

# В ПОИСКАХ СТАНДАРТОВ МЭМС

## ФЕРМЕРЫ ПРОТИВ КОВБОЕВ

Стандарты способствуют появлению инновационных изделий и новых рынков.

Патрик Галлагер, директор NIST

В.Шурыгина

Сегодня производство МЭМС сильно диверсифицировано, продажи лишь для небольшого числа приложений превышают 200 млн. долл. Развитие МЭМС-технологии не следует плану развития полупроводниковой промышленности, заданному дорожной картой. На рынке присутствует множество игроков, представляющих одни и те же типы МЭМС, но выполненные различными методами (иногда в одной компании) по принципу, сформулированному компанией Yole Développement, – для каждого поставщика "одно изделие, единственно возможный процесс, единственно возможный корпус, единственно возможное испытание". Для дальнейшего развития МЭМС-промышленность все больше нуждается в стандартных решениях. В идеале стандарты определяют правила проектирования, средства моделирования, тип корпуса, процессы и процедуры испытаний, формат технического паспорта изделия (data sheet), учитываемые неэлектрические параметры и максимальные экологические показатели. Именно такие стандарты существуют в полупроводниковой промышленности. Для МЭМС таких стандартов нет. Как эта проблема решается сегодня в промышленности, где и поставщики, и потребители изделий стремятся к ее развитию, но мнения о путях достижения этого различаются?

### ПОЧЕМУ НУЖНЫ СТАНДАРТЫ?

Отношение к стандартизации изготовителей комплексного МЭМС-оборудования и поставщиков МЭМС различно. Их дискуссия напоминает тему давнего мюзикла Ричарда Роджерса и Оскара Хаммерстайна "Оклахома" – "фермер и ковбой должны жить дружно". Но фермеры стремятся ограждать свои угодья, чтобы защитить урожай от крупного рогатого скота,

а хозяева ранчо хотят, чтобы их скот имел "свободный доступ" к земле. Поставщики МЭМС, как и фермеры, хотят защищать свои интеллектуальные устройства за счет использования запатентованных процессов их производства, тогда как заказчики, наподобие ковбоев, требуют "открытости", позволяющей работать со многими поставщиками, в том числе и с конкурентами, для получения

высоких доходов в результате больших объемов производства. Правда и среди "фермеров" не существует единого подхода к стандартизации. Сильный агрессивный поставщик может занять ведущее положение на рынке и надеяться на то, что в результате стандартизации его продукции конкуренты примут его технологию или ей последуют многие отраслевые производители. Тогда как небольшие производители могут предпочесть диверсификацию и объединиться для подготовки нужных им стандартов.

Руководитель работ по сенсорной технологии компании Intel Стив Валлей считает, что МЭМС-приборы должны соответствовать, прежде всего, стандартам на параметрические испытания, на оценку их результатов и калибровки, приведенным в data sheets. Это позволит сравнивать продукты различных поставщиков на основе сравнимых показателей. Того же мнения придерживается и руководитель производства потребительских и промышленных сенсоров компании Freescale Semiconductor Джанет Вилсон, которая хотела бы иметь стандарты для определения и спецификации эффективности алгоритмов с тем, чтобы можно было сравнивать различные алгоритмы на основе данных data sheets.

Крупные поставщики комплексного оборудования, особенно для рынка потребительских товаров, стремясь сохранить некоторую дифференциацию в условиях конкуренции, никогда не придут к единому мнению. Такие компании оптимизируют собственные технологии. И все же по мере развития МЭМС-промышленности стандартизации выпускаемых изделий будет уделяться все больше внимания.

### КАКОВО ЖЕ СЕГОДНЯ ПОЛОЖЕНИЕ ДЕЛ В ОБЛАСТИ СТАНДАРТИЗАЦИИ МЭМС?

В ходе развития новой промышленности наступает время, когда царящий беспорядок перестает вызывать новые дикие идеи и начинает лишь вносить небольшие помехи на пути прогресса. И поставщики, и покупатели стремятся к установлению хоть какого-нибудь порядка, в первую очередь, благодаря стандартам. Фактически стандарты уже имеются, хотя пока не понятно кто, если вообще кто-то, ими пользуется. Многие универсальные стандарты, касающиеся размеров корпусов

и протоколов связи, выпущены такими организациями, как Объединенный технический совет по электронным приборам (JEDEC) и Институт инженеров электротехники и электроники (IEEE). Отраслевой альянс разработчиков интерфейсов мобильных промышленных процессоров (MIPI Alliance) продвигает стандарты на аппаратные и программные средства для мобильных устройств, в которых МЭМС широко применяются. Международная инициатива по производству электроники iNEMI разрабатывает план развития технологии МЭМС. Но, конечно, интерес представляют стандарты технического комитета по микро- и наноэлектромеханическим системам (МЭМС/НЭМС) при Ассоциации производителей полупроводникового оборудования и материалов (SEMI), предназначенные непосредственно для МЭМС-устройств и сенсоров. К настоящему времени комитетом опубликовано 10 стандартов, относящихся к метрологии, микрофлюидике и терминологии. Разработка этих стандартов в значительной степени обусловлена разногласиями между производителями и покупателями относительно производственных показателей различных процессов. Так, соединение пластин должно быть достаточно прочным, но поставщики измеряют этот параметр одним способом, а их заказчики – другим. В конце концов, они были вынуждены остановиться на одном методе, следовательно, потребовался стандарт. При разработке стандартов сначала формулировались требования к решению общих задач МЭМС-промышленности, таких как измерение характеристик тонких пленок. После их успешного внедрения можно двигаться дальше по технологической цепи и определять вопросы, требующие стандартизации.

К стандартам по метрологии относятся следующие.

**SEMI MS1-0307** – стандарт на метки совмещения, используемые при сварке пластин. Содержит концепцию определения размеров, местоположения, числа и типа меток совмещения, размещаемых на каждой из двух соединяемых пластин. Метки предназначены для юстировки двух экспонированных пластин до операции их сварки. Стандарт касается меток, которые используются при совмещении внутренних и внешних поверхностей пластин. Последняя публикация – март 2006 года. Изменения не предвидятся.

**SEMI MS2-0307** – стандарт на метод определения высоты ступенек тонких отражающих пленок с помощью оптического интерферометра. Измерение высоты ступеньки позволяет установить значения толщины пленки, что может использоваться при разработке и изготовлении МЭМС-приборов для определения характеристик пленок. Стандарт применим для используемых в МЭМС материалов, которые могут быть точно отображены с помощью оптического инструмента или аналогичного устройства, позволяющего получать топографические двумерные изображения. Измерения также могут быть полезными для определения толщины консольной балки при расчете модуля Юнга. Утвержден комитетом MEMS/NEMS в июле 2009 года.

**SEMI MS4-1107** – стандарт на метод определения модуля Юнга тонких отражающих пленок на основе частоты резонирующих консольных или укрепленных балок. Модуль Юнга – параметр материала, который многие годы разработчикам МЭМС не удавалось точно замерять. Стандарт предназначен для измерения модуля Юнга используемых в МЭМС тонких пленок, изображение которых может быть получено с помощью бесконтактного оптического виброметра, стробоскопического интерферометра или аналогичного инструмента. Модуль определяется по значению средней резонансной частоты однослойного кантилевера с боковым перемещением. На основе его значения можно рассчитать остаточное

напряжение, которое в свою очередь способствует выбору методов изготовления и постобработки, обеспечивающих высокий выход годных и уменьшение частоты отказов, вызываемых электромиграцией, перераспределением напряжений и расслоением пленок. Стандарт опубликован в октябре 2007 году.

**SEMI MS5-1211** – стандарт на измерение прочности сварки пластин с помощью микрорешетчатых тестовых структур. Прочность соединения измеряется в единицах энергии, отнесенных к единице площади. Две пластины свариваются при изготовлении акселерометров, гироскопов, микронасосов или микроклапанов для интеллектуальных и навигационных систем автомобилей, а также для медицинского оборудования. Поскольку при эксплуатации на такие сборки действуют большие механические нагрузки, плоскость сопряжения пластин должна быть высокопрочной, ее токи утечки – малыми и надежность – высокой. Стандарт определяет параметры, от которых зависит прочность соединения (износ и коррозия, вызываемые механической нагрузкой). Прочность сварки важна для изготовителей и потребителей МЭМС-устройств, а также для производителей оборудования и материалов подложек. Опубликован в октябре 2007 года.

**SEMI MS8-0309** – стандарт, устанавливающий метод оценки герметичности корпусов МЭМС. Его цель – сбор и формулировка всех аспектов герметичности. Все современные

корпуса МЭМС не должны препятствовать перемещению смонтированных в них элементов. Вот почему SEMI выпустил стандарт по оценке герметичности корпусов МЭМС, в котором также рассматривается определение герметичности небольших внутренних объемов, присущих МЭМС (см. таблицу).

Стандарт был опубликован в феврале 2009 года. Сейчас в результате накопления данных о характерных особенностях МЭМС он дорабатывается, и скорректированный вариант готовится к публикации.

Особое внимание комитет МЭМС/НЭМС уделяет газопроницаемости материалов-уплотнителей, по значению которой определяется – годен или негоден этот материал для применения в качестве уплотнителя. Хотя этот параметр имеет первостепенное значение для обеспечения герметичности корпуса, данных о нем мало.

Другая важная проблема, касающаяся герметичности корпусов МЭМС, – обоснованность современных методов, используемых для измерения утечек и анализа остаточных газов. Эти методы были разработаны для корпусов с большим, чем сейчас объемом, и не надежны или вовсе не приемлемы для корпусов меньшего объема (в среднем менее 0,02 см<sup>2</sup>). В новом варианте стандарта будут рассмотрены релевантные стандартные методы тестирования и недавно разработанные методы с тем, чтобы получить объективные данные об их достоинствах и недостатках. Теоретически с ростом объема производства коммерчески доступных МЭМС в герметичных корпусах появится и высокопроизводительный, неразрушающий метод контроля качества таких устройств. Возможно, один из методов, рассматриваемых в MS8 руководстве, будет оформлен как самостоятельный стандарт.

**SEMI MS10-0912** – стандарт на измерение газопроницаемости материалов корпусов МЭМС. Выпущен в конце сентября 2012 года.

Три стандарта комитета МЭМС/НЭМС относятся к микрофлюидным устройствам. Сегодня промышленность микрофлюидики представляет собой фрагментированный медицинский бизнес. Микрофлюидная система содержит блок вспомогательного оборудования и разнообразные расходные вспомогательные приспособления и материалы одноразового применения, формирующие ее

экосистему и приносящие доход ее поставщику. И сейчас каждая компания, занимающаяся микрофлюидной техникой, стремится создавать и контролировать собственную закрытую экосистему с тем, чтобы управлять всеми вопросами бизнеса и, следовательно, получать все доходы и прибыли.

Но для этого флюидные системы нужно вывести из дорогостоящих лабораторий с высококласными специалистами и установить в местных обычных клиниках, где другое оборудование, другие документы, врачи и пациенты. Управлять ими будет менее квалифицированный медицинский персонал. В результате выполнять каждое назначение с помощью разного оборудования, каждое со своей экосистемой, не удастся. Более ценным является оборудование, пригодное для проведения различных исследований. Сменные расходные элементы могут содержать все необходимые для анализа материалы, кроме исследуемого образца, а оборудование – просто считывать и воспроизводить результаты анализа. Для того, чтобы один экземпляр оборудования мог выполнять различные операции тестирования, необходимо стандартизировать методы его сопряжения со сменным расходным элементом. Вот почему появилось небольшое, но растущее число стандартов на микрофлюидику.

**SEMI MS6-0308** – стандарт на конструкции и материалы устройств сопряжения микрофлюидных систем. Содержит руководство по проектированию устройства сопряжения флюидной системы и выбору материалов, позволяющее сократить избыточные операции и улучшить конструкцию, технологичность и функционирование устройства. В разделе проектирования приведен список параметров, которые разработчик должен первоначально учитывать, в разделе материалов – матрица совместимости рассматриваемого материала для построения устройства с обычно используемыми материалами и жидкостями. Поскольку необходим глубокий анализ материалов и жидкостей, в разделе приведены ссылки на различные классы обычно используемых твердотельных, жидких и газообразных материалов. Третий раздел содержит описание образцов струйных микро-размерных средств сопряжения. В следующих выпусках стандарта будет приведено больше примеров оптимизации процесса управления потоком микрофлюидика с учетом тенденции

Параметры оценки герметичности малых объемов корпусов МЭМС

Рабочий объем, см <sup>2</sup>	Измеряемая скорость утечки He, атм·см <sup>2</sup> /с	Время утечки до уровня 5000 ррт в объеме Н <sub>2</sub> О, лет	Время утечки до уровня 0,95 атм, лет
1,0	5,6E-09	2,0	17,0
0,5	4,0E-09	1,4	11,9
0,3	2,5E-09	0,88	7,6
0,2	1,8E-09	0,61	5,3
0,05	1,3E-09	0,42	3,7
0,02	8,0E-20	0,28	2,4
0,01	5,6E-10	0,2	1,7

к расширению применения сквозных отверстий через кремний (TSV).

**SEMI MS7-0708** – промышленный стандарт на микрофлюидные средства сопряжения с корпусами электронных приборов. Рассмотрены особенности соединения и требования к сопряжению электрофлюидных интегральных схем (Electro-Fluidic Integrated Circuits, EFICs) и микро-размерных плат их соединения. Назначение стандарта – расширение возможностей технологии перспективных электронных приборов, сочетающих электронные и жидкостные устройства. Содержит четыре секции, касающиеся устранения несовместимых трудностей:

- проектирования струйного ввода-вывода устройств EFIC;
- проектирования монтируемого в корпус струйного адаптера (переход от микро-к макроустройствам);
- карты маршрутизации струйного потока;
- струйных миниадаптеров.

Принят в 2008 году, переработанный вариант рассмотрен в январе 2013 года.

**SEMI MS9-0611** – стандарт на высокоплотные долговременные соединения микрофлюидных устройств с относительно узкой нишей применения. Но даже и в этом случае стандарт позволяет существенно улучшить и модифицировать приборы и воплотить высокие критерии оценки качества. Спецификации стандарта выдвигают два требования, одно

из которых – более гибкое и содержит меньше норм. Второе предусматривает выбор изготовителем размера устройства сопряжения из небольшого списка возможных вариантов. Изготовители, готовые выполнить первое требование стандарта, должны приводить сведения о размерах и материалах своих изделий, которые должны в целом соответствовать спецификациям устройства сопряжения. Спецификации касаются размера порта (внутренний диаметр), расстояния между портами, местоположения, числа портов в ряду или в матрице, физических особенностей совмещения и состава материала смачиваемого канала. Это минимальный набор требований к спецификациям, которые

изготовителю надо включить в технический паспорт продукта. Изготовители, готовые выполнить второе требование, выбирают спецификации из специального набора значений шага и размеров портов. Типичное устройство сопряжения может иметь восемь параллельных трубок с расстоянием между их центрами 0,5 мм и внутренним диаметром 0,250 мм. Стандарт опубликован в июне 2011 года.

Чтобы поставщики, заказчики и другие представители отрасли понимали друг друга и могли свободно общаться, необходимо определить термины, используемые в МЭМС-технологии. Хотя МЭМС-технология во многом сродни полупроводниковой, существует и множество различий. Термины, используемые для описания МЭМС, часто существенно отличаются от терминов полупроводниковой электроники. Вот почему SEMI выпущен стандарт на МЭМС-терминологию - **SEMI MS-9397**. Стандарт определяет термины, используемые в опубликованных документах SEMI, касающихся проблем МЭМС. Утвержден комитетом MEMS/NEMS в июле 2010 года.

Согласно данным комитета по МЭМС/НЭМС, наиболее успешны стандарты MS1 и MS4.

Нуждаются в стандартизации также вопросы корпусирования и надежности, которые SEMI планирует рассмотреть в дальнейшем.

Стандарты SEMI предназначены для производителей МЭМС-устройств, а на другом конце цепи поставок находится потребитель. Какие стандарты нужны ему?

## ПОМОЩЬ ПОТРЕБИТЕЛЮ

Основная проблема потребителя - сравнение характеристик МЭМС различных производителей. Трудности связаны с тем, что:

- в технических паспортах различных компаний на одно и то же изделие приводятся разные параметры;
- одинаковые параметры могут быть получены в результате различных методов измерения;
- основная терминология может быть несогласована.

В результате сейчас, когда на рынке присутствуют многочисленные изготовители однотипных МЭМС, например акселерометров для разнообразных приложений, сравнение технических паспортов оказывается безуспешным.

Поэтому группа компаний в составе Intel, Qualcomm, InvenSense, STMicroelectronics, Freescale и Bosch совместно с Ассоциацией производителей МЭМС (MEMS Industry Group, MIG) и Национальным институтом стандартов и технологии США (NIST) подготовили запрос на стандартизацию критичных разделов технических паспортов. Привлекает внимание тот факт, что запрос - это не просто просьба потребителей о помощи. Он появился в результате усилий различных организаций, в том числе и NIST, по созданию тестовых программ оценки критических свойств материалов, используемых в МЭМС.

По мере выпуска МЭМС в трехмерных многокристалльных корпусах с расширенными функциональными возможностями применение их будет расти. При этом возрастают требования к их надежности. И здесь очень важны методы тестирования. На долю операций тестирования в зависимости от степени завершенности и сложности прибора приходится 20-50% его стоимости. При конструировании новых приборов, а иногда и после его завершения, требуются новые виды испытаний, разработка которых может занять несколько месяцев, да и их проведение требует времени. Следовательно, задерживается выход изделия на рынок. Таким образом, отсутствие стандартов на испытания МЭМС приводит к необходимости дополнительного тестирования прибора пользователем, что увеличивает стоимость системы на его основе и временные издержки ее выпуска. Правда, до стандартизации процессов тестирования необходимо определить параметры, которые пользователи считают нужным проверять и включать их в технические паспорта. В 2011 году NIST и MIG заключили соглашение на проведение серии семинаров, исследований и интервью с целью выработки мер по улучшению стандартов на тестирование МЭМС. Были определены следующие проблемы, требующие решения:

- негативное влияние отсутствия стандартов по методике испытаний на все операции создания добавленной стоимости МЭМС;
- большие прямые издержки промышленности на тестирование;
- рост проблем тестирования вследствие постоянного изменения структуры рынков МЭМС;
- нежелание использовать предконкурентные, естественные по своему характеру,

периоды пересечения интересов потребителя и изготовителя для развития взаимовыгодного сотрудничества. А именно такое сотрудничество позволяет заранее выявить необходимые процессы испытаний и сосредоточить внимание на сложных блоках, присущих каждой схеме и, возможно, запатентованных отдельными компаниями;

- отсутствие стандартов на дорогостоящее тестовое оборудование.

В ходе проведения совместной программы NIST и MIG было получено, что тестировать МЭМС на уровне пластины значительно труднее, чем КМОП-схемы. Стоимость и технические трудности испытаний МЭМС задают 20% технологических процессов, отличных от полупроводниковой технологии. Поэтому начинать работы по стандартизации целесообразно на уровне прибора.

На основе полученных данных были выработаны рекомендации, которым производителям МЭМС и соответствующим правительственным организациям желательно следовать. Предлагалось:

- организовать университетский центр высококачественного тестирования МЭМС, который бы развивал перспективные исследования в области испытаний и связывал представителей промышленности и аспирантов университетов;
- привлекать к разработке стандартов потребителей и организации, имеющие отношение к стандарту.

Отмечалось, что проектирование с учетом требований к испытаниям – важная, но амбициозная задача.

Эти рекомендации рассматриваются как основа для дальнейшего сотрудничества потребителя и изготовителя.

Ожидается, что стандартизация тестирования МЭМС будет проводиться постепенно, но конечный пользователь одобрит и небольшие подвижки, которые способствуют развитию промышленности. Сейчас MIG совместно с партнерами разрабатывает стандарты на технические паспорта инерциальных МЭМС-датчиков. Проект стандартизации методов тестирования начинает и iNEMI. При этом утверждается, что этот проект будет касаться вопросов, не рассматриваемых другими программами, и не будет их дублировать.

Значительно меньше внимания сейчас уделяется вопросам связи сенсоров

с хост-компьютером (или с другим компьютером сенсорной сети).

## УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА СВЯЗИ

Сегодня сенсоры, как правило, общаются с базовым компьютером через I<sup>2</sup>C- и/или SPI-интерфейсы. Но при этом возникает ряд проблем, связанных с ростом числа выводов сенсоров, необходимостью увеличения пропускной способности системы связи и снижением ее энергопотребления. К тому же, стандартизация протоколов I<sup>2</sup>C- и SPI-интерфейсов ограничена. Поэтому разработчики сенсорных сетей стремятся получить новый протокол, поддерживающий более широкую полосу пропускания. Эту задачу решает отраслевой альянс разработчиков процессорных интерфейсов беспроводных устройств (Mobile Industry Processor Interface, MIPI), ряд стандартов которого считаются пригодными для сенсорных сетей, в которых широко применяются МЭМС.

Отношение к МЭМС имеет и комплект IEEE 1451. В него входят стандарты на открытые типовые не зависящие от сети связанные интерфейсы, подключающие передающие устройства (датчики или преобразователи) к микропроцессору, измерительной системе или управляющей промышленной сети. Один из ключевых стандартов определяет требования к техническим паспортам каждого электронного передающего устройства. Принимает участие в создании стандартов для МЭМС и промышленный консорциум Khronos Group, в задачи которого входит разработка открытых стандартов интерфейсов программирования (API), в том числе и для МЭМС-систем.

### ЧТО ЕЩЕ СТАНДАРТИЗИРОВАТЬ?

Особое раздражение производителей МЭМС вызывают разговоры о стандартизации процессов их изготовления. МЭМС – сложные, хитроумные структуры, и ни один разработчик не хочет стандартизировать свой базовый технологический процесс. Пока никто не требует стандартизации процессов производства МЭМС, но предполагается (пока только предполагается), что некоторые этапы можно стандартизировать, поскольку существуют элементы МЭМС, которые разные изготовители могут выполнять схожими процессами. Этот вопрос ненавязчиво обсуждается, но пока все сводится к разговорам.

Рассматриваются вопросы стандартизации неэлектрических параметров. Так, изготовители комплексной аппаратуры в первую очередь запрашивают стандарты на корпуса и выводы приборов с тем, чтобы обеспечить малые габариты и совместимость приборов различных поставщиков. Но пока все инициативы находятся на ранней стадии и требуют дальнейшей разработки по мере роста объема серийного производства МЭМС.

### МЕЖДУНАРОДНЫЕ СТАНДАРТЫ

В проектировании и создании МЭМС, обеспечении их совместимости и высокого качества, а также массового производства важную роль играют международные стандарты. Большое число таких стандартов подготовлено и опубликовано рабочей группой четыре (WG4) при техническом комитете 47 (TC 47) МЭК. В подготовке проектов международных стандартов на МЭМС, публикуемых МЭК, участвуют

Япония (Центр микрообработки) и Южная Корея. Принятые и рассматриваемые МЭК стандарты касаются методов определения свойств и характеристик материалов, используемых для создания МЭМС (стандарты серии IEC 62047), а также стандарты на проектирование, изготовление и испытание МЭМС для предприятий, исследовательских институтов и организаций, проводящих испытания (серия PNW 47F).

В заключение можно сказать, что существуют несколько стандартов на методы испытаний низкого уровня; на микрофлюидику; на интеллектуальные сенсоры; действует соглашение на создание стандарта на технический паспорт; ведутся работы по стандартизации испытаний и надежности; рассматривается стандарт на средства связи сенсоров.

Очевидно, разработка стандартов терпит изменения с "разделением" усилий. Маловероятно, что появятся стандарты на высокопроизводительные, "функционально богатые" приборы, тогда как принятие стандартов на устройства с менее высокими характеристиками, предназначенные для рынка потребительских систем, весьма вероятно. Для поддержания этой тенденции крупные производители комплексного оборудования постараются сохранить некоторую степень дифференциации при незначительном увеличении продолжительности срока выпуска изделий высшего класса. По-видимому, в конце концов, будут приняты решения по стандартизации разнообразных МЭМС, аналогично тому, как ковбои и фермеры смогли найти некоторое подобие мирного сотрудничества в мюзикле "Оклахома". Во всяком случае, на это можно надеяться.

### ИСТОЧНИКИ

- **Lightman K.** Finding common ground for MEMS standards. – [www.electronicproducts.com/Sensors\\_and\\_Transducers/Sensors\\_and\\_Transducers/Finding\\_common\\_ground\\_for\\_MEMS\\_standards.aspx](http://www.electronicproducts.com/Sensors_and_Transducers/Sensors_and_Transducers/Finding_common_ground_for_MEMS_standards.aspx)
- **Moyer B.** In Search of MEMS Standards. – [www.eejournal.com/archives/articles/20130128-standards](http://www.eejournal.com/archives/articles/20130128-standards)
- MEMS Standards Committee Information | SEMI – [www.semi.org/en/Standards/CTR\\_032130](http://www.semi.org/en/Standards/CTR_032130)
- [www.memindustrygroup.org/files/resource\\_library\\_files/MIG-NIST-MEMS\\_Test\\_Full\\_Report.pdf](http://www.memindustrygroup.org/files/resource_library_files/MIG-NIST-MEMS_Test_Full_Report.pdf)