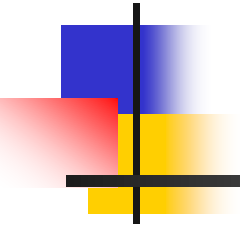


Электронная компонентная база космических систем

Подкорпусная влага в интегральных схемах – состояние и проблемы

Д.т.н., заместитель директора АО «ИТЦ – НПО ПМ» Федосов В.В.





Подкорпусная влага и ее влияние на надежность интегральных схем

- Испытания на содержание паров воды в подкорпусном пространстве предназначены для выявления ИС, потенциально ненадежных к отказу по причине ускорения процессов деградации металлизации соединений (роста дендритов и т.п.) на кристалле в атмосфере с высоким содержанием влаги в подкорпусном пространстве ЭРИ.
- Особенностью данного типа отказов является то, что их риск не выявляется традиционными для полупроводниковых структур методами (путем проведения испытаний на надежность и безотказность), вероятность отказа растет с уменьшением температуры, а не с увеличением, отказ проявляется не сразу, а через несколько лет.
- Отказ является редким, и актуальность данного метода ранее, при сроке активного существования космического аппарата в пределах 3-5 лет, не была столь существенной, как в настоящее время, когда планируемый срок активного существования аппарата достигает 10-15 лет. Из-за относительной редкости предотвращение отказов данного типа для ремонтпригодных изделий военной техники сопоставимо по стоимости с устранением возможных неисправностей и их последствий.
- Таким образом, отказ по причине повышенного содержания влаги в подкорпусном пространстве ИС является критически важным именно для объектов космического назначения, т.к. именно там цена последствий отказа существенно превышает стоимость мер по его предотвращению.

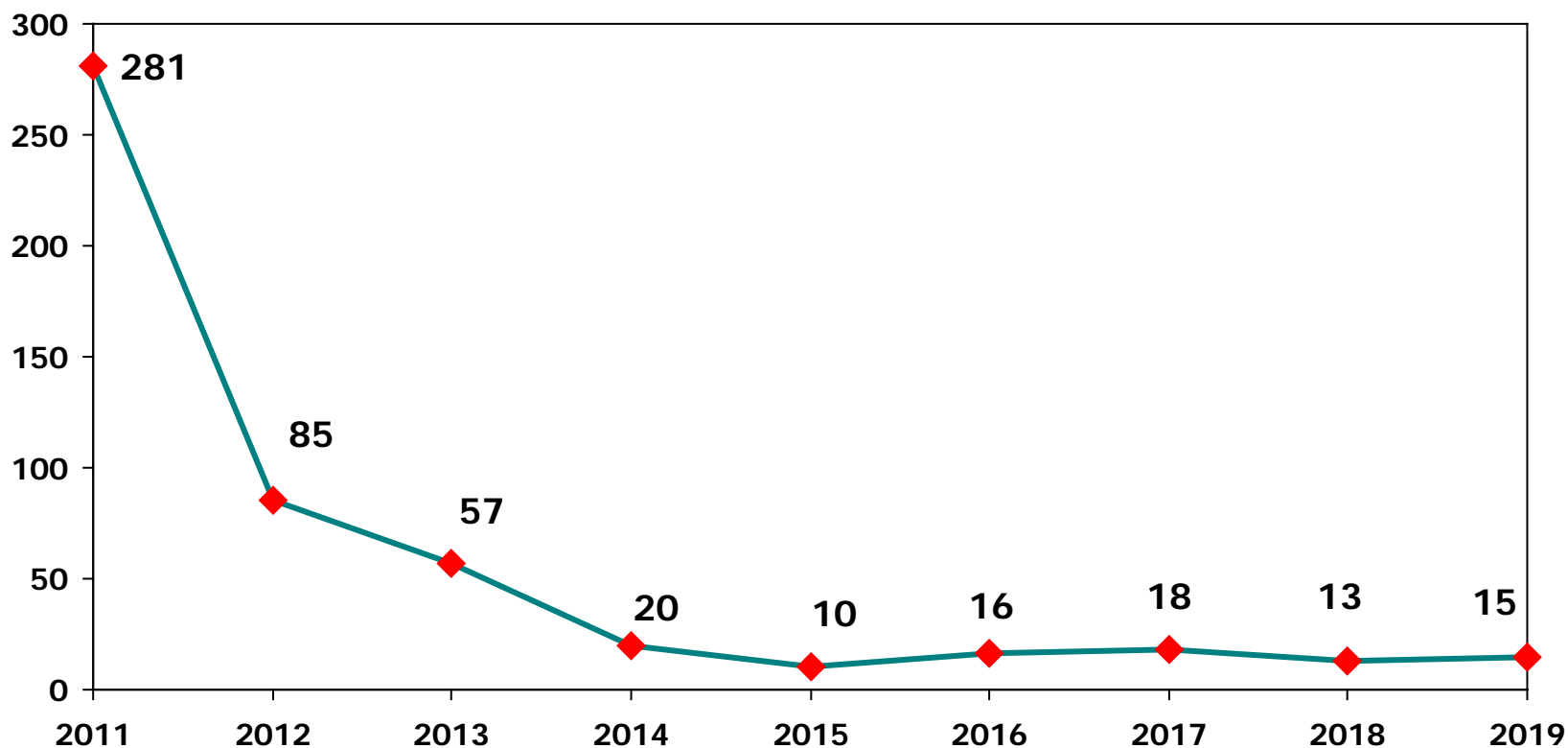


Подкорпусна влага и ее влияние на надежность интегральных схем

Испытание на содержание паров воды в подкорпусном пространстве ИС допускает высокую погрешность $\pm 20\%$ и методическую неопределенность, что приводит к неоднозначности результатов испытаний разными испытательными центрами при использовании разного испытательного оборудования или разных схем подготовки образцов к испытаниям.

- Далее приведены примеры несоответствий результатов испытаний разных центров для одной партии ЭРИ. По ним можно заметить, что в условиях очевидно высокого или очевидно низкого содержания влаги показания различных испытательных центров в целом соответствуют друг другу, но в диапазоне объемного содержания влаги от 0,2 до 1% существует высокая разница показаний, исключить которую действующий стандарт не позволяет, что при норме забракования в 0,5% приводит к постоянным конфликтам производителей и потребителей элементной базы в процессе рекламационной работы.
- Результатом подобных неоднозначных результатов испытаний является существенный материальный ущерб для государства как основного заказчика и источника финансирования запуска космических аппаратов.
- Также можно отметить, что производитель предоставил во второй партии образцы, полностью прошедшие испытания, что говорит о принципиальной возможности обеспечить необходимую надежность.

Забракование партий ИС в АО «ИТЦ-НПО ПМ» по результатам испытаний на наличие подкорпусной влаги





Установки контроля подкорпусной влаги в России

Тип установки	Организация
ДМТ	АО «ИТЦ-НПО ПМ»
—''—	ООО «ИРЗ-Тест»
—''—	АО «Электронстандарт»
—''—	АО «РКС
МКМ-1	АНО «АКНИИПО»
—''—	АО «ЗНТЦ»
—''—	ФГУП «МНИИРИП»
—''—	ОАО «Интеграл»
—''—	ЗАО «Светлана-Полупроводники»

Примеры несоответствий и соответствий результатов измерений процентного содержания паров воды для одной и той же партии ИС производства ОАО «Интеграл»

Партия №	Тип ЭРИ	Извещение / дата изготовления	Результаты АО «ИТЦ-НПО ПМ» %	Результаты ОАО «Интеграл» %	Примечание
1	ОСМ 1554ЛН1ТБМ	192/373 19.16	0,31 0,52 0,9 1,4	0,13 0,12 0,14 0,17	Брак - ИТЦ, годен - изготовитель
2	ОСМ 1554ЛН1ТБМ	193/044 19.24	0,013 0,015	0,08	Годен
1	ОСМ 1554ЛР13ТБМ	193/370 19.30	2,9 2,4	0,34	Брак - ИТЦ, Годен - изготовитель
2	ОСМ 1554ЛР13ТБМ	151/782П 15.07	0,09 0,05	-	Годен
1	ОСМ 5584ТЛ2АТ	193/338 19.29	1,3 2,7	0,16	Брак - ИТЦ, Годен - изготовитель
2	ОСМ 5584ТЛ2АТ	193/065 19,25	0,02 0,01	0,12 -	Годен
1	ОСМ 1594ТМ2Т	184/714 18.47	1 1	0,08 0,3	Брак -ИТЦ, годен изготовитель
2	ОСМ 1594ТМ2Т	193/070 19.25	0,023 0,028	0,05 -	Годен

Пример измерения содержания подкорпусной влаги для партии
микросхем ОСМ 1554ЛР13 ТБМ
(извещение 193/370, дата изготовления 19.30) на разных установках

Результаты измерения АО «ИТЦ-НПО ПМ» %	Результаты измерения ОАО «Интеграл» %	Результаты измерения АО «Электронстандарт» %	Результаты измерения АО «Светлана- Полупроводники» %
ДМТ	МКМ-1	ДМТ	МКМ-1
2,9 2,4	0,34	2,5	0,34
Брак	Годен	Брак	Годен



Соответствие оборудования ДМТ и МКМ-1 требованиям стандартов ОСТ 11 073.013 и MIL-STD-883 (метод 1018)

- Сравнение испытательного оборудования по контролю содержания подкорпусной влаги:
 - Оборудование МКМ-1 соответствует отечественному стандарту ОСТ 11.073.013 (с ограничениями) и не соответствует требованиям MIL-STD-883;
 - Оборудование ДМТ соответствует (в целом) ОСТ В 11.073.013 и ранней версии MIL-STD-883 , но имеет несоответствие последней его версии.
- Далее приведен сравнительный анализ требований отечественных и западных стандартов к методу испытаний, к подготовке образцов, верификации результатов испытаний.

Сравнительный анализ соответствия требований отечественного стандарта ОСТ В 11.073.013 и стандарта MIL-STD-883 к методу испытаний на подкорпусную влагу (1)

№	Требование к оборудованию	ОСТ В 11.073.013	Mil Std 883E 1996 (вторая редакция)	Mil Std 883K 2018 (десятая редакция метода)	Соответствие оборудования «Спектромасс» Mil Std 883K	Соответствие оборудования ДМТ Mil Std 883K
1	Диапазон контроля атомных единиц масс (а.е.м.)	1-100	1-100	1-140	Соответствует	Соответствует
2	Требование по соотношению уровня сигнала к уровню шума (фона) для паров воды при 0.5% объемного содержания.	Отсутствует	Отсутствует	20 к 1 или лучше	Не соответствует	Соответствует
3	Требование по соотношению уровня сигнала к уровню шума (фона) для иных газов на уровне точки бракования	Отсутствует	Отсутствует	20 к 1 или лучше	Не соответствует	Соответствует
4	Предел детектирования для паров воды, миллионных объемных долей	100	500	250	Соответствует	Соответствует
5	Предел детектирования для азота, кислорода, аргона, углекислого газа, гелия, милл. объемных долей	Отсутствует	Отсутствует	50	Соответствует	Соответствует
6	Предел детектирования для водорода и фторуглеродов (массы 69 и 119)	Отсутствует	Отсутствует	50	Может быть откалиброван	Может быть откалиброван
7	Отдельная камера для вскрытия образца с линией, обеспечивающая передачу исследуемой газовой смеси без существенных потерь влаги в камеру анализа масс-спектрометра	Требование о наличии	Требование о наличии	Требование о наличии	Не соответствует	Соответствует

Сравнительный анализ соответствия требований отечественного стандарта ОСТ В 11.073.013 и стандарта MIL-STD-883 к методу испытаний на подкорпусную влагу (2)

№	Требование к оборудованию	ОСТ В 11.073.013	Mil Std 883E 1996 (вторая редакция)	Mil Std 883K 2018 (десятая редакция метода)	Соответствие оборудования «Спектротомас» Mil Std 883K	Соответствие оборудования ДМТ Mil Std 883K
8	Поддержание температуры исследуемого образца при испытаниях, °С	100±5	100±5	100±5	Соответствует с замечаниями	Соответствует
9	Устройство прокола образца, которое обеспечивает герметичность масс-спектрометрической системы	Требование о наличии	Требование о наличии	Требование о наличии	Соответствует	Соответствует
10	Датчик давления в камере прокола	Отсутствует	Отсутствует	Требование о наличии	Соответствует	Соответствует
11	Требование о наличии в лаборатории калибровочных образцов (имитаторов)	Отсутствует	Отсутствует	Требование о наличии	Соответствует Mil Std 883E	Соответствует Mil Std 883E
12	Требование по заполнению калибровочных образцов газовой смесью от генератора влажного газа с метрологически контролируемыми параметрами	Отсутствует	Отсутствует	Есть	Не соответствует	Соответствует
13	Требования по размеру внутренней полости калибровочного образца	Отсутствует	Набор из трех объемов от 10мм³ до 0,1 см³	Минимальный объем, характерный для испытываемых	Не соответствует	Не соответствует

Сравнительный анализ соответствия требований отечественного стандарта ОСТ В 11.073.013 и стандарта MIL-STD-883 к методу испытаний на подкорпусную влагу (3)

№	Требование к оборудованию	ОСТ В 11.073.013	Mil Std 883E 1996 (вторая редакция)	Mil Std 883K 2018 (десятая редакция метода)	Соответствие оборудованию «Спектромасс» Mil Std 883K	Соответствие оборудованию ДМТ Mil Std 883K
14	Требования к гигрометру точки росы, используемому при калибровке испытательной системы	Отсутствует	Калибровка в аккредитованной лаборатории	Калибровка в аккредитованной лаборатории с точностью $\pm 0,2$ °C	Не соответствует	Соответствует
15	Последовательное сканирование с получением спектрограммы во всем диапазоне анализа	Отсутствует	Отсутствует	Требование о наличии	Соответствует	Соответствует
16	Разрешение по массам	Отсутствует	1 а.е.м	1 а.е.м	Соответствует	Соответствует
17	Погрешность, $\pm\%$	20	20	10	Соответствует	Соответствует

Требование к методу испытаний, к подготовке образцов, верификации результатов испытаний (1)

№	Требование к методу испытаний, к подготовке образцов, верификации результатов испытаний.	Наличие в ОСТ 11 073.013	Наличие в MIL-STD-883E (ред. 1996г.)	Наличие в MIL-STD-883K (ред. 2018г.)
1	Цель испытаний	Проверка, что содержание паров воды в подкорпусном пространстве не превышает 0,5 объемных процентов	Количественная оценка содержания состава газов и содержания паров воды, отслеживание содержания типовых газов.	Количественная оценка содержания состава газов и содержания паров воды, отслеживание содержания типовых газов, используемых при герметизации, наличия агрессивных газов, газов указывающих на негерметичность (гелий, отношение кислорода к аргону)
2	Требования о сличении результатов различных лабораторий	Отсутствует	Есть	Есть
3	Методика проверки испытательного оборудования калибровочными образцами	Отсутствует	Отсутствует	Есть
4	Методика калибровки другими газами	Отсутствует	Отсутствует	Есть

Требование к методу испытаний, к подготовке образцов, верификации результатов испытаний (2)

№	Требование к методу испытаний, к подготовке образцов, верификации результатов испытаний.	Наличие в ОСТ 11 073.013	Наличие в MIL-STD-883E (ред. 1996г.)	Наличие в MIL-STD-883K (ред. 2018г.)
5	Состав калибровочной смеси	Отсутствует	Фторуглеродород (масса 69), N ₂ , He, O ₂ , CO ₂ , Ar, CH ₄ .	Фторуглеродород (масса 69), NH ₃ , H ₂ , N ₂ , He, O ₂ , CO ₂ , Ar, CH ₄ .
6	Методика подготовки образца к испытаниям	Отсутствует	Предварительный прогрев образца при 100±5°C в течение 12-24 часов	Предварительный прогрев образца при 100±5°C в течение 18-24 часов и не более 5 минут на перенос в прогретую до 100±5°C камеру прокола, установление температуры образца в камере прокола и выдержка 10 минут
7	Требование о периодичности калибровки	Аттестация раз в год.	Аттестация раз в год, ежедневная проверка показателей калибровки	Аттестация раз в год, ежедневная проверка показателей калибровки
8	Признание образца браком	Объемное содержание паров воды выше 0,5%	Объемное содержание паров воды выше 0,5%	Объемное содержание паров воды выше 0,5%, содержание кислорода выше 1%, содержание фторуглеродородов выше 50 миллионных долей

Причины различия величин измеренных значений подкорпусной влаги на оборудовании ДМТ и МКМ-1

ДМТ	МКМ-1
Аттестация с использованием поверочных газовых смесей и генератора влажного газа. Калибровка с использованием генератора влажного газа и встроенного объема	Поверка с использованием генератора влажного газа Калибровка с использованием генератора влажного газа
Подготовка образца: В камере прокола идет нагрев и откачка до порога по парам воды	Подготовка образца: Внешняя очистка и прогрев (около 1,5 часов) обязательны для предупреждения загрязнения масс-спектрометра
Вся камера прокола и магистрали нагреты	Нагрев образца ИК-излучением
Прокол в отдельной камере: <ul style="list-style-type: none">- опускание иглы до скачка давления в камере прокола,- из микросхемы выходит весь объем газа,- ступенчатое уменьшение давления до 0,1 мбар,- напуск в масс-спектрометр,- давление в масс-спектрометре всегда одинаковое (при проколах и при калибровке)	Прокол в камере масс-спектрометра: <ul style="list-style-type: none">- опускание иглы ступенчатое (вниз 40 мкм, вверх 20 мкм) до скачка давления в масс-спектрометре.- игла запирает собой отверстие,- газ выходит через малую щель,- давление в масс-спектрометре зависит от положения иглы.
Из микросхемы выходит и анализируется весь объем газа, давление газа в микросхеме снижено.	Анализируется газ, выходящий из микросхемы через узкую щель, давление газа в микросхеме в момент измерения сравнимо с герметичной. При высоком содержании влаги показания занижаются (по опыту сравнительных испытаний до 10 раз), т.к. через щель сначала (в момент измерения) проходит газ с пониженным содержанием влаги.



Заключение

1. Производством установок для определения концентрации паров воды масс-спектрометрическим методом занимаются две компании: ООО «ДМТ Трейдинг», г. Минск и ООО «Спектромасс», г. Санкт-Петербург.
2. Калибровку масс-спектрометров проводят двумя способами: при помощи парогенератора и поверенного датчика точки росы или при помощи калибровочных капсул с заданным содержанием паров воды. Калибровочные капсулы в Российской Федерации и в Республике Беларусь никто не производит.
3. На сегодняшний день в эксплуатации находятся три эталона паров воды: в БелГИМ, г. Минск, во ВНИИМ им. Менделеева, г. Санкт-Петербург и в филиале ВНИИМ, г. Иркутск.
4. В соответствии с последней редакцией MIL-STD-883 определение концентрации паров воды необходимо проводить по эталонным капсулам с известной концентрацией паров воды (имеет особое значение проверка при граничном значении брак/годен - 5000ppm). Определение концентрации влаги в капсулах проводится с привязкой к национальному эталону влаги.



Заключение

Считаем целесообразным реализовать следующий план работ по урегулированию системы измерения концентрации паров воды в подкорпусном пространстве изделий микроэлектроники:

1. Разработать и изготовить установку изготовления эталонных капсул с известной концентрацией паров воды с привязкой к национальным эталонам влаги (действующий прототип установки находится в АО «Электронстандарт», г. Санкт-Петербург, предварительные работы проводились в 2016-2017г.)

2. Разработать и утвердить методику сличения, а также единую методику метрологической аттестации всех типов масс-спектрометров находящихся в эксплуатации испытательных центров и предприятий микроэлектроники.

3. Учитывая масштабность предполагаемых работ, необходимо разработать программу с четким финансированием и поддержкой заинтересованных Государственных структур (Минпромторг, РосКосмос, РосЭлектроника, ГосСтандарт и др.)