

метрии можно измерять толщину от нескольких долей нанометров до десятков микрометров, в том числе и многослойных пленок. Эллипсометрия позволяет измерять образцы толщины тонких пленок с точностью до сотых долей нанометров, что очень важно для микроэлектронной промышленности.

Материалы, которые можно исследовать с помощью спектральной эллипсометрии, включают полупроводники, диэлектрики, полимеры, органические материалы и металлы. Эллипсометрия также может использоваться для изучения границ раздела между твердым веществом и жидкостью и между двумя жидкостями.

Среди материалов, измеряемых методом эллипсометрии и используемых в выше названных применениях, можно назвать, к примеру, c-Si, a-Si, p-Si, mc-Si, CdTe, CIGS, CdS, SiN, SiO<sub>2</sub>, SiC, GaAs, AlGaAs, AlN, InGaN, SnO<sub>2</sub>, PET, ZnO, PbS, PbSe, TiO<sub>2</sub>, Al, Ag, Au и углеродные нанотрубки.

На предприятиях Минпрома имеются спектральные эллипсометры, которые метрологически не обеспечены в Республике Беларусь. Также есть потребность предприятий в измерениях тонких пленок. Диапазон толщин пленок, в измерении которых нуждаются отечественные предприятия, составляет от 1 нм до 10 мкм, что несомненно является областью нанометрового диапазона измерений. Эллипсометры имеются на таких предприятиях как: ОАО «ИНТЕГРАЛ», ОАО «КБТЭМ-ОМО», ОАО «ПЕЛЕНГ». Меры толщины тонких пленок имеют и проводят метрологический контроль в России ОАО "Нафтан" и ОАО "Мозырский НПЗ".

В целях метрологического обеспечения измерений основной задачей является разработка программы и методики калибровки. Это необходимо для обеспечения достоверности результатов измерений, осуществления прослеживаемости к международным единицам Si.

Цель проведения метрологической аттестации является установление соответствия метрологических характеристик установленным тре-

бованиям технического задания. Основными задачами метрологической аттестации являются:

- рассмотрение и проведение экспертизы технической документации;
- установление метрологических характеристик в процессе аттестации;
- установление требований к условиям проведения исследований;
- установление точек, в которых определяют значения метрологических характеристик и количества наблюдений;
- установление исходных данных и условий определения погрешности эллипсометра;
- обработка данных наблюдений;
- установление межкалибровочного интервала;
- оформление результатов аттестации.

Методика калибровки включает в себя следующие операции:

- внешний осмотр;
- процедуру измерений;
- обработку результатов измерений;
- оформление результатов измерений.

При проведении калибровки одним из главных показателей соответствия является оценка неопределенности, которая влияет на достоверность результатов измерений. Для проведения оценки необходимо составить математическую модель измерения и определить все влияющие параметры. Провести анализ входных величин и составить бюджет неопределенности измерений.

На основании вышеизложенного, в рамках задания «Создать и оснастить лабораторию эталонов в нанометровом диапазоне измерений» подпрограммы «Эталон Беларуси» ГНТП «Эталон и научные приборы», приобретен эталонный эллипсометр и атомно-силовой многофункциональный микроскоп, что позволит расширить возможности области применения лаборатории.

Таким образом, сформулирована задача для метрологического обеспечения средств измерений, работающих на принципах спектральной эллипсометрии.

УДК 537.871.3

## МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ СОВМЕСТИМОСТЬ С ПОМОЩЬЮ БЕЗЭХОВЫХ ЭКРАНИРОВАННЫХ КАМЕР

Евсюк Е.А.<sup>1</sup>, Волюнец А.С.<sup>2</sup>, Гуревич В.Л.<sup>2</sup>, Серенков П.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный институт метрологии  
Минск, Республика Беларусь

В повседневной жизни мы все больше и больше используем разнообразную носимую электронику, бытовую технику, применяем раз-

личные средства связи, появляются новые разработки в области медицины, военном деле. Но мало кто из нас задумывается что при работе,

такие устройства создают различные электромагнитные помехи, которые влияют на работу других технических средств поэтому для их одновременного и бесперебойного использования разработчикам уже на стадии проектирования средств необходимо учесть множество факторов.

Обеспечение нормальной работы совместно работающих технических средств и является целью электромагнитной совместимости (далее – ЭМС). Одним из испытаний на ЭМС является измерение напряженности поля радиопомех от испытуемого технического средства. При проведении таких измерений необходимы условия окружающей обстановки, обеспечивающие правильность и повторяемость результатов измерений.



Рисунок 1 – Структура ЭМС



Рисунок 2 – Внешний вид БЭК

Для обеспечения этих условий и созданы безэховые экранированные камеры (далее – БЭК) – экранированные помещения, внутренние поверхности которых полностью покрыты высокочастотным материалом (ВЧ-поглотителем), поглощающим электромагнитную энергию в рабочей полосе частот.

В настоящее время, на территории Республики Беларусь, функционируют около десяти открытых измерительных площадок, в том числе БЭК.

До сегодняшнего времени БЭК, а также альтернативные измерительные площадки проходили лишь аттестацию, но время не стоит на месте, и в соответствии с новой редакцией стандарта ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 все испытательное оборудование подлежит калибровке. Это и обозначило проблему отсутствия методики калибровки БЭК.

**Цели и задачи исследования:** необходимо решить задачу метрологического обеспечения испытаний на ЭМС с применением БЭК. Для достижения заданной цели необходимо: провести обзор существующих испытательных площадок, а в частности БЭК, изучить их принцип работы, обозначить их преимущества и недостатки; проанализировать существующие методы аттестации и калибровки измерительных площадок. Основываясь на полученной информации, с учетом всех преимуществ и недостатков, выбрать наиболее подходящий метод калибровки БЭК. На основании технических характеристик, выбрать наиболее подходящее измерительное оборудование необходимое для проведения калибровки. Оценить источники неопределенности измерений при выполнении калибровки БЭК.

**Обзор принципов валидации испытательной площадки в диапазоне частот 30 МГц – 1 ГГц.** В соответствии с ГОСТ CISPR 16-1-4-2013 установлены два метода валидации БЭК:

- метод нормализованного затухания испытательной площадки с широкополосными антеннами;
- метод опорной испытательной площадки с широкополосными антеннами.

Валидацию испытательной площадки проводят с применением двух одинаково поляризованных антенн. Валидацию проводят отдельно для горизонтальной и вертикальной поляризации. Затухание испытательной площадки получают из разницы:

- напряжения источника, подключенного к передающей антенне;
- полученного максимального напряжения, измеренного на зажимах приемной антенны во время сканирования высоты заданной антенны.

Измеренное затухание сравнивают с характеристиками, полученными на идеальной открытой испытательной площадке, что является определением измеряемой величины при валидации испытательных площадок. Результатом такого сравнения является отклонение затухания площадки, выражаемое в дБ. Площадка считается пригодной, когда значение отклонения затухания находится в пределах  $\pm 4$  дБ. Первое показание  $V_{direct}$  снимают при отсоединении двух коаксиальных кабелей от двух антенн и подключении их один к другому через адаптер. Второе показание  $V_{site}$  снимают, когда коаксиальные кабели снова подсоединяются

к своим антеннам, и измеряют максимальный сигнал при сканировании приемной антенны по высоте (1–4 м для измерительных расстояний 3 м и 10 м и, либо 1–4 м, либо 2–6 м для разнесения 30 м). При обоих этих измерениях напряжение источника сигнала  $V_i$  поддерживается постоянным. Полученные результаты вместе с нормализованным затуханием площадки ( $A_N$ ) используются в приведенном ниже уравнении для получения результатов отклонения затухания. Все члены уравнения имеют размерность в децибелах.

$$\Delta A_S = V_{direct} - V_{site} - F_{aT} - F_{aR} - A_N - \Delta A_{TOT}$$

где:  $\Delta A_S$  – отклонение затухания площадки;  $F_{aT}$  – коэффициент калибровки передающей антенны;  $F_{aR}$  – коэффициент калибровки приемной антенны;  $A_N$  – нормализованное затухание площадки в соответствии с ГОСТ CISPR 16-1-4-2013;  $\Delta A_{TOT}$  – коэффициент коррекции взаимного импеданса.

$F_{aT}$  и  $F_{aR}$  являются коэффициентами калибровки антенны в свободном пространстве. Первые два члена уравнения характеризуют реальное измерение затухания площадки, то есть разность  $V_{direct} - V_{site}$  представляет собой классический вид затухания площадки, которое определяется вносимыми потерями на трассе распространения с учетом двух используемых антенн. Теоретические значения поправочного коэффициента взаимного импеданса  $\Delta A_{TOT}$  для геометрических параметров при использовании резонансных настраиваемых диполей, разнесенных на 3 м, горизонтальной и вертикальной поляризации приведены в вышеупомянутом стандарте. Для других геометрических параметров, например 10 или 30 м

или, если используют широкополосные антенны, поправки взаимного импеданса не требуются.

**Испытательные площадки для измерения напряженности поля радиопомех в полосе частот от 1 до 18 ГГц.** Конструкция испытательных площадок, используемых для проведения измерений в этой полосе частот, должна минимизировать влияние отражений излучаемых полей радиопомех на сигнал, принимаемый измерительной антенной. Такая минимизация влияния отражений возможна, например, в безэховой камере. Если конструкция площадки не обеспечивает полностью безэховых условий (например полубезэховая камера) используют поглощающий материал для частичного покрытия металлической пластины заземления. Валидацию испытательной площадки проводят путем измерения коэффициента стоячей волны по напряжению данной площадки  $S_{VSWR}$ . При этом рабочий объем площадки оценивают при конкретной комбинации на площадке приемной антенны, поглощающего материала, установленного на пластине заземления, и соблюдении измерительного расстояния.

#### Литература

- ГОСТ CISPR 16-1-4-2013 «Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Часть 1-4. Аппаратура для измерения радиопомех и помехоустойчивости. Антенны и испытательные площадки для измерения излучаемых помех».
- ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий».

УДК 658.562.3

### ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ РАЗРАБОТКИ ГОСУДАРСТВЕННОГО СТАНДАРТА, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩЕГО ПОВЕРКУ КАЛИБРАТОРОВ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ

Красильников Е.В.<sup>1</sup>, Гуревич В.Л.<sup>2</sup>, Бардонов А.И.<sup>2</sup>, Серенков П.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный институт метрологии  
Минск, Республика Беларусь

В современных промышленных условиях для обеспечения высокой производительности и максимального качества выпускаемой продукции необходимо внедрение новейшего оборудования, или модернизация существующего. Это влечёт за собой увеличение количества контрольно-измерительных средств измерений участвующего в управлении технологическими процессами.

Известно, что для контроля точности и воспроизводимости измерений, ответственных за качество выпускаемой продукции, необходимы существенные трудозатраты.

Одним из универсальных способов решения данной проблемы является применение многофункциональных средств измерений, к которым относятся калибраторы многофункциональные.

В докладе приведены основные характеристики данных приборов, ключевыми из которых являются компактность, точность, мобильность. Использование калибраторов многофункциональных на современном производстве даёт возможность поверки и калибровки в полевых и лабораторных условиях различных средств измерений. Калибраторы мно-