

# МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОДУКЦИИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

инж. Федичкин И.Л., доц., к.ф.-м.н. Попов Е.О., инж. Тюкальцев Р.В., асп. Романов П.А., асп. Филиппов С.В., к.ф.-м.н. Колосько А.Г.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

Предложен новый методологический подход проверки качества продукции микроэлектронной промышленности предназначенной для использования в космической отрасли. Рассмотрены факторы, влияющие на надёжность работы интегральных схем и модульных конструктивов в экстремальных условиях космоса. Созданный приборный и методический инструмент – масс-спектрометрический комплекс МКМ-1 предназначен для проведения исследований по определению зависимости влагосодержания и концентраций активных радикалов от температуры внутри полости корпусов изделий. Проанализированы ряд изделий предприятий микроэлектроники для космической промышленности, изготовленных при использовании различных технологических процессов.

## Введение

Экстремальные условия космической среды: глубокий вакуум, радиация, значительные перепады температур, механические и химические факторы, - могут оказывать деструктивное влияние на функционирование космических аппаратов [1]. С целью повышения надёжности и долговечности работы бортовой аппаратуры на этапе приёмочных испытаний предъявляются более жесткие требования к составляющим ее электронным компонентам [2-4].

Важнейшим направлением улучшения качества производимой микроэлектронной продукции является контроль содержания влаги в подкорпусном пространстве интегральных схем и модульных изделий, а также идентификация и определение количества микропримесей, находящихся в конструкционных элементах. Наличие влаги и других микропримесей может вызывать коррозию в подкорпусном пространстве электронных изделий.

Первые работы по тестированию продукции электронной промышленности на содержание подкорпусной влаги появились уже в 60-х гг. прошлого века [5]. На рис.1 представлены возможные источники влаги в микросхемах.

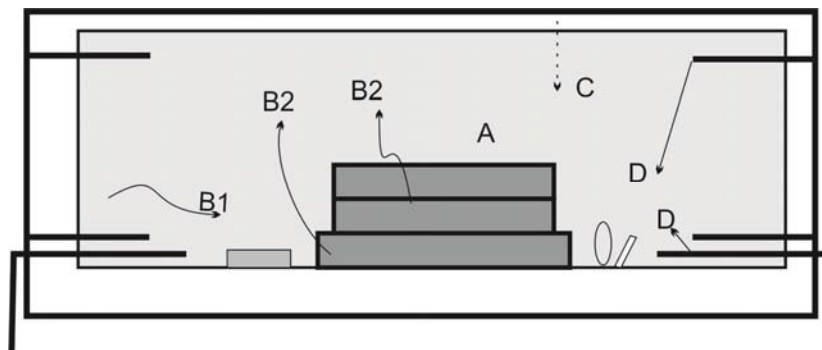


Рис.1. Источники влаги в микросхеме: А – газ, заполняющий микросхему; В1 – материал корпуса микросхемы; В2 – материалы, использованные в микросхеме (клеи и др.); С – диффузия через мембраны; D – течи

Наличие воды в устройствах нежелательно еще и потому, что она обеспечивает перенос имеющихся загрязнений, которые могут вызывать коррозию и сбои в работе микросхем. Многочисленные упоминания о таких механизмах коррозии и сбоях приведены в работах [6-8], а подробное описание – в статье [9]. В работе [10] описываются механизмы коррозии и экспериментальные способы выявления её причин. Примеси, вызывающие коррозию, воздействуют посредством отрицательных и/или положительных ионов, использующих воду в качестве носителя. Процесс коррозии усиливается и наличием электрического тока в цепи работающей микросхемы. Наиболее распространенными загрязнениями являются остатки кислот или щелочей, используемых в технологии изготовления продукции ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{PO}_4^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ). Приведем, примеры агрессивных химических реакций:



Коррозия может происходить и без водного носителя при наличии гидроксильного радикала ОН [11] или радикалов хлора, фтора, йода, образованных из галогенизированных органических растворителей, которые часто применяются при обработке поверхностей корпусов и кристаллов микросхем. Например, в [12] наблюдались значительные колебания содержания фтора в примесях алюминия, вызванные различиями в процессе плазменной обработки.

### Методика эксперимента

В модернизированном комплексе МКМ-1 используется времяпролётный масс-спектрометр, разработанный с учётом специфики требований ОСТ 11 073.013-2008 и ГОСТ РВ 5962-004.2-2012 по анализу паров воды и микроконцентраций активных примесей, находящихся в подкорпусном пространстве микросхем, изготавливаемых для бортового оборудования.

Основопологающим принципом работы прибора МКМ-1 является то, что подготовка, дегазация поверхности, вскрытие образца и выпуск из него анализируемого газа происходит при масс-спектрометрическом контроле газовой фазы. Это позволяет перед вскрытием корпуса проконтролировать минимизацию паров воды и газовых примесей, идущих с поверхности микросхемы и являющихся нежелательным фоном при проведении прецизионных измерений. 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. На рис.2 представлена функциональная схема комплекса МКМ-1. 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. Скорость замены образцов увеличивается также и за счёт полной автоматизации процесса измерения от загрузки корпуса до выдачи протокола замера. Это повысило производительность работы приборного комплекса в 2 раза, а число проведенных анализов до 16 образцов за смену.

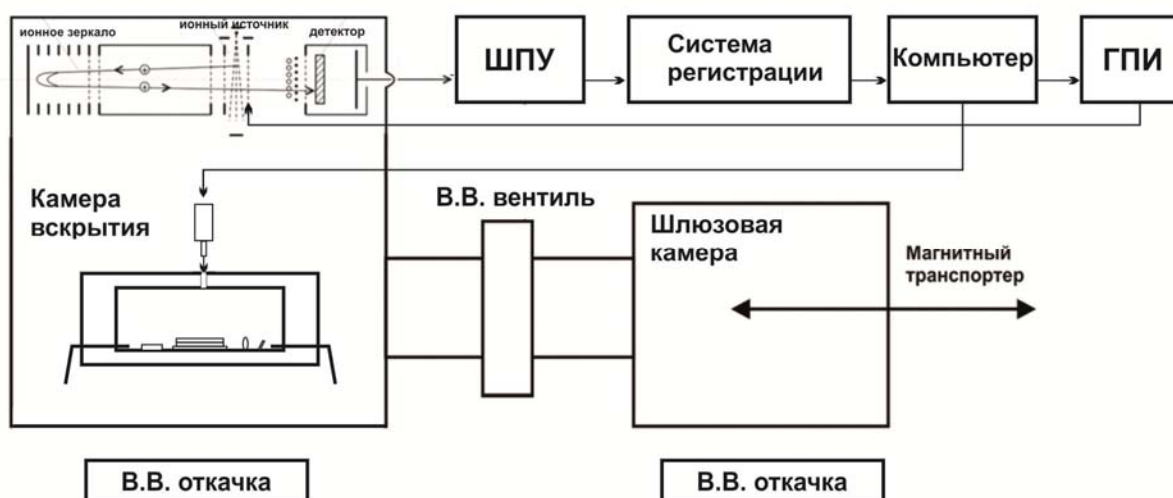


Рис. 2. Блок-схема измерительного комплекса МКМ-1: камера вскрытия и шлюзовая камера с высоковакуумной откачкой

Одной из ключевых особенностей комплекса является применение автоматизированного устройства пошагового микровскрытия. По достижении необходимого уровня фона прокалывающее устройство создаёт микротечь в корпусе микросхемы. Парогазовая смесь через полученное отверстие попадает в область ионизации масс-спектрометра заранее рассчитанным потоком, который зависит от величины образовавшегося отверстия и скорости откачки вакуумного насоса.

Программное обеспечение МКМ-1 предоставляет полное управление источниками питания масс-спектрометрической установки, а ее графический интерфейс позволяет наблюдать в режиме реального времени как мгновенные спектры, так и кинетику выбранных масс по заданным временным стробам. Интерфейс управляющей комплексом программы позволяет строить временные и температурные зависимости относительных концентраций паров воды и других газовых компонент. На рис.3 представлен 3D масс-спектр, иллюстрирующий изменение концентрации паров воды с ростом температуры микросхемы в режиме реального времени.

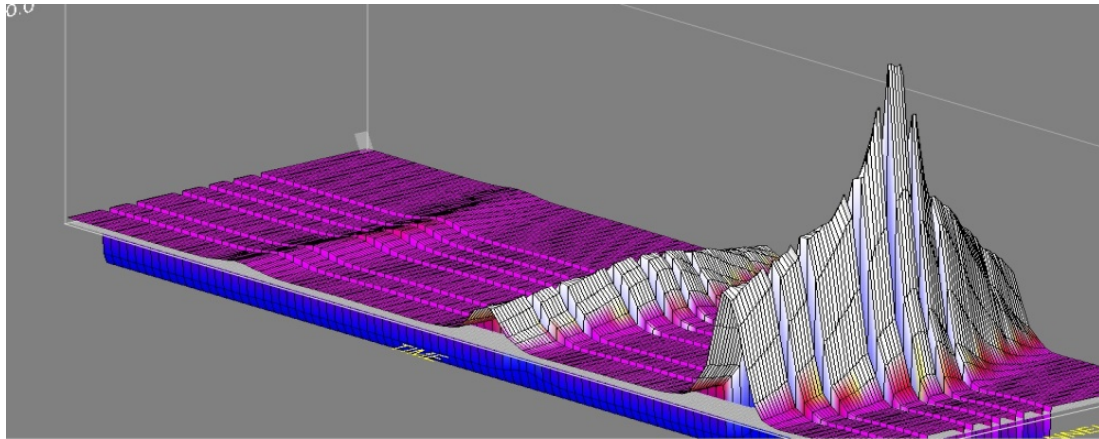


Рис.3. Кинетика концентрации паров воды в зависимости от температуры микросхемы

### Примеры применения методики

1. На масс-спектрометрическом комплексе МКМ-1 была выполнена работа для ЗАО «Светлана-Полупроводники» по определению причин повышенного содержания паров воды в подкорпусном пространстве некоторых типов микросхем. В таблице 1 представлены результаты измерений состава газа в подкорпусном пространстве. Из пунктов 2 и 3 таблицы видно, что отсутствие термообработки и вакуумной сушки приводит к повышенному содержанию влаги по сравнению с пустыми корпусами (п.1). Пункты 4-7 указывают на то, что в отличие от посадки кристаллов микросхемы на клей, посадка на эвтектику не увеличивает содержание влаги в подкорпусном пространстве.

Таблица 1. Результаты измерений состава газа в подкорпусном пространстве микросхем, изготовленных по технологиям 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

2. Для компании AS «ALFA RPAR» (г. Рига) было проведено исследование содержания влаги в корпусах микросхем, которые были обработаны по технологии дополнительной инфракрасной сушки при повышенных температурах. Идея заключается в удалении влаги из микрокапилляров, которые были обнаружены в работе [14]. В указанной работе с помощью растровой электронной микроскопии определялась структура керамики корпуса, а также клея, используемого для монтажа кристаллов. Были выявлены капиллярные каналы (поры) размером от 0,2 до 3,9 мкм. Расчёты показывают, что внутри капилляра диаметром 0,2 мкм расчётное давление может составлять 1,4 МПа, а температура кипения воды может достигать до 250°C.

Исследования на масс-спектрометре показали, что при стандартной термической обработке содержание влаги в подкорпусном пространстве микросхем находится в диапазоне 0,25 - 0,35%, а при инфракрасной обработке – в диапазоне 0,10 - 0,20 (см. табл. 2).

Таблица 2. Данные о влиянии дополнительной ИК сушки

Тип технологического процесса	Процентное содержание влаги в подкорпусном пространстве микросхем			
Серийная технология	0,29	0,32	0,25	0,30
Серийная технология с ИК сушкой	0,12	0,17	0,14	0,09

### Выводы

После проведенной модернизации, комплекс МКМ-1 стал превосходить по многим параметрам иностранные аналоги и в настоящее время позволяет:

- быструю смену образцов и проведение полного масс-спектрометрического анализа до 16 образцов за смену.

- минимизировать фоновые концентрации паров воды и газовых примесей, идущих с поверхности микросхемы, непосредственно перед вскрытием корпуса, что позволяет проводить прецизионные измерения.

- обеспечивать доставку газовой пробы и паров воды из подкорпусного пространства объекта непосредственно в измерительную область масс-спектрометра, что на порядок повышает точность и воспроизводимость результатов.

- расширить линейный и объёмный диапазон измеряемых корпусов в 20 раз, что позволяет проводить замеры микросхем с внутренними объёмами от 0,01мм<sup>3</sup> до 500 см<sup>3</sup> и с линейными размерами от 0,1 мм до 100 мм.

Проведены исследования изделий ЗАО «Светлана-Полупроводники» и AS «ALFA RPAR», выявлены факторы, вызывающие снижение надёжности интегральных микросхем.

Модернизированный комплекс МКМ-1 позволяет проводить целенаправленный отбор материалов и технологических процессов, применяемых при изготовлении изделий микроэлектронной промышленности.

### Список литературы

- [1] А.И. Белоус, В.А. Солодуха, С.В. Шведов, *Космическая электроника*. В 2-х книгах, Техносфера, Москва, 2015, 696 с.
- [2] В.И. Орлов, В.В. Федосов, *О принципе равнопрочной комплектации электронной компонентной базой аппаратуры космических аппаратов*, 13-я Российская научно-техническая конференция «Сертификация ЭКБ-2014», Санкт-Петербург, (2014).
- [3] R.K. Lowry, R.C. Kullberg, D.J. Rossiter, *Harsh environments and volatiles in sealed enclosures*, Proceedings of Surface Mount Technology Association International Technical Conference, Orlando, (2010).
- [4] Свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.31.001.A № 50950. Анализаторы влажности МКМ-1, 2013, №554.
- [5] P.H. Eisenberg, G.V. Brandewie, R.A. Meyer, *Effect of ambient gases and vapors at low temperature on solid state devices*, Seventh New York Conference on Electronic Reliability, IEEE, (1966).
- [6] R.W. Thomas, *Moisture myths and microcircuits*, Proceedings 26th Electronic Components Conference, San Francisco, (1976).
- [7] K.L. Perkins, J.J. Licari, R.L. Buckelew, *Investigation of moisture effects on selected microelectronic devices*, Proc. ISHM Symposium (1978).
- [8] R.K. Lowry, *Microcircuit corrosion and moisture control*, Microcontamination, (1985).
- [9] D.T. Somerville, *The role of hybrid construction techniques on sealed moisture levels*, Proceedings IRPS, Las Vegas (1987).
- [10] D. Kane, H. Domingos, *Nondestructive moisture measurements in microelectronics*, Final Report, RADC-TR-87-210 (1987).
- [11] И.Л. Федичкин Р.В. Тюкальцев, Т.А. Никитина, *Масс-спектрометрический метод определения концентрации паров воды в подкорпусном пространстве. Комплекс МКМ-1*, Труды первой Российско-Белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной конференции», (2013).
- [12] J.F Graves, W. Gurany, *Reliability effects of fluoride contamination of aluminum bonding pads on semiconductor chips*, Solid State Technology (1983).
- [13] D. Stroehle, *On the penetration of gases and water vapor into packages with cavities and maximum allowable leak rates*, Proceedings International Reliability Physics Symposium, Las Vegas, (1977).
- [14] В.А. Солодуха, А.С. Турцевич, И.И. Рубцевич, Я.А. Соловьев, А.Ф. Керенцев, А.А. Довженко, Е.П. Самцов, *Обеспечение надежности интегральных схем на стадии производства*, МНПК Современные информационные и электронные технологии, (2013).