УДК 621.3.088

Савин А.А.[1], Губа В.Г.[2]
[1]Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
[2]Научно-производственная компания НПК ТАИР

Методика определения точности системы измерения S-параметров приборов СВЧ микроэлектроники на пластине

В работе на основе 8-элементной модели измерительной системы «векторный анализатор цепей – зондовая станция» рассмотрена методика проверки основных метрологических характеристик при тестировании пассивных и активных СВЧ приборов на пластине. Обозначены этапы, необходимые для исследования параметров системы, которые влияют на погрешность измерения.

Ключевые слова: Векторный анализатор цепей, зондовая станция, S-параметры, векторная калибровка, систематическая погрешность.

Для измерения параметров рассеяние приборов СВЧ микроэлектроники на пластине используют зондовые установки. Подключение векторного анализатора цепей (ВАЦ) к прибору осуществляют с помощью СВЧ зондов, являющихся частью зондовой станции. На рис. 1 показана упрощенная блок-схема зондовой установки. Некоторый СВЧ прибор на пластине или исследуемое устройство (ИУ) подключается к зондам через отрезки линий передачи с некоторым характеристическим сопротивлением. Отметим, что существует большое количество различных типов ИУ, линий передачи и зондов. Выбор линии и зонда зависит от СВЧ устройства, которое необходимо тестировать. Рассмотрим порядок проведения измерений параметров ИУ и методику исследования точности данной измерительной системы, которую можно применять практически для любых типов ИУ на пластине, линий передачи и зондов. В работе будем анализировать систему с двумя измерительными портами.

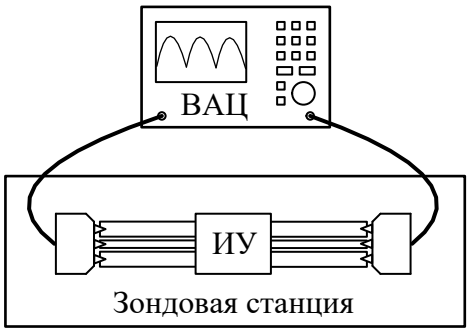

Рис. 1. Упрощенная блок-схема зондовой установки для измерения S-параметров.

Достижение высокой точности измерений возможно только после выполнения калибровки ВАЦ. Фактически, суть работы ВАЦ заключается в сравнении измерений параметров ИУ и измерений параметров некоторых других опорных устройств (калибровочных мер), поэтому калибровка предполагает тестирование устройств с известными или частично известными параметрами. Существует большое количество типов векторных калибровок [1]. При работе на пластине, как правило, калибровки на

элементы с сосредоточенными параметрами используются реже, чем калибровки с использованием линий передачи. В отличии, например, от измерений в коаксиальном волноводе, тестирование калибровочных мер на пластине имеет ряд особенностей. Во-первых, существуют проблемы априорного получения точного и достоверного описания параметров используемых мер. Во-вторых, стабильность подключения зондов к цепям на пластине значительно ниже и зависит от конструкции чувствительного элемента зонда. И, наконец, точка подключения зонда может меняться от подключения к подключению. По указанным причинам, основной и наиболее точной калибровкой, которая используется при работе на пластине, принято считать калибровку multiline TRL [2]. Она предполагает тестирование нескольких линий передачи между портами ВАЦ и нагрузки высокого отражения (обычно короткое замыкание) для каждого порта. Калибровки семейства TRL (Thru-Reflect-Line) используют 8-элементную модель измерительной системы, что позволяет не только определить составляющие систематической погрешности измерений, но и оценить параметры линий передачи и нагрузки. Классическая TRL калибровка использует две линии на каждой частоте (перемычка Thru может иметь нулевую длину и линия Line с длиной, обеспечивающей фазовый сдвиг, близкий к $\pi/2$ в одном направлении передачи). Для реализации математического аппарата TRL требуется информация о длинах линий. Избыточное число линий в multiline TRL на каждой частоте используется для усреднения нестабильности соединений. В результате калибровки определяется постоянная распространения линий и характеристическое сопротивление [3]. При необходимости можно выполнить преобразование импеданса системы в 50 Ом. Для анализа других важных особенностей процесса измерений рассмотрим обобщенную структурную схему и 8-элементную модель, показанные на рис. 2.

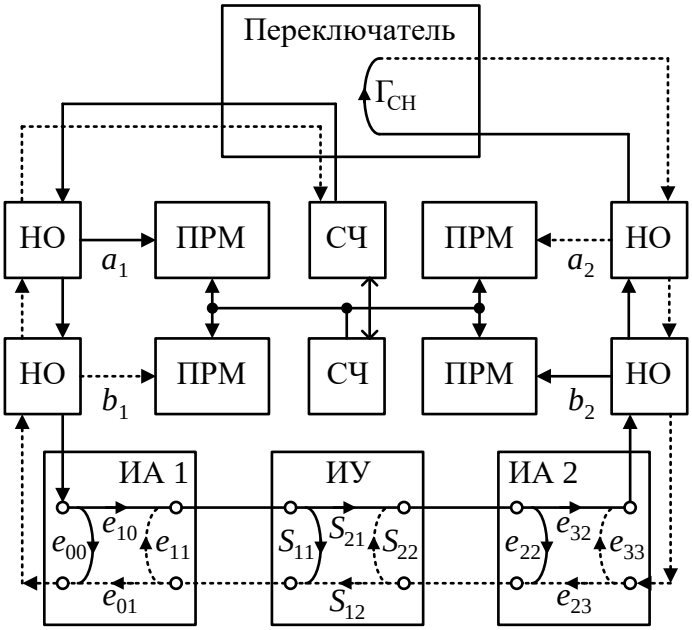

Рис. 2. Обобщенная структурная схема измерительной системы.

Как уже было отмечено, при калибровке в качестве ИУ используются специальные меры. На рис. 2 обозначено: НО – направленный ответвитель; ПРМ – приемник; СЧ – синтезатор частот; ИА – искажающий адаптер (для первого и второго портов ВАЦ). Параметры ИА обозначены через $e_{\bullet}$. Переключатель изменяет направление зондирования сигнала основного СЧ. На рис. 2 показано положение переключателя для прямого зондирования (со стороны первого порта во второй). Сигнал СЧ подается в первый порт ВАЦ. Второй порт ВАЦ со стороны СЧ нагружается на согласованную нагрузку (СН) переключателя, имеющую коэффициент отражения $\Gamma_{СН}$. Сплошными линиями показаны

сигналы, распространяющиеся в прямом направлении. Пунктирными линиями показаны сигналы, распространяющиеся в обратном направлении при прямом зондировании. Приемники, работающие на промежуточной частоте (ПЧ, определяется отстройкой второго СЧ), фиксируют амплитуды сигналов a_1, b_1, a_2 и b_2. Измеренное значение коэффициента отражения (КО) равно $S_{11}=b_1/a_1$. Измеренное значение коэффициента передачи (КП) равно $S_{21}=b_2/a_1$. Для обратного зондирования аналогично, только в индексах необходимо заменить 1 на 2 и 2 на 1.

Модель, показанная на рис. 2, получена из более общей модели из 12 элементов. В расширенную модель включены два паразитных проникновения зондирующего сигнала ВАЦ из одного порта в другой в обход ИУ (так называемая изоляция). Для измерения изоляции необходимо подключить СВЧ зонды к согласованным нагрузкам на пластине и определить КП в обоих направлениях при узкой полосе фильтра ПЧ. Качество согласования нагрузок практически не влияет на точность измерения уровня паразитных проникновений сигналов ВАЦ из одного порта в другой. Отметим, что при слишком высоком уровне паразитных проникновений (например, более минус 80 дБ), они могут быть частично исключены математически. Еще два элемента, дополняющие 8-элементную модель до 12-элементной, являются два КО нагрузки переключателя Γ_{CH} в прямом направлении $\Gamma_{CH1}=a_2/b_2$ (как на рис. 2) и в обратном направлении $\Gamma_{CH2}= a_1/b_1$. Отметим, что для формирования S_{11} используются комплексные амплитуды a_1 и b_1 при зондировании в прямом направлении, а при формировании Γ_{CH2} используется оценки тех же приемников, но направление зондирования является обратным. Для работы в рамках 8-элементой модели ВАЦ важно, чтобы значения Γ_{CH1} и Γ_{CH2} оставались неизменными, так как они используются для специальной коррекции всех первичных измерений (switch-коррекция). Исследование стабильности можно проводить следующим способом. Подключить порты друг к другу, используя, например, линию Thru на пластине, и многократно измерить значения Γ_{CH1} и Γ_{CH2}, изменяя направление зондирования и накапливая статистику. Дисперсия полученных измерений определяет остаточное влияние СН переключателя на результаты измерений.

Кроме изоляции и стабильности СН переключателя, к погрешности измерений приводит наличие ИА и свойство повторяемости подключения. Очевидно, что после калибровки ВАЦ необходимо исследовать остаточные (действующие после калибровки) или эффективные ИА. Определение свойств эффективных ИА ВАЦ и повторяемости подключения можно проводить с помощью метода сравнения калибровок. Основы метода сравнения калибровок изложены в работе [4].

Как уже было сказано, наиболее точной калибровкой для зондовых измерений принято считать калибровку multiline TRL, которую логично использовать в качестве эталонной. Геометрические размеры поперечного сечения волновода на пластине и размеры зондовой головки определяются оснасткой, к которой подключено ИУ. Поэтому важной задачей построения эталонного набора для конкретного волновода на пластине является выбор длин линий. В работе [5] приведены соображения по выбору длин линий для стандартной TRL калибровки. Для эффективной работы ВАЦ, как компаратора, необходимо, чтобы параметры калибровочных мер равномерно распределялись на диаграмме Вольперта-Смита. При выполнении калибровки multiline TRL полагают, что линии имеют нулевые КО и считаются мерами характеристического сопротивления. Нагрузки короткого замыкания, напротив, обеспечивают высокий уровень отраженных сигналов. Точность калибровки на проход из порта в порт гарантируется фазовыми соотношениями КП разных линий. Работа в широкой полосе частот и желание использовать нескольких линий в каждом диапазоне заставляет увеличивать количество линий. Например, калибровочная GaAs пластина RM8130 [6] содержит 5 копланарных волноводов длиной 0,55 мм (Thru); 2,685 мм; 3,75 мм; 7,115 мм; 20,245 мм; 40,55 мм (диапазон частот до 110 ГГц). Минимизация общего количества линий при сохранении работоспособности в

широкой полосе частот является сложной оптимизационной задачей, которую необходимо решать для конкретного материала и волновода. Один из путей решения – перебор с нахождением линий, которые чаще всего в процентном соотношении можно использовать с линией минимальной длины (Thru) и линией максимальной длины. Максимальная длина может быть ограничена технологией изготовления или деградацией параметров при увеличении длины.

Модернизированный метод сравнения калибровок рассмотрен в работе [7] и методике [8]. Основная специфика применения методики [8] на пластине состоит в том, что в качестве эталонной калибровки используется калибровка multiline TRL. Для реализации методики [8] необходимо знать точность эталонной калибровки. Для этого можно использовать методы математического моделирования, например, метод Монте-Карло. В работе [9] на основе информации о неопределенности геометрических размеров копланарного волновода получены характеристики точности электрических параметров. В работе [10] на основе специальной численной процедуры (unscented transformation) рассмотрено решение, которое более эффективно с вычислительной точки зрения для задачи с большой размерностью.

Однако для оценки качества калибровки (верификации) ВАЦ можно использовать и другие методы. Одним из интересных методов является метод с разделением эффективных параметров во временной области. Для реализации метода применяют линию передачи достаточно большой длины на проход и линию с коротким замыканием на отражение. Соображения по выбору длины верификационной линии в коаксиальном волноводе и на пластине с известной эффективной диэлектрической проницаемостью приведены в работе [11]. Верификационный стандарт на отражения не обязательно должен содержать короткое замыкание. Можно использовать открытый порт линии (то есть холостой ход). В результате достаточно всего одной линии, которая тестируется на проход между портами ВАЦ и с открытым портом для каждого порта ВАЦ. Адаптивный к неизвестным параметрам открытого порта линии алгоритм оценки эффективных параметров ВАЦ рассмотрен в [12]. Данный алгоритм формирует комплексные оценки параметров эффективных ИА, то есть, фактически, является алгоритмом калибровки, а значит, реализует метод сравнения калибровок. В этом случае, моделирование с целью расчета точности эталонной калибровки можно выполнить гораздо точнее, так как необходимо анализировать всего одну линию. Кроме этого, адаптивный алгоритм с разделением эффективных параметров во временной области можно использовать для исследования калибровки multiline TRL. Важно отметить, что для реализации калибровки типа TRL или адаптивного алгоритма верификации с разделением эффективных параметров во временной области, необходимо использовать ВАЦ, который имеет 4 приемника (опорный в каждом канале) и позволяет измерить Γ_{CH}.

Известные методы векторной калибровки и коррекции предполагают, что дрейф параметров ВАЦ отсутствует, либо пренебрежимо мал. Это справедливо для всех современных ВАЦ. Поэтому для усреднения достаточно нескольких (порядка 10) измерений изоляции, стабильности переключателя и повторяемости соединителей, чтобы достоверно оценить вклад данных составляющих в остаточную систематическую погрешность измерений. Оценку параметров эффективных ИА портов ВАЦ вполне достаточно провести однократно.

В завершении отметим, что вопросы метрологии исключения параметров оснастки (так называемый, деэмбеддинг), в которую включено ИУ, также крайне существенны. Они имеют множество частных особенностей, зависящих от схемы подключения ИУ, способа определения параметров оснастки и пр. Некоторые важные проблемы рассмотрены в работе [13]. Итоговый бюджет погрешности определяется характеристиками ВАЦ в плоскости калибровки и точностью исключения оснастки. При этом часто для калибровки ВАЦ используются специальные пластины, отличные от тех, на которых изготавливают ИУ. Между тем, метод сравнения калибровок с использованием одной длинной линии можно

реализовать непосредственно на пластине с ИУ. Для этого необходимо изготовить на пластине одну единственную линию достаточной длины с параметрами, аналогичными параметрам линии, которая соединяет СВЧ зонды и ИУ. В этом случае оценки эффективных параметров ВАЦ будут частично учитывать свойства оснастки.

Итак, рассмотренная методика определения точности системы измерения S-параметров СВЧ приборов на пластине предполагает следующие операции: измерение изоляции, определение стабильности переключателя, определение повторяемости подключения, сравнение калибровок и расчет эффективных параметров ВАЦ с учетом характеристического сопротивления системы. Полученные оценки свойств измерительной системы совместно с рассчитанной погрешностью эталонного набора калибровочных мер и погрешностью способа исключения оснастки должны использоваться для определения итоговой точности измерений.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-3107.2015.8.

Библиографический список

1. Губа В.Г. Классификация и анализ методов калибровки векторных анализаторов цепей / В.Г. Губа, А.А. Ладур, А.А. Савин // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2(24), ч. 1. – С. 149-155.

2. Marks R.B. A multi-line method of network analyzer calibration // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1991. – Vol. 39, issue 7. – P. 1205-1215.

3. Marks R.B. A general waveguide circuit theory / R.B. Marks, D.F. Williams // Journal of research of the National Institute of Standards and Technology. – 1992. – Vol. 97, Number 5. – P. 533-562.

4. Williams D.F. Comparison of on-wafer calibration / D.F. Williams, R.B. Marks, A. Davidson // Proceedings of the 38th ARFTG Conference. – 1991. – P. 68-81.

5. Hoer C.A. Choosing Line Length for Calibrating Network Analyzers // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1983. – Vol. 31, issue 1. – P. 76-78.

6. Reference Material 8130. Coplanar waveguide calibration set // NIST, Gaithersburg, MD 20899, USA, 1998.

7. Guba V.G. An Automated Method for VNA Accuracy Verification Using the Modified Calibration Comparison Technique / V.G. Guba, A.A. Savin, O.N. Bykova, A. Rumiantsev, B.D. Maxson // Proceedings of the 82nd ARFTG Microwave Measurement Conference. – Columbus, USA, 2013. – P. 164-167.

8. МИ 3411-2013. Рекомендация. Анализаторы цепей векторные. Методика определения метрологических характеристик. – М. – 2013. – 54 с. (Государственная система обеспечения единства измерений).

9. Leinhos J. Monte-Carlo Analysis of Measurement Uncertainties for On-Wafer Thru-Reflect-Line Calibrations / J. Leinhos, U. Arz // // Proceedings of the 71st ARFTG Microwave Measurement Conference. – Atlanta, USA, 2008. – P. 1-4.

10. Savin A.A. Uncertainty Analysis in Coplanar Waveguide with Unscented Transformation / A.A. Savin, V.G. Guba, O.N. Bykova // Proceedings of the 86th ARFTG Microwave Measurement Conference. – Atlanta, USA, 2015. – P. 1-4.

11. Савин А.А. Выбор длины линии для разделения эффективных параметров векторного анализатора цепей во временной области // Доклады ТУСУРа. – 2015. – № 3(37). – С. 46-50.

12. Savin A.A. Adaptive Estimation of Complex Calibration Residual Errors of Wafer-Level S-Parameters Measurement System / A.A. Savin, V.G. Guba, A. Rumiantsev, B.D. Maxon, D. Schubert, U. Arz // Proceedings of the 84th ARFTG Microwave Measurement Conference. – Boulder, USA, 2014. – P. 1-4.

13. Добуш И.М. Программное обеспечение для автоматизации измерений, деэмбеддинга и построения линейных моделей СВЧ полевых транзисторов / И.М. Добуш, А.В. Степачева, А.А. Коколов, А.С. Сальников, Л.И. Бабак // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2(24), ч. 2. – С. 99-105.