ-1. По достижении необходимого уровня фона прокалывающее устройство создаёт микротечь в корпусе микросхемы. Парогазовая смесь через регулируемое отверстие попадает в область ионизации масс-спектрометра заранее рассчитанным потоком, определяемым величиной образовавшегося отверстия и скоростью откачки вакуумного насоса.

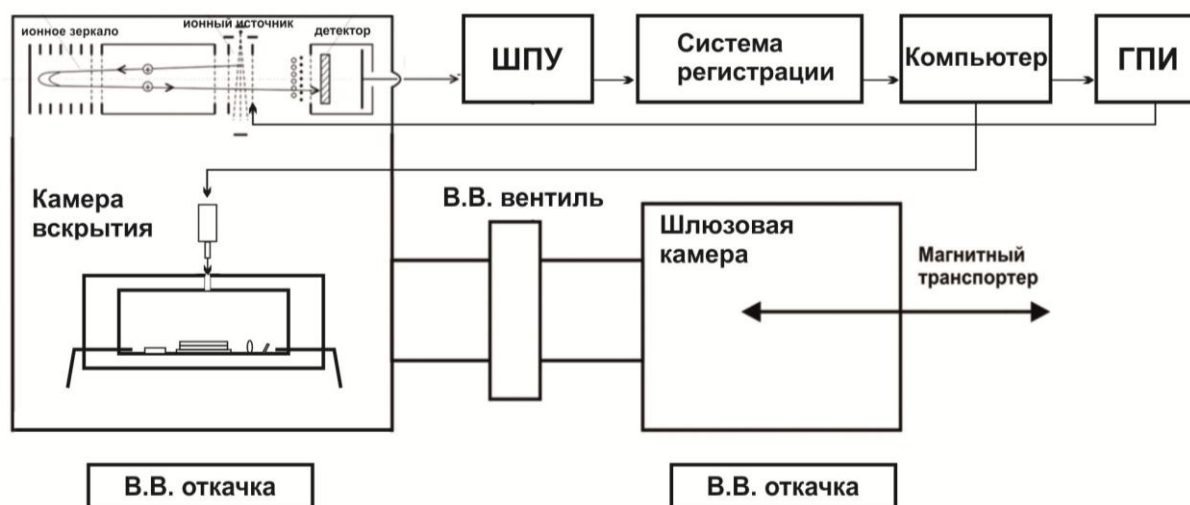


Рис. 5. Схема работы комплекса МКМ-1

В режиме реального времени на мониторе отображаются графики относительных концентраций газовых компонент и паров воды содержащихся в подкорпусном пространстве микросхемы. После переходного процесса газовые кривые выходят на стационарный режим (производная концентрации постоянна), т.е. вода и газовые примеси более не сорбируются на стенках вакуумной камеры – признак достоверного замера.

## Результаты

Разработанный комплекс используется для решения прикладных задач: определение состава газов и паров в подкорпусном пространстве устройств физической электроники, термоанализ конструкционных материалов до температуры 800°C, анализ полимерных материалов клеев, эпоксидных смол и т.п. до 400°C, ступенчатый газовый анализ содержания подкорпусного пространства микросхем до 250°C, поиск и идентификация неизвестных веществ и соединений, находящихся в деталях исследуемых устройств.

На выпущенных моделях комплекса МКМ-1 решены задачи:

1. Для ОАО «Корпорация «Комета» выполнена работа по определению и идентификации высокомолекулярных веществ. На рис. 6 пример исследования вещества, выделяющегося при нагреве электронного модуля и загрязняющего его оптические поверхности. На спектрах видно, что вещество, вызывающее загрязнение оптики блока,

резко выделяется, начиная с определенной температуры. Сравнение спектра после проведение анализа с базой спектров NIST 2008 позволило установить, что загрязняющее вещество гексаметил-циклотрисилоксан  $C_6H_{18}O_3Si_3$ , оно относится к кремнийорганическим полимерам и входит в состав масел и паст, используемых в различных системах, приборах и механизмах.

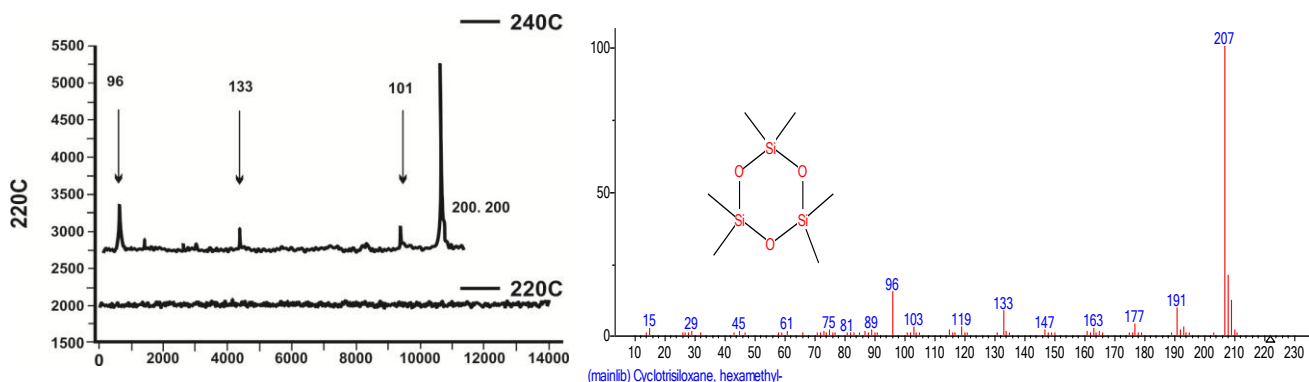


Рис. 6. Сравнение масс-спектров, полученных в процессе эксперимента (слева), с масс-спектром, взятым из базы спектров NIST 2008(справа)

Аналогичным образом была решена задача по идентификации загрязняющих примесей в проводящей пасте. На рис. 7 представлен масс-спектр, в котором выявлен пик массы 149 а.е.м., характерный для вакуумного масла, попавшего в образец в процессе предварительной откачки модуля.

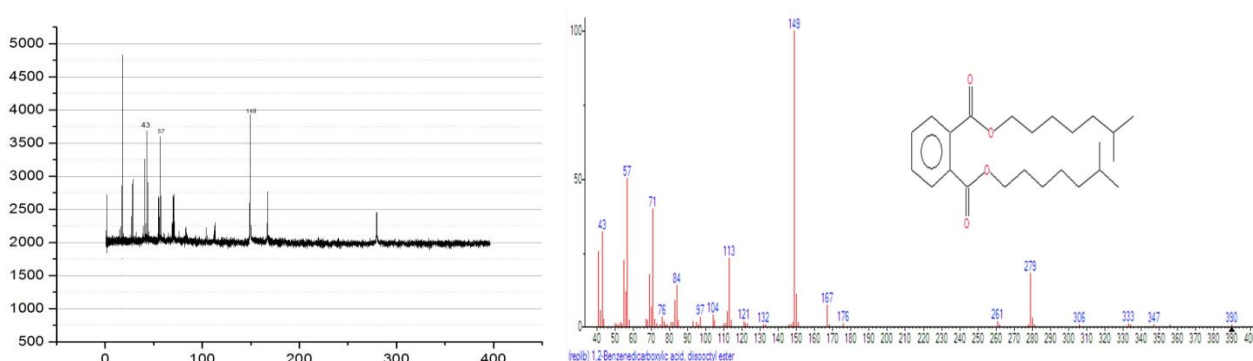


Рис. 7. Масс-спектр паров исследуемого образца с обнаруженной примесью вакуумного масла во внутренней атмосфере блока (слева) и масс-спектр этого масла, взятый из базы спектров NIST 2008 (справа)

2. Для ЗАО «Светлана-Полупроводники» выполнена работа по определению причин повышенного содержания паров воды в подкорпусном пространстве некоторых типов микросхем. В таблице 1 представлены результаты измерений состава газа в подкорпусном пространстве микросхем, произведенных по технологии предприятия «ЗАО «Светлана-Полупроводники». Из пп. 2 и 3 видно, что отсутствие термообработки и вакуумной сушки приводит к завышенному содержанию влаги в пустых корпусах. Пункты 4, 5, 6 и 7 указывают на то, что в отличие от посадки кристаллов на клей посадка на эвтектику не увеличивает содержание влаги в подкорпусном пространстве,

Таблица 1. Результаты измерений состава газа в подкорпусном пространстве микросхем, изготовленных по технологии предприятия «ЗАО «Светлана-Полупроводники»

Тип корпуса	Технология	Содержание газов, %				Объём корп., мм <sup>3</sup>	
		№	N <sub>2</sub>	ОН	H <sub>2</sub> O		
1	402.16-18	Пустой корпус	1	99,37	0,04	0,13	48,1
			2	99,38	0,03	0,10	48,1
2	H04.16-2B	Без термообработки	1	78,01	0,07	1,56	26,23
			2	78,65	0,05	2,11	26,23
3	H04.16-2B	Без вакуумной сушки	1	99,24	0,05	0,80	26,23
			2	99,04	0,06	0,63	26,23
4	402.16-18	Эвтектика, полн. цикл	1	99,81	0,13	0,12	48,1
			2	99,47	0,11	0,07	48,1
5	401-14-5M	Эвтектика, полн. цикл	1	99,70	0,07	0,08	23,03
			2	99,01	0,08	0,07	23,03
6	401-14-5M	Клей, полн. цикл	1	99,41	0,06	0,43	23,03
			2	99,65	0,07	0,15	23,03
7	402.16-18	Клей, полн. цикл	1	99,55	0,09	0,35	48,1
			2	99,01	0,08	0,84	48,1

Помимо влаги клеи содержат в себе другие летучие компоненты, которые, как было указано выше, приводят к ухудшению характеристик электронных приборов. Так как фирмы производящие клеи часто не указывают состав и скорости удельного газовыделения летучих соединений, это затрудняет прогнозирование срока службы устройства [25].

На рис. 8 представлены масс-спектры, иллюстрирующие процесс газовыделения с образцов клея ТПК-2, разработанного в ФКА ОАО «Композит», при температурах 80°C и 150°C. Хорошо видно, что с увеличением температуры растет содержание HCl и углеводородов в исследуемом объеме. Также, приведённые масс-спектры показывают, что основной летучей примесью клея ТПК-2 является водяной пар. Его присутствие в подкорпусном пространстве микросхемы может существенно ускорить процесс коррозии, негативно влияющей на эксплуатационный срок электронной аппаратуры. Из табл 2 видно, что выделение HF, H<sub>2</sub>O и HCl для новой отечественной разработки клея ТПК-2 ниже, чем у зарубежных образцов EPO-TEK H74UNF и Epotecny E207.

Таблица 2. Удельная скорость выделения летучих компонент (Па·м/с) при температуре 150°C

Летучая примесь	Клей		
	EPO-TEK H74UNF	Epotecny E207	ТПК-2
HF	$1.8 \cdot 10^{-7}$	$1.3 \cdot 10^{-8}$	–
HCl	–	$2 \cdot 10^{-7}$	$9.1 \cdot 10^{-9}$
H <sub>2</sub> O	$1 \cdot 10^{-4}$	$8.2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$



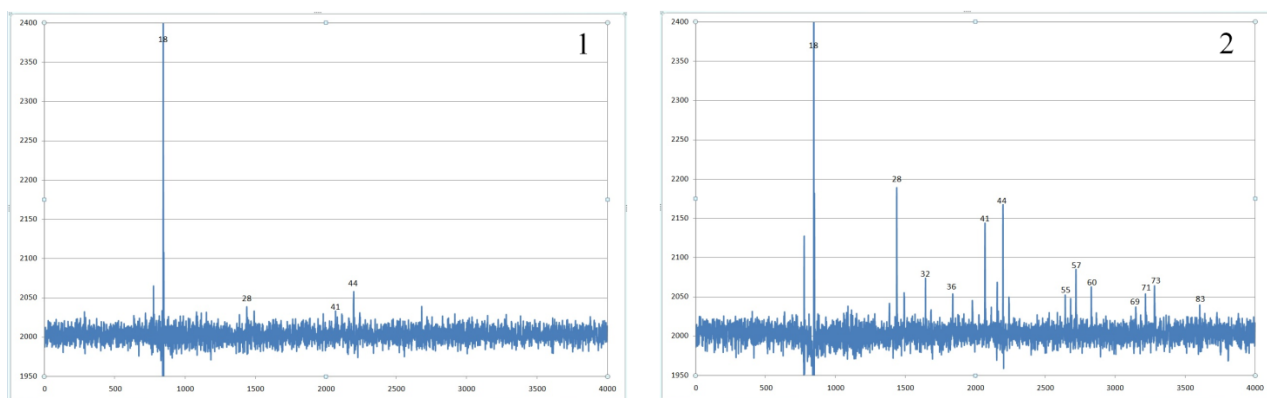


Рис. 8. Масс-спектры, соответствующие газовой выделению в процессе нагрева образца клея ТПК-2: 1 – температура 80°С и газовыделение 10<sup>-9</sup> Торр; 2 – температура 150°С и газовыделение 10<sup>-8</sup> Торр

Таким образом, необходимо учитывать парциальные давления влаги и углеводородов, образующихся из клеевых швов при эксплуатации электронных приборов для более точного установления их срока службы.

3. Источники влаги в корпусах обусловлены не только состоянием атмосферы при герметизации, но и дефектами в виде пор в керамике и клеевом соединении под кристаллом. В работе [26] с помощью растровой электронной микроскопии определялась структура керамики корпуса и клея, используемого для монтажа кристаллов. Были выявлены капиллярные каналы (поры) размером 0,2-3,9 мкм, которые являются источниками влаги в герметичных корпусах. Расчёты показывают, что внутри капилляра диаметром 0,2 мкм расчётное давление 1,4 МПа, а температура кипения воды в нём 250° С, Поэтому операция «Термообработка» не может полностью удалить влагу из капилляров из-за избыточного давления. Чтобы снизить содержания влаги на предприятии AS «ALFA RPAR» была опробована технология с инфракрасной сушкой. Обработанные таким образом корпуса микросхем проверялись на МКМ-1. Проверка показала, что при стандартной серийной технологии содержание влаги в подкорпусном пространстве микросхем находится в диапазоне 0,25%-0,35%, а при ИК обработке – в диапазоне 0,10%-0,20%. (табл 3).

Таблица 3. Данные эффективности работы ИК сушки

Тип технологического процесса	Процентное содержание влаги в подкорпусном пространстве микросхем			
	Серийная технология	0,29	0,32	0,25
Серийная технология с ИК сушкой	0,12	0,17	0,14	0,09

## Выводы

Разработан комплекс МКМ-1 для проведения методических и исследовательских работ по изучению десорбционных свойств материалов применяемых в микроэлектронике. Он позволяет проводить исследования по выявлению факторов, вызывающих снижение надёжности ИС, (в частности гидроксильная группа ОН<sup>-</sup>). Представленное средство измерения МКМ-1 позволяет проводить исследования, необходимые при выработке технических требований (стандартов) для новой продукции микроэлектронной промышленности. Выявлены дополнительные требования к подготовке образцов при проведении контроля содержания влажности, влияющие на точность проведения замера.

Созданный комплекс позволяет проводить измерения по определению концентрации паров воды в подкорпусных пространствах ИС малого (начиная с 0,01мм<sup>3</sup>), и большого (200 см<sup>3</sup>) объёма с высокой точностью. Комплекс пригоден для проведения контроля качества при производстве ИС.

### Список литературы

- [1] Орлов В.И. О принципе равнопрочной комплектации электронной компонентной базой аппаратуры космических аппаратов / В.И. Орлов, Федосов В.В. // 13-я Российская научно-техническая конференция «Сертификация ЭКБ-2014», Санкт-Петербург, 2014 г.
- [2] Lowry R. K. Harsh environments and volatiles in sealed enclosures / R. K. Lowry, R. C. Kullberg, D. J. Rossiter // Surface Mount Technology Association International Technical Conference, October 24-28, 2010, Orlando, FL, PP. 380-386
- [3] Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника. В 2-х книгах. М.: Техносфера. 2015.
- [4] Свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.31.001.A № 50950 Анализаторы влажности МКМ-1, 2013 г. №554
- [5] Investigation of moisture effects on selected microelectronic devices / K.L. Perkins, J.J. Licari, R.L. Buckelew // Proc. 1978 ISHM Symposium
- [6] Crawford W.M., Contamination of relay internal ambients / W.M. Crawford, B.L. Weigand // Fifteenth Annual Relay Conference, Stillwater, OK, 1956.
- [7] Eisenberg P.H., Effect of ambient gases and vapors at low temperature on solid state devices / P.H. Eisenberg, G.V. Brandewie, R.A. Meyer // Seventh New York Conference on Electronic Reliability, IEEE, NY, May 20, 1966.
- [8] Cannon D.L., The effect of cleanliness of integrated circuit reliability / D.L. Cannon, O.D. Trapp // Sixth Annual Reliability Physics Symposium Proceedings, IEEE, NY, 1968.
- [9] Thomas R.W. Government Microcircuits Digest Applications Conference / R.W. Thomas // San Diego, CA, 1972, pp.31–36.
- [10] Thomas R.W. Moisture in IC packages / R.W. Thomas, D.E. Meyer // Solid State Technology, 1974.
- [11] Koelmans H. // Twelfth Annual Proceedings Reliability Physics, 1974, pp. 168–171.
- [12] W. Paulson, Kirk L.W. // Twelfth Annual Proceedings Reliability Physics, 1974, pp. 172–179.
- [13] Thomas R.W. Moisture myths and microcircuits / R.W. Thomas // Proceedings 26th Electronic Components Conference, San Francisco, CA, April, 1976.
- [14] Comizzoli R.B. // *RCA Review* **37** (1976) 483.
- [15] Marderosian A. Der Humidity threshold variations for dendritic growth on hybrid substates / A. Der Marderosian, C. Murphy // Proceedings International Reliability Physics Symposium, Las Vegas, NV, 1977.
- [16] Somerville D.T. The role of hybrid construction techniques on sealed moisture levels / D.T. Somerville // Proceedings, 1987
- [17] Lowry R.K. Microcircuit corrosion and moisture control / R.K. Lowry // Microcontamination, May, 1985.
- [18] Kane D., Nondestructive moisture measurements in microelectronics / D.Kane, H. Domingos // Final Report, RADC-TR-87-210, November, 1987.
- [19] Федичкин И.И. Масс-спектрометрический метод определения концентрации паров воды в подкорпусном пространстве. Комплекс МКМ-1 / Р.В. Тюкальцев, Т.А. Никитина // Труды первой Российско-Белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной конференции» стр.217-220, 2013г

- [20] Stroehle D. On the penetration of gases and water vapor into packages with cavities and maximum allowable leak rates / D. Stroehle // Proceedings International Reliability Physics Symposium, Las Vegas, NV, April, 1977.
- [21] Graves J.F., Reliability effects of fluoride contamination of aluminum bonding pads on semiconductor chips / J.F Graves, W. Gurany // Solid State Technology, 1983.
- [22] [www.ors-labs.com](http://www.ors-labs.com)
- [23] Патент SU 1690023, Масс-спектрометр для газового анализа, 07.11.1991 ФТИ им. А.Ф. Иоффе, М.А. Иванов, Б.А. Мамырин Б.А., И.Л.Федичкин
- [24] Каратаев В.И. Ионный источник с магнитным полем для времяпролетного масс-спектрометра / В.И. Каратаев, Н.Н. Аруев // Письма в ЖТФ. 2011. том 37, вып. 12
- [25] Матвеев В.А. Обеспечение вакуума в приборах с внутренними клеевыми соединениями / В.А. Матвеев, М.А. Басараб, В.А. Крейсберг, Б.С. Лунин, Р.А. Захарян // Вестник МГТУ им Н.Э. Баумана, 2014, № 4 113
- [26] Солодуха В.А., Обеспечение надежности интегральных схем на стадии производства / В.А. Солодуха, А.С. Турцевич, И.И. Рубцевич, Я.А. Соловьев, А.Ф. Керенцев, А.А. Довженко, Е.П. Самцов // МНПК Современные информационные и электронные технологии, с. 8, 2013