

Савин А.А., Губа В.Г., Ладур А.А.
Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники
ООО «НПК ТАИР»

Метод экстракции параметров материала печатных плат и полупроводниковых подложек на основе измерений коэффициента отражения в широкой полосе частот

В работе рассмотрен метод экстракции свойств материалов, основанный на измерении коэффициента отражения короткозамкнутой линии передачи с обработкой во временной области. Экспериментальные результаты получены путем исследования относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь материала печатной платы и полупроводниковой подложки. Измерения выполнены в полосе частот до 20 ГГц на плате и до 70 ГГц на подложке.

Ключевые слова: Векторный анализатор цепей, фильтрация во временной области, материал, печатная плата, измерения на подложке.

Высокоточные измерения параметров рассеяния электрических цепей в широкой полосе частот можно выполнить при помощи векторного анализатора цепей (ВАЦ). Чаще всего для тестирования материалов их помещают в тракт передачи сигнала между портами калиброванного двухпортового ВАЦ. Используют коаксиальный тракт, волноводы, различные антенные системы. Краткое описание применяемых технологий приведено в документе [1]. Методы экстракции параметров основаны на обработке результатов измерений комплексных коэффициентов отражения (КО) и коэффициентов передачи (КП) образца материала в полосе частот. В ряде случаев измеренные частотные характеристики подвергают обработке во временной области. Например, метод калибровки измерительной системы, описанный в [2], использует алгоритм GRL (Gated Reflect Line), основанный на математическом аппарате калибровки TRL (Thru-Reflect-Line) и выделении во временной области. Возможности TRL и, в частности, алгоритма multiline TRL (mTRL) [3] на этом не ограничиваются. В процессе обработки калибровочных измерений может быть получена оценка постоянной распространения тракта измерительной системы, а значит диэлектрические свойства среды. Прежде всего, это связано с обработкой измерений КП используемых при калибровке линий, подключаемых между портами ВАЦ. Недостатком использования измерений КП является то, что тракт не всегда является однородным и необходимо принимать определенные допущения относительно свойств среды распространения вне области с тестируемым материалом. В данной работе рассмотрим метод, основанный на измерениях КО короткозамкнутого отрезка линии передачи и выделении информативных сигналов (зоны с материалом) во временной области. Для реализации метода достаточно иметь частотно-панорамный однопортовый ВАЦ (рефлектометр).

Оснастка для тестирования электронных компонентов печатных плат содержит два соединителя (коаксиально-полосковых перехода) и плату с линией между соединителями. При тестировании компонентов линия необходима для установки компонента и, кроме

этого, обеспечивает разделение во временной области сигналов, отраженных от соединителей. Описание способа калибровки и коррекции измерений параметров рассеяния компонентов дано в [4]. Для смещения плоскости измерений к компоненту в ряде случаев удобно использовать модель линии, которая задается набором параметров, в числе которых свойства материала платы.

Предлагаемый в данной работе метод экстракции параметров материала основан на измерении комплексного КО с подвижной нагрузкой короткого замыкания (КЗ). Мера КЗ размещается вдоль линии передачи на плате или подложке и может быть выполнена в виде металлической пластины, замыкающей сигнальный и земляной проводники линии.

Рассмотрим подробнее реализацию метода для определения параметров материала печатной платы. Предлагаемый метод использует измерения КО оснастки со стороны только одного соединителя при двух положениях подвижной КЗ на линии. На рисунке 1 показаны положения КЗ на расстоянии l_1 и l_2 от соединителя 1. Измеренный КО является суммой трех локализованных во временной области сигналов: отражение от коаксиального входа соединителя 1, отражение от КЗ и отражение от входа соединителя 1 при обратном распространении волны. Длины линий до КЗ должны обеспечивать высокое разрешение откликов во временной области при работе в задаваемой ВАЦ полосе частот.

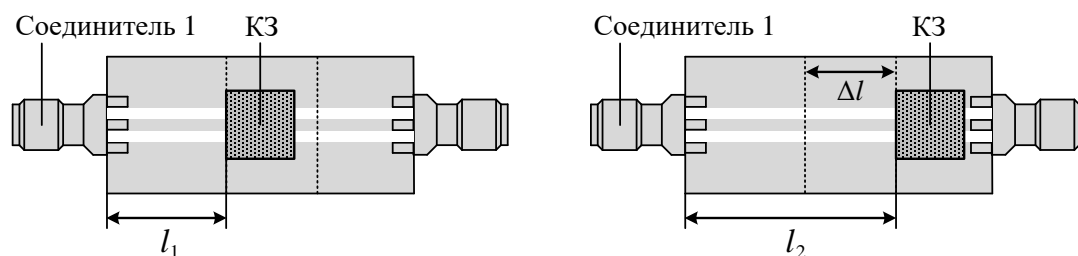


Рис. 1. Два положения нагрузки КЗ на линии.

Коэффициент отражения от области расположения КЗ определяется КП соединителя и КП линии в двух направлениях. При перемещении КЗ происходит изменение длины отрезка линии без изменения степени влияния соединителя. Кроме этого, свойства КЗ также остаются прежними. Поэтому после выделения сигналов от двух положений КЗ во временной области и их делении друг на друга влияние соединителя и неизвестного КО подвижной КЗ исключается. Данная процедура позволяет найти КП отрезка линии длиной $\Delta l = l_2 - l_1$ при распространении в обе стороны. Зная КП, несложно определить постоянную распространения линии, а значит и эффективную диэлектрическую проницаемость. Отметим, что выделение во временной области можно выполнять традиционной оконной фильтрацией, либо использовать более точный алгоритм совместной оценки частотных характеристик, рассмотренный в работе [5]. Важно, что после обработки во временной области исключается влияние эффективной направленности и эффективного согласования порта калиброванного ВАЦ. После деления снижается влияние эффективного трекинга тракта отраженных сигналов ВАЦ. Точность измерений существенно повышается.

Связь эффективной диэлектрической проницаемости материала с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r определена математической моделью линии. Для нахождения параметров материала печатной платы используем модель микрополосковой линии из [6]. Для экстракции свойств полупроводниковой подложки будем использовать модель копланарной линии из [7].

Экспериментальные исследования рассмотренного метода выполнены при помощи линии длиной 130 мм на печатной плате, изготовленной на материале RO4350B [8]. На рисунке 2 показана фотография верификационной тестовой оснастки, подключенной к портам двухпортового ВАЦ. Оснастка содержит линию 50 Ом и стандарт Битти. На

основной для эксперимента линии с импедансом 50 Ом размещена нагрузка КЗ. Геометрические параметры линии 50 Ом на плате: $W=0,52$ мм; $h=0,254$ мм. Измерения W выполнены при помощи микроскопа Mahr MarVision MM 320 с погрешностью на уровне 1 мкм. Значения W и h входят в модель линии и должны быть известны.

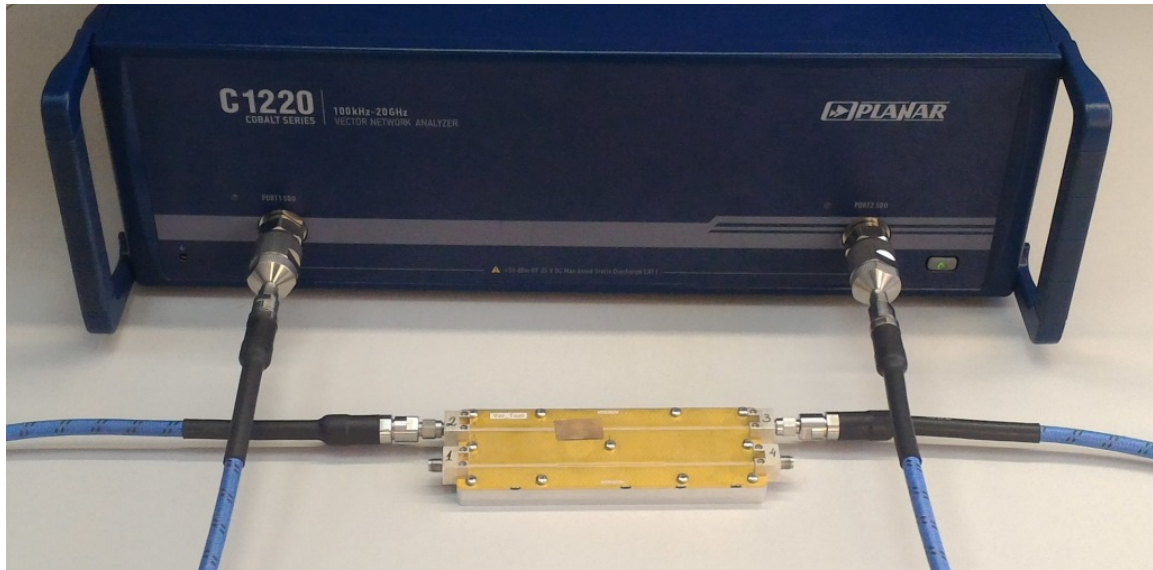


Рис. 2. Фотография измерительной установки.

Измерения КО оснастки с подвижной КЗ получены при помощи ВАЦ Кобальт С1220 [9] в диапазоне частот от 100 кГц до 20 ГГц (мощность -5 дБм, полоса фильтра ПЧ 1 кГц). Первое положение КЗ находилось на расстоянии 60 мм от начала линии и соединителя 1, подключенного к первому порту прибора. Второе положение сдвинуто на $\Delta l=30$ мм в сторону от соединителя 1. Результаты расчета диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь показаны на рисунке 3 толстыми сплошными линиями. Тонкими сплошными линиями показаны результаты при выполнении расчетов с изменением значения Δl на +100 мкм и -100 мкм. Для реализации предлагаемого в работе алгоритма достаточно иметь измерения только КО со стороны первого порта. Пунктирными линиями на рисунке 3 показаны результаты экстракции параметров после выполнения двухпортовой калибровки mTRL. Для реализации такого подхода использована специальная плата тестовой оснастки с набором линий различной длины. Результаты экстракции алгоритмом mTRL показывают некоторые средние параметры материала платы в местах размещения различных линий. Кроме этого при обработке измерений разных линий сказывается неповторяемость параметров разных соединителей.

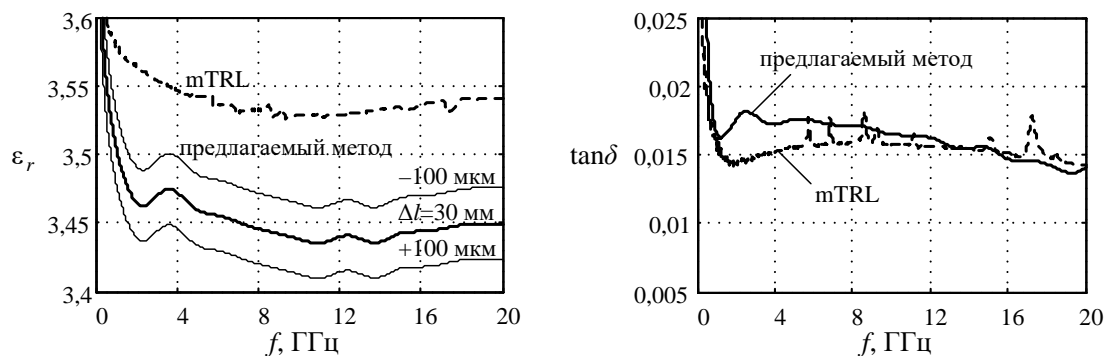


Рис. 3. Относительная диэлектрическая проницаемость (слева) и тангенс угла диэлектрических потерь (справа) материала печатной платы.

Производитель [8] приводит значение $\epsilon_r=3,48$. В [8] также указаны значения $\tan\delta=0,0031$ (2,5 ГГц) и $\tan\delta=0,0037$ (10 ГГц). Экспериментально полученные результаты по величине ϵ_r практически совпадают, по величине $\tan\delta$ оказались больше примерно в 4-5 раз. Неточность априорной информации о величине Δl оказывает влияние только на ϵ_r . Погрешность в 100 мкм приводит к отклонению оценки ϵ_r не более чем на 1 % в диапазоне частот до 20 ГГц. Поведение полученных характеристик в начале диапазона частот обусловлено дисперсией параметров материала и спецификой алгоритма обработки, предполагающего выделение во временной области.

Второй эксперимент проведен с целью экстракции параметров материала полупроводниковой подложки из арсенида галлия. Измерения получены на опорном материале RM8130 [10]. Основные геометрические параметры конструкции копланарных волноводов: $w_g=261,5$ мкм; $s=42$ мкм; $w=64$ мкм. Для проверки работоспособности метода получены и обработаны измерения КО двух линий на общей пластине. Один из портов линий при выполнении измерений работал в режиме холостого хода, обеспечивая практически полное отражение. Длины линий, использованных в эксперименте: $l_1=7,115$ мм; $l_2=20,245$ мм. На рисунке 4 приведены графики относительной диэлектрической проницаемости материала подложки в диапазоне до 70 ГГц. Результаты, полученные предлагаемым методом, сравниваются с результатами, полученными после двухпортовой калибровки mTRL, выполненной на множество линий пластины RM8130

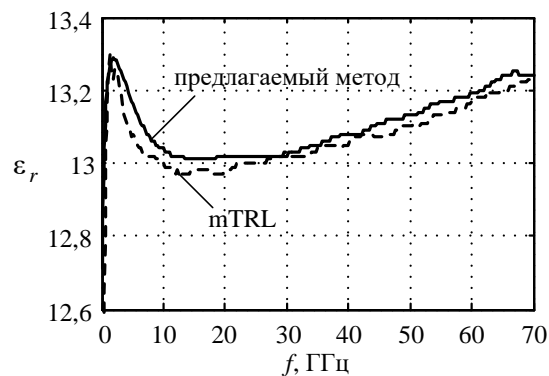


Рис. 4. Относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки.

Видим, что предлагаемый подход обеспечивает высокую точность оценок. В работе [11] показано, что эффективные параметры калиброванного ВАЦ в составе зондовой станции могут быть найдены с погрешностью, определяемой точностью описания верификационной линии передачи на подложке. Для определения эффективных параметров в [11] использована одна линия большой длины, технология фильтрации во временной области и адаптивная постобработка. В данном эксперименте с помощью двух линий найдены точные параметры материала. При наличии зонда с наконечником в виде нагрузки КЗ достаточно всего одной линии для решения задачи экстракции параметров линии на подложке.

Таким образом, в работе рассмотрен простой, удобный и относительно недорогой при практической реализации метод измерения диэлектрических свойств материалов печатных плат и полупроводниковых подложек. Для реализации высокой точности метода на частотах до 110 ГГц и выше при работе на подложках необходимо обеспечить высокую точность позиционирования и механическую повторяемость подвижной меры КЗ. Такую меру может реализовать специальная зондовая головка с замкнутыми проводниками. Оптические микроскопы в составе зондовых измерительных систем совместно с датчиками усилия прижатия могут обеспечить точность позиционирования не хуже 1 мкм и приемлемую повторяемость.

Работа выполнена в рамках проекта по государственному заданию Минобрнауки России № 8.7348.2017/8.9.

Библиографический список

1. Agilent (2006). Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials, Application Note, and Literature number 5989-2589 EN.
2. Lima D.R., Junqueira C., Canto M.A.R., Migliano A.C. Accuracy of GRL Calibration Considering Time Domain Gating for the Calculation of Permittivity Parameter in Free Space Technique // Proc. of Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), Brazil, 3-6 Nov, 2015, P. 1-5.
3. R.B. Marks A multi-line method of network analyzer calibration // IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 39, no. 7, P. 1205-1215, January 1991.
4. A.A. Savin, V.G. Guba, M. V. Sinogin, O. Yu. Morozov, O. N. Bykova A Simple Test Fixture De-embedding Method for PCB Components Measurements Using a Calibrated Vector Network Analyzer // Proc. of the 45th EuMC. 7-10 Sept 2015, Paris, France. 2015, P. 983-986.
5. A.A. Savin A Novel Factor Verification Technique for One-Port Vector Network Analyzer // Proceedings of the 43rd European Microwave Conference, Nuremberg, Germany, 2013, P. 60-63
6. Jia-Sheng Hong, M. J. Lancaster Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. John Wiley & Sons. 2001. 476 p.
7. W. Heinrich Quasi-TEM description of MMIC coplanar lines including conductor-loss effects // IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 41, no. 1, P. 45-52, Jan. 1993.
8. High Frequency Circuit Materials. RO4000 Series. Data Sheet. Advanced Connectivity Solutions. 100 S. Roosevelt Avenue, Chandler, AZ 85226, www.rogerscorp.com, Rogers Corporation, Printed in U.S.A., Revised 1253 101916 PUB# 92-004.
9. User Manual. Specification. URL: http://www.planarchel.ru/Products/Measurement%20instrument/c1220/user_manual_Cobalt_part1_rus.pdf.
10. Reference Material 8130. Coplanar waveguide calibration set, NIST, Gaithersburg, MD 20899, USA, 1998.
11. A.A. Savin, V.G. Guba, A. Rumiantsev, B.D. Maxon, D. Schubert, and U. Arz Adaptive Estimation of Complex Calibration Residual Errors of Wafer-Level S-Parameters Measurement System // 84th ARFTG Microwave Measurement Conference, Boulder, USA, 2014, P. 1-4.