

УДК 621.317.7

А.А. Савин

Линейная обработка верификационных измерений векторного анализатора цепей в составе зондовой станции

Предложен алгоритм верификации векторных анализаторов цепей, выполняющих измерения параметров устройств на полупроводниковой пластине. Основой алгоритма являются специальная модель прибора во временной области и интерполяция частотных характеристик рядом Котельникова. Выполнено экспериментальное исследование алгоритма в диапазоне частот до 110 ГГц.

Ключевые слова: векторный анализатор цепей, S-параметры, калибровка, зондовая станция, полупроводниковая пластина, верификация, систематическая погрешность.

Задача верификации векторного анализатора цепей в составе зондовой станции. Измерение S-параметров интегральных микросхем в диапазонах СВЧ и КВЧ на полупроводниковой пластине производится с помощью векторных анализаторов цепей (ВАЦ) в составе зондовой станции. Достижение высокой точности измерений возможно только после выполнения калибровки измерительной установки. Существуют различные методы калибровки ВАЦ [1]. Для калибровки двухпортовых ВАЦ с качественной изоляцией измерительных портов используют специальную 10-параметрическую модель измерительной системы. Независимо от специфики применения ВАЦ (измерения в коаксиальном волноводе либо измерения на полупроводниковой пластине при помощи зондов) модель прибора содержит два искажающих адаптера: для первого и второго портов. Каждый адаптер содержит по три параметра. К указанным шести параметрам добавляются четыре параметра, которые характеризуют влияние приемного порта при прямом и обратном зондировании. От точности определения всех параметров во многом зависит точность измерения S-параметров тестируемого устройства. По разным причинам не существует идеального метода калибровки ВАЦ. В результате влияние искажающих параметров не может быть полностью исключено коррекцией, и возникает систематическая погрешность измерений. Величина систематической погрешности зависит от эффективных (действующих после калибровки или остаточных) параметров ВАЦ.

Эффективные параметры ВАЦ определяются с помощью специальной процедуры, называемой верификацией. Известны несколько методов верификации, которые позволяют определить абсолютные значения эффективных параметров. К ним относится, например, тест на биения. Другой метод – сравнение калибровок, предполагающий наличие некоторого эталонного способа калибровки. Часто для верификации ВАЦ в составе зондовой станции используют именно сравнение калибровок. Однако в этом случае о качестве эталонной калибровки можно судить только по косвенным признакам. Известны методы верификации, разработанные для применения в коаксиальном волноводе, которые основаны на разделении эффективных параметров во временной области и позволяют определить комплексные оценки эффективных параметров. Наличие информации о фазе может позволить существенно повысить точность путем применения вторичной коррекции измерений. Так, например, в работах [2, 3] рассмотрены результаты обработки экспериментальных измерений в коаксиальном волноводе для двух алгоритмов, которые формируют оценки комплексных значений эффективных параметров однопортового ВАЦ. Оба подхода используют в качестве верификационного стандарта линию передачи достаточной длины.

Важной отличительной особенностью работы на полупроводниковой пластине, по сравнению с коаксиальным волноводом, являются малые размеры доступных линий передачи. В результате разрешающая способность во временной области оказывается низкой даже с учетом широкого диапазона рабочих частот. Тем не менее в работе [4] показано, что применение алгоритма, предложенного в [3], возможно и при низкой разрешающей способности во временной области. В качестве экспериментальной базы в работах [3, 4] использованы измерения в коаксиальном волноводе. В работе [5] рассмотрен алгоритм верификации двухпортового ВАЦ и приведены примеры обработки верификационных измерений ВАЦ в коаксиальном волноводе и на полупроводниковой пластине. Дан-

ный алгоритм использует модель представления комплексных частотных характеристик эффективных параметров с помощью интерполяции кубическими сплайнами. Нелинейная модель системы существенно увеличивает нагрузку на вычислитель. В данной работе предлагается упрощенная модель, требующая значительно меньших вычислительных ресурсов. Рассмотрим линейную модель системы и алгоритм обработки верификационных измерений ВАЦ в составе зондовой станции.

Модель калиброванной измерительной системы и методика верификации. Для калибровки ВАЦ в составе зондовой станции применяют специальные калибровочные пластины, содержащие все необходимые меры (измерительные стандарты). Размеры мер малы, а значит, все эффективные параметры (погрешности калибровки), зависящие от неточности задания параметров мер, будут сконцентрированы вблизи плоскости калибровки (плоскость сочленения зондов первого и второго порта). Фактически это означает, что эффективные параметры локализованы во временной области. С учетом последнего замечания рассмотрим специальную модель калиброванного прибора при верификации.

Существуют верификационные пластины, которые содержат несколько прецизионных линий передачи с открытыми или короткозамкнутыми портами. При подключении к ВАЦ линии с некоторой известной длиной l возникает рассредоточение локализованных во временной области эффективных параметров. Введем обозначения эффективных параметров ВАЦ: D – направленность; R – трекинг отражения; S – рассогласование источника; T – трекинг передачи; L – рассогласование нагрузки. На рис. 1 показана модель ВАЦ при тестировании и измерении коэффициента отражения линии с открытым или короткозамкнутым портом. Модель справедлива для любого порта ВАЦ. Первым на вход поступает сигнал, определяемый направленностью порта. На расстоянии $2 \cdot l$ от него располагается сигнал, пропорциональный трекингу отражения. Далее располагается сигнал, зависящий от рассогласования источника порта ВАЦ. Таким образом, все три сигнала локализованы в различных областях по оси расстояния и характеризуют некоторый эффективный параметр. Частотные свойства каждого сигнала заданы ограниченным набором комплексных опорных отсчетов. Очевидно, что параметры второго и третьего сигналов также зависят от свойств линии и холостого хода или короткого замыкания на ее свободном порту. На рис. 2 показана модель ВАЦ при тестировании и измерении коэффициента отражения линии на проход, т.е. при подключении прибора к обоим портам линии. В этом случае имеем две составляющие: направленность передающего порта и рассогласование нагрузки приемного порта.

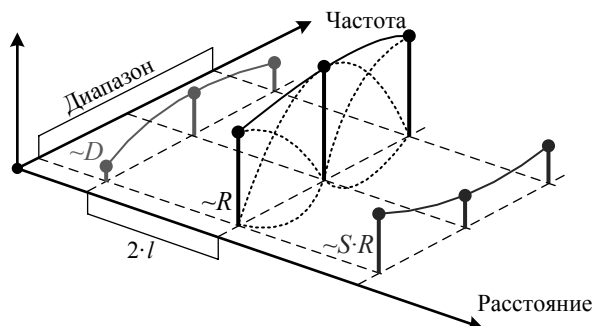


Рис. 1. Модель калиброванной измерительной системы при подключении к одному порту линии с открытым или короткозамкнутым свободным портом

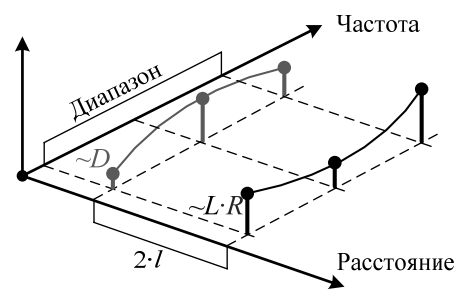


Рис. 2. Модель калиброванной измерительной системы при подключении к двум портам линии передачи и измерении коэффициента отражения

Модель ВАЦ при тестировании и измерении коэффициента передачи линии на проход содержит всего одну компоненту во временной области, характеризующую T . Рассмотренные модели точно согласованы с математической моделью ВАЦ в виде потокового графа, используемого при стандартных процедурах калибровки и коррекции.

Измерения параметров рассеяния верификационных стандартов могут выполняться с малым шагом по частоте. Количество опорных отсчетов в рабочем диапазоне должно быть меньше, чем число измерительных точек. Локализация во временной области определяет относительно медленный характер изменения свойств эффективных параметров калиброванного ВАЦ. Поэтому очень важной частью модели измерительной системы при верификации является способ представления частотных характеристик каждого из парциальных сигналов. В работах [3–5] использована интерполяция кубическими сплайнами, которая обладает малой методической погрешностью представле-

ния произвольной комплексной функции. В данной работе для расчета частотной характеристики парциального сигнала на произвольной частоте по опорным отсчетам использована интерполяция рядом Котельникова (базисные функции показаны пунктирными линиями на рис. 1 для сигнала, пропорционального R).

Рассмотрим методику верификации двухпортового ВАЦ, подключенного к зондовой станции. Для достижения наилучших результатов необходимо выполнить несколько манипуляций с верификационной линией передачи максимальной длины. Во-первых, опустить зонд первого порта ВАЦ на первый порт линии и измерить коэффициент отражения Γ_{O1} (только прямое зондирование) в диапазоне частот работы ВАЦ. Далее, не поднимая первый зонд, опустить зонд второго порта ВАЦ на второй порт линии и измерить полную матрицу рассеяния с элементами S_{11} , S_{21} , S_{12} и S_{22} . Затем, подняв зонд первого порта ВАЦ, измерить Γ_{O2} (только обратное зондирование). И наконец, измерить коэффициент отражения короткозамкнутой линии для первого Γ_{S1} и второго Γ_{S2} портов. Отметим, что индексы «O» и «S» при обозначении коэффициентов отражения Γ получены от Open (холостой ход) и Short (короткое замыкание). Далее в соответствии с рассмотренной моделью необходимо выполнить обработку полученных измерений и сформировать оценки неизвестных эффективных параметров ВАЦ.

Алгоритм верификации векторного анализатора цепей. Наборы опорных отсчетов для каждого парциального сигнала объединим в векторы. Вектор состояния, подлежащий оцениванию, составим из десяти векторов, содержащих комплексные опорные отсчеты эффективных параметров для прямого и обратного направлений зондирования:

$$\mathbf{x} = \left[\mathbf{D}_F^T \quad \mathbf{R}_F^T \quad \mathbf{S}_{1F}^T \quad \mathbf{L}_{1F}^T \quad \mathbf{T}_F^T \quad \mathbf{D}_R^T \quad \mathbf{R}_R^T \quad \mathbf{S}_{1R}^T \quad \mathbf{L}_{1R}^T \quad \mathbf{T}_R^T \right]^T, \quad (1)$$

где индексы F и R указывают направление зондирования (прямое и обратное соответственно). Векторы \mathbf{S}_1 и \mathbf{L}_1 для прямого и обратного зондирования введены для обозначения поэлементных произведений $\mathbf{S} \cdot \mathbf{R}$ и $\mathbf{L} \cdot \mathbf{R}$ соответственно, так как именно они фигурируют в модели системы. Зная указанные произведения и \mathbf{R} , несложно найти \mathbf{S} и \mathbf{L} .

Для обработки составного вектора измерений

$$\mathbf{z} = \left[\Gamma_{O1}^T \quad \Gamma_{S1}^T \quad \Gamma_{O2}^T \quad \Gamma_{S2}^T \quad S_{11}^T \quad S_{21}^T \quad S_{12}^T \quad S_{22}^T \right]^T \quad (2)$$

с целью оценки вектора состояния \mathbf{x} необходимо определить связь этих двух векторов. При использовании принятого метода интерполяции можно записать

$$\mathbf{z} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}, \quad (3)$$

где матрица линейного преобразования вектора состояния в вектор наблюдения имеет вид

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{W} & \mathbf{W}_1 & \mathbf{W}_2 & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{W} & \mathbf{W}_3 & \mathbf{W}_4 & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{W} & \mathbf{W}_1 & \mathbf{W}_2 & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{W} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{W}_5 & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{W}_6 & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{W}_6 \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{W} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{W}_5 & \mathbf{O} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

здесь \mathbf{O} – нулевая матрица; \mathbf{W} , $\mathbf{W}_1 - \mathbf{W}_6$ – матрицы, столбцы которых составлены из значений функции отсчетов $\text{sinc}(k) = \sin(k)/k$ с различными аргументами: $k = (f-f_i)/\Delta f$, где f – значения частот, в которых выполнены верификационные измерения; f_i – частота положения i -й опорной точки; i – номер столбца; Δf – шаг размещения опорных точек по частоте. Нижний индекс матрицы \mathbf{W} означает, что при формировании матрицы необходимо учесть комплексный коэффициент передачи линии и комплексные коэффициенты отражения короткого замыкания или холостого хода, которые зависят от частоты. В частности, индексы означают: 1 – необходимо учесть изменения сигнала при распространении в линии до холостого хода, при отражении от холостого хода и при распространении в линии обратно; 2 – необходимо дважды учесть изменения, характерные для 1; 3 – необходимо учесть изменения сигнала при распространении в линии до короткого замыкания, при отражении от короткого замыкания и при распространении в линии обратно; 4 – необходимо дважды учесть изменения, характерные для 3; 5 – необходимо учесть изменения сигнала при распространении в линии в одном и в противоположном направлениях; 6 – необходимо учесть изменения сигнала при распространении в линии лишь в одном направлении. Размерности матриц \mathbf{O} и \mathbf{W} равны и определяется

размерностью вектора опорных отсчетов одного парциального сигнала и числом измерительных точек по частоте.

Для решения уравнения (3) воспользуемся методом наименьших квадратов. В результате иско-мая оценка может быть найдена по формуле

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{C}^H \cdot \mathbf{C})^{-1} \cdot \mathbf{C}^H \cdot \mathbf{z}, \quad (5)$$

где \mathbf{H} – оператор Эрмитава сопряжения.

Экспериментальные оценки эффективных параметров. Экспериментальные исследования предложенного алгоритма выполнены при помощи ВАЦ PNA компании Agilent Technologies. Использована зондовая станция PM8 в составе с зондами ACP-L GSG компании Cascade Microtech. Проведена высокоточная калибровка multiline TRL [6] в копланарном волноводе. Измерения проведены в диапазоне частот от 50 МГц до 110 ГГц. Общее число частотных точек составило 242 с разным шагом в начале и конце диапазона, а размерность вектора наблюдений равна 1936. На верификационной пластине выбрана линия длиной 8,25 мм. Первая опорная точка расположена на частоте $f_1 = 50$ МГц, вторая – 10 ГГц и далее через 10 ГГц. Таким образом, интервал по частоте при размещении опорных отсчетов составил $\Delta f = 10$ ГГц, число опорных отсчетов для каждого эффективного параметра оказалось равным 12, а общее число неизвестных (размерность вектора состояния) – 120. Отметим, что расчет коэффициента передачи линии выполнен с учетом потерь в линии. Коэффициент отражения открытого порта линии принят равным 1 на всех частотах. Коэффициент отражения короткозамкнутого порта линии принят равным -1 на всех частотах.

Оценки эффективных параметров низкого уровня для прямого и обратного зондирования показаны на рис. 3 и 4 соответственно.

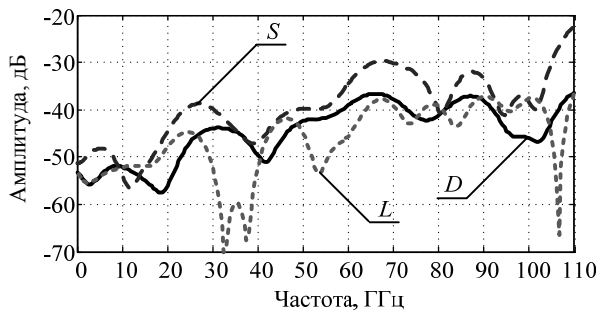


Рис. 3. Амплитуды эффективных значений направленности, согласования источника и согласования нагрузки для прямого зондирования

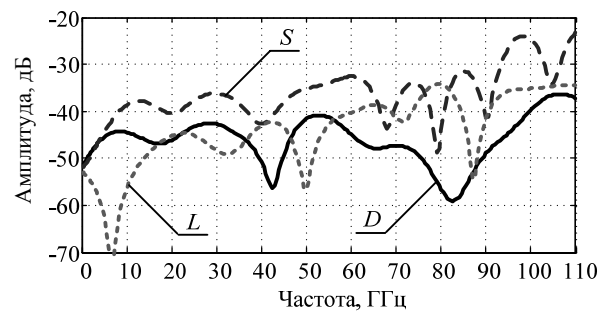


Рис. 4. Амплитуды эффективных значений направленности, согласования источника и согласования нагрузки для обратного зондирования

Оценки эффективных параметров высокого уровня для прямого и обратного зондирования показаны на рис. 5 и 6 соответственно. На графиках через T' обозначена оценка трекинга передачи, полученная алгоритмом из [5], который использует сплайн-интерполяцию.

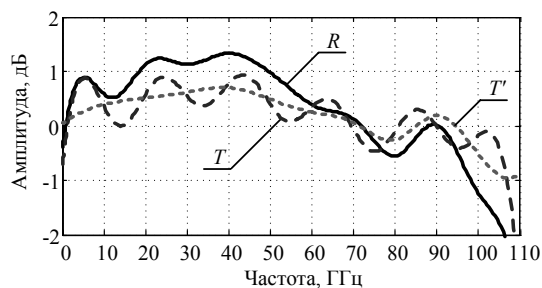


Рис. 5. Амплитуды эффективных значений трекингов отражения и передачи для прямого зондирования

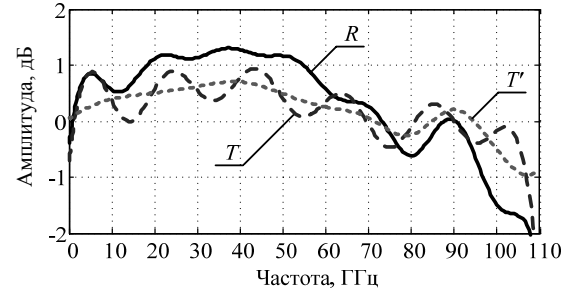


Рис. 6. Амплитуды эффективных значений трекингов отражения и передачи для обратного зондирования

Полученные оценки соответствуют точности, заявленной производителем калибровочной пластины. Значения амплитуды оценок эффективных параметров низкого уровня фактически определены повторяемостью соединителя (т.е. зонда) при повторных подключениях. Большие величины

трекингов отражения можно объяснить погрешностями описания верификационных стандартов и принятого способа интерполяции. Последнее, в частности, выражается в характерном отклонении графиков T от T' . Тем не менее рассмотренный алгоритм формирует достаточно точные оценки, а скорость расчета в отличие от прочих алгоритмов существенно выше, что важно при практической реализации в программном обеспечении ВАЦ.

Заключение. В работе рассмотрен удобный для практического применения алгоритм обработки верификационных данных при определении точности измерений на полупроводниковой пластине. Выполнена экспериментальная апробация предлагаемого подхода. Для получения максимально достоверных оценок эффективных параметров ВАЦ необходимы точное электромагнитное моделирование и расчет действительных параметров верификационных стандартов: коэффициента передачи планарной линии и коэффициентов отражения открытого и короткозамкнутого портов линии.

Автор выражает благодарность Владимиру Губе из НПК «ТАИР» (Томск, Россия) за помощь в интерпретации результатов работы и Андрею Румянцеву из Бранденбургского университета технологий (BTU, Котбус, Германия) за консультативную поддержку работы и предоставленные экспериментальные измерения.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 14-07-31312.

Литература

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. Determination of the Complex Residual Error Parameters of a Calibrated One-Port Vector Network Analyzer / G. Wübbeler, C. Elster, T. Reichel, R. Judaschke // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2009. – Vol. 58, issue 9. – P. 3238–3244.
3. Savin A.A. A Novel Factor Verification Technique for One-Port Vector Network Analyzer // Proceedings of the 43rd European Microwave Conference. – Nuremberg, Germany, 2013. – P. 60–63.
4. Savin A.A. Residual Errors Determinations for Vector Network Analyzer at a Low Resolution in the Time Domain / A.A. Savin, V.G. Guba, B.D. Maxson // Proceedings of the 82nd ARFTG Microwave Measurement Conference. – Columbus, USA, 2013. – P. 15–19.
5. Savin A.A. Estimation of Complex Residual Errors of Calibrated Two-Port Vector Network Analyzer / V.G. Guba, A. Rumiantsev, B.D. Maxson // Proceedings of the 83rd ARFTG Microwave Measurement Conference. – Tampa, USA, 2014 (принято к публикации).
6. 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.

Савин Александр Александрович

Канд. техн. наук, директор НИИ радиотехнических систем ТУСУРа

Тел.: +7-952-806-20-96

Эл. почта: saasavin@mail.ru

Savin A.A.

Linear processing of verification data of vector network analyzer for wafer-level application

The article describes a new algorithm for verification of residual errors in calibrated two-port vector network analyzers for wafer-level applications. Calibration residual errors are extracted from a distance-frequency system model with the Kotelnikov interpolation and special time-domain technique. Experimental studies were conducted at the wafer-level for the 110 GHz frequency band.

Keywords: Vector network analyzer, S-parameters, calibration, probe station, on-wafer equipment, verification, systematic error.