

УДК 621.382.2

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬНЫХ СВЧ PIN-ДИОДОВ

Г.В.Гудков, А.С.Ионов*, А.В.Штро

MEASUREMENT OF PARAMETERS OF SWITCHING MICROWAVE PIN DIODES

G.V.Gudkov, A.S.Ionov*, A.V.Shtro

Институт электронных и информационных систем НовГУ, ggudkov@yandex.ru

**ОАО «ОКБ-Планета», Великий Новгород*

Рассматриваются методы измерения сопротивлений потерь, накопленного заряда, времени обратного восстановления. Анализируются проблемы конструирования контактного устройства для измеряемых pin-диодов и калибровки.

Ключевые слова: pin-диод, сопротивление потерь, векторный анализатор цепей, параметры матрицы рассеяния, контактное устройство, компланарный волновод, калибровочная мера, накопленный заряд, время обратного восстановления

This article considers the methods of measuring loss resistances, stored charge, and reverse recovery time. The problems of designing the fixture for measured PIN diodes and the calibration are analyzed.

Keywords: PIN diode, loss resistance, vector network analyzer, scattering parameters, fixture, coplanar waveguide, calibration standard, stored charge, reverse recovery time

Pin-диоды широко применяются в различных устройствах ВЧ- и СВЧ-диапазонов, таких как переключатели, управляемые аттенюаторы, ограничители, модуляторы. Это связано с рядом замечательных свойств, присущих данному типу приборов, среди которых можно выделить простоту конструкции и малые размеры, возможность коммутировать сигналы большой мощности при малом управляющем токе, высокую скорость переключения [1].

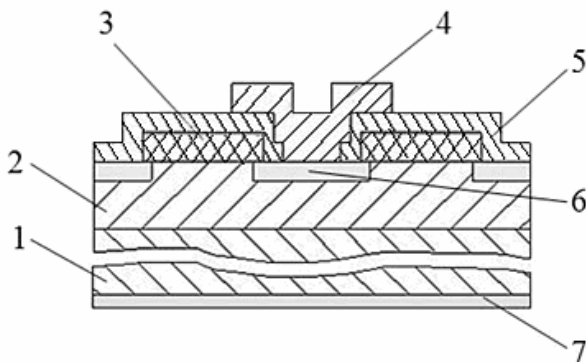


Рис.1. Структура pin-диода: 1 — низкоомная подложка n -типа (катод); 2 — высокоомный эпитаксиальный слой (i -область); 3 — пленка SiO_2 , полученная окислением в хлорсодержащей среде; 4 — омический контакт к аноду (Al); 5 — пленка SiO_2 , полученная осаждением в вакууме; 6 — область p -типа (анод); 7 — омический контакт к катоду (сплав AuGeSb)

Структура pin-диода (рис.1) образована двумя сильнолегированными областями с проводимостью p - и n -типа (анод 6 и катод 1), между которыми находится область с собственной проводимостью, или i -область 2, обладающая высоким сопротивлением. Эквивалентные схемы pin-диода при прямом и обратном смещении приведены соответственно на рис.2а,б. Здесь R_S — прямое сопротивление потерь, которое по определению представляет собой последовательное сопротивление потерь pin-диода, включенного в линию передачи при заданном постоянном прямом токе. В соответствии с [2] оно может рассчитано по формуле

$$R_S = w^2 / (\mu_n + \mu_p) I_F \tau, \quad (1)$$

где w — толщина i -области, I_F — ток прямого смещения, μ_n и μ_p — подвижности электронов и дырок, τ — время жизни носителей заряда в i -области.

Формула (1) справедлива в том случае, если время пролета носителей заряда через i -область превышает период сигнала. Нижняя частота, удовлетворяющая этому условию, определяется выражением

$$f_T = 1300 / w^2, \quad (2)$$

где f_T — в МГц, w — в мкм.

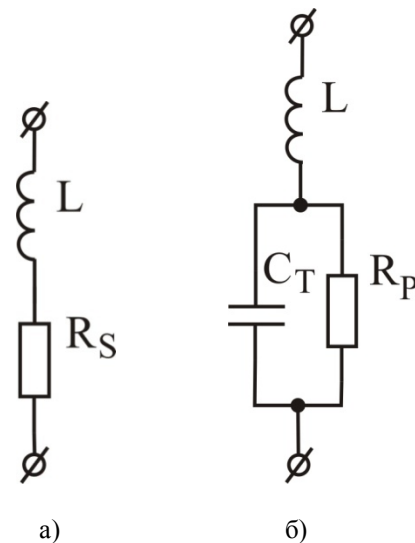


Рис.2. Эквивалентная схема pin-диода: а — при прямом смещении; б — при обратном смещении

Для определения обратного сопротивления потерь, которое представляет собой последовательное сопротивление потерь pin-диода, включенного в линию передачи при заданном постоянном обратном напряжении, необходимо перейти от параллельной схемы (рис.2б) к эквивалентной ей последовательной схеме. В этом случае обратное сопротивление потерь зависит не только от сопротивления R_P , которое учитывает ток утечки обратно смещенного pin-диода, но и от емкости C_i и частоты, и имеет типичные значения от единиц до десятков Ом. Полная емкость C_i включает в себя емкости pin-структуры и корпуса, L отражает наличие паразитной индуктивности. По существу прямое и обратное сопротивление потерь являются активной составляющей полного входного сопротивления pin-диода, измеренного на заданной частоте либо при заданном прямом токе, либо заданном обратном напряжении.

В условиях серийного производства возникает необходимость разработки аппаратной части и методик измерений сопротивлений потерь и параметров, определяющих скорость переключения pin-диода, таких как накопленный заряд и время обратного восстановления, при этом должна быть обеспечена приемлемая производительность при 100% контроле изделий. Рациональным решением является использование двух измерительных установок, поскольку процесс измерения и состав измерительного оборудования для вышеуказанных групп параметров сильно различаются.

Традиционный метод измерения прямого и обратного сопротивления потерь, основанный на использовании измерительной линии, не может быть использован из-за низкой производительности. В основу предлагаемого нами метода положено измере-

ние активной составляющей полного входного сопротивления ρ_{in} -диода с использованием векторного анализатора цепей. Блок-схема установки для измерения сопротивлений потерь представлена на рис.3. Ее основу составляет измеритель комплексных коэффициентов передачи и отражения (ИККПО) «Обзор-304/1», производимый ООО «Планар», Челябинск. Нами разработаны контактное устройство 4 и блок источников постоянного смещения (БИПС) 5. БИПС включает два регулируемых источника — тока прямого смещения и напряжения обратного смещения. Источник напряжения имеет ограничение выходного тока на уровне 20 мА для защиты металлизации платы контактного устройства от последствий короткого замыкания. Более сложной задачей является изготовление контактного устройства для измеряемого ρ_{in} -диода. Очевидно, что его конструкция определяется типом корпуса ρ_{in} -диода, в данном случае это КТ46 (SOT23), имеющий планарные выводы. Для перехода от коаксиального измерительного кабеля к компланарному волноводу, сформированному на плате контактного устройства, нами был использован разъем SMA-типа Amphenol 901-9850. Размеры компланарного волновода, обеспечивающие волновое сопротивление 50 Ом, при соответствующем выборе материала платы почти идеально соответствуют размерам этого разъема и корпуса ρ_{in} -диода. Наиболее подходящим материалом из СВЧ-диэлектриков в нашем случае оказался фольгированный ФЛАН-10, имеющий значение ϵ , равное 10. Типовым решением является установка измеряемого ρ_{in} -диода на печатную плату в перевернутом состоянии в отверстие, соответствующее форме и размерам корпуса. В этом случае изогнутые концы выводов входят в контакт с элементами волновода. Надежный контакт осуществляет прижимное устройство, представляющее собой подпружиненный диэлектрический стержень с резиновым наконечником, воздействующий на все выводы.

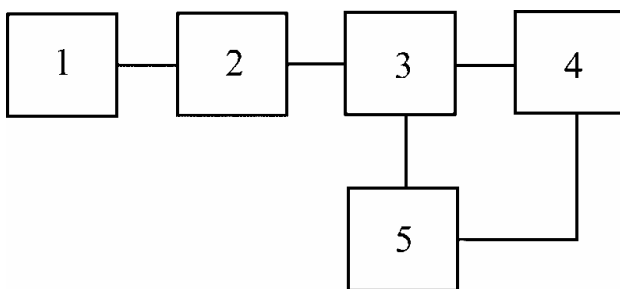


Рис.3. Блок-схема установки для измерения сопротивлений потерь: 1 — персональный компьютер; 2 — ИККПО «Обзор-304/1»; 3 — тройник ввода смещения; 4 — контактное устройство; 5 — блок источников постоянного смещения

«Обзор-304/1» позволяет проводить однопортовые и двухпортовые измерения. В первом случае каждый порт выступает как источник падающего сигнала и как приемник отраженного сигнала. При этом измеряются параметры матрицы рассеяния S_{11} или S_{22} . Во втором случае поочередно один из портов является источником падающего и приемником отраженного сигнала, в то время как другой выполняет

функцию приемника выходного сигнала. Когда роль источника исполняет порт 1, измеряются параметры S_{11} и S_{21} , когда порт 2 — S_{22} и S_{12} . Для расчета полного сопротивления можно использовать любой из этих параметров, однако оптимальный выбор определяется значением этого сопротивления и схемой включения ρ_{in} -диода в измерительную цепь. Рассмотрим вначале однопортовые измерения, при которых измеряется коэффициент отражения S_{11} или S_{22} . Если значение измеряемого сопротивления одного порядка с номинальным значением согласованной нагрузки 50 Ом, то обеспечивается высокая чувствительность, так как коэффициент отражения сильно изменяется при небольших изменениях сопротивления. Когда сопротивление значительно отличается от 50 Ом, то однопортовые измерения невозможны [3], т. к. коэффициент отражения близок к единице, а его изменение настолько мало, что не выделяется на фоне трассового шума (трассовый шум определяется как изменения трассы высокого уровня сигнала из-за шума). На практике диапазон измерений составляет от единиц до сотен Ом.

Двухпортовые измерения могут быть выполнены в значительно более широком диапазоне при использовании последовательного или параллельного включения измеряемого ρ_{in} -диода, но требует более сложного контактного устройства. Для расчета полного сопротивления может быть использован либо параметр S_{11} , либо S_{21} . Однако S_{11} больше ограничен уровнем собственных шумов векторного анализатора цепей и некоторыми другими факторами [3], поэтому предпочтительнее использовать S_{21} . В этом случае для значений полного сопротивления менее 50 Ом, что имеет место для ρ_{in} -диодов, больше подходит параллельное включение. Если же используется параметр S_{11} , то лучший результат дает последовательное включение.

Ключевым моментом при подготовке к проведению измерений является калибровка. При проведении измерений с использованием контактного устройства могут быть использованы два вида калибровки — Thru-Reflect-Line (TRL) и Short-Open-Load-Thru (SOLT) [4]. В обоих случаях наборы калибровочных мер изготавливаются самим пользователем, затем составляется их описание. Нами была выбрана SOLT калибровка, поскольку используемые при ее проведении калибровочные меры проще изготовить. При однопортовых измерениях (полная однопортовая калибровка) задача упрощается, так как требуются три калибровочные меры — «короткое замыкание» (short), «холостой ход» (open) и «нагрузка» (load), при двухпортовых (полная двухпортовая калибровка) к ним добавляется еще одна — перемычка (thru). Этот метод калибровки обеспечивает наивысшую точность.

После изготовления комплекта калибровочных мер необходимо создать его описание. Для меры «холостой ход», в качестве которой обычно используется «пустое» контактное устройство, указывается значение краевой емкости. Методика определения этого параметра приводится в [4]. В свою очередь, для меры «короткое замыкание» указывается значение пара-

зитной индуктивности. Модели краевой емкости и паразитной индуктивности описываются в общем случае функцией частоты, в виде полиномов 3-го порядка. Частотная зависимость нами не учитывалась, так как измерения проводились только на одной, относительно невысокой частоте (1 ГГц). Для меры «перемычка» должно быть указано значение электрической длины (задержка сигнала в одном направлении, offset delay). Потери передачи (offset loss) принимались по умолчанию равными нулю.

В настоящее время установка для измерений прямого и обратного сопротивлений потерь эксплуатируется на ОАО «ОКБ-Планета» (Великий Новгород) в однопортовом режиме.

Накопленный заряд представляет собой заряд электронов и дырок, инжектированных в i -область при протекании прямого тока. Его значение определяется в соответствии с формулой

$$Q = I_F \tau. \quad (3)$$

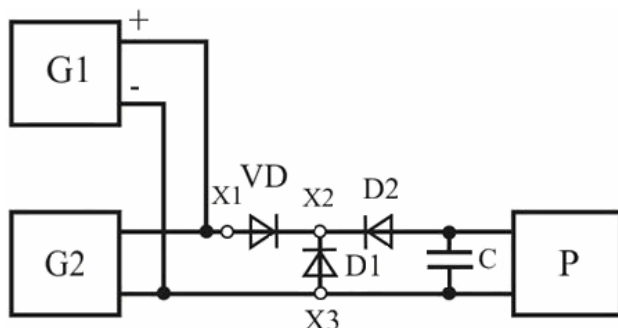


Рис.4. Схема измерения накопленного заряда: G1 — генератор прямого тока; G2 — генератор обратного напряжения; P — измеритель заряда

За основу для измерения накопленного заряда была взята методика измерения заряда восстано-

вления [5]. В общем случае заряд восстановления равен сумме накопленного заряда и заряда емкости pin-диода, которым можно пренебречь вследствие его относительно малого значения. Схема измерения приведена на рис.4. Основным звеном в ней является измеритель заряда P, в качестве которого в соответствии с [5] допускается использовать селективный усилитель, настроенный на частоту f следования импульсов генератора G2 или кратную ей частоту. К выходу селективного усилителя подключается индикатор, который предварительно калибруется посредством включения вместо измеряемого диода VD конденсатора с известной емкостью. Заряд, накапливаемый на конденсаторе, определяется произведением емкости конденсатора на амплитуду импульсов генератора G2. Недостатком данной методики измерений является необходимость выполнения расчета накопленного заряда по значению калибровочного заряда и отношению показаний измерителя, соответствующим измеряемому диоду и калибровочному конденсатору.

Нами был предложен измеритель заряда, позволяющий проводить прямые измерения (патент на полезную модель № 126145). На рис.5 приведена функциональная схема измерителя. На вход полосового активного фильтра 1 поступают импульсы обратного тока, возникающие в момент, когда измеряемый диод, через который протекает постоянный прямой ток, запирается прямоугольным импульсом обратного напряжения. Регулируемый источник постоянного тока прямого смещения 7 (генератор G1, рис.5) вместе с встроенным цифровым амперметром 8 может быть интегрирован в описываемое устройство. На входном сопротивлении фильтра импульсы тока преобразуются в импульсы напряжения. Фильтр настроен на частоту повторения импульсов обратного напряжения, таким образом, он выделяет первую гармонику входных импульсов, амплитуда которой

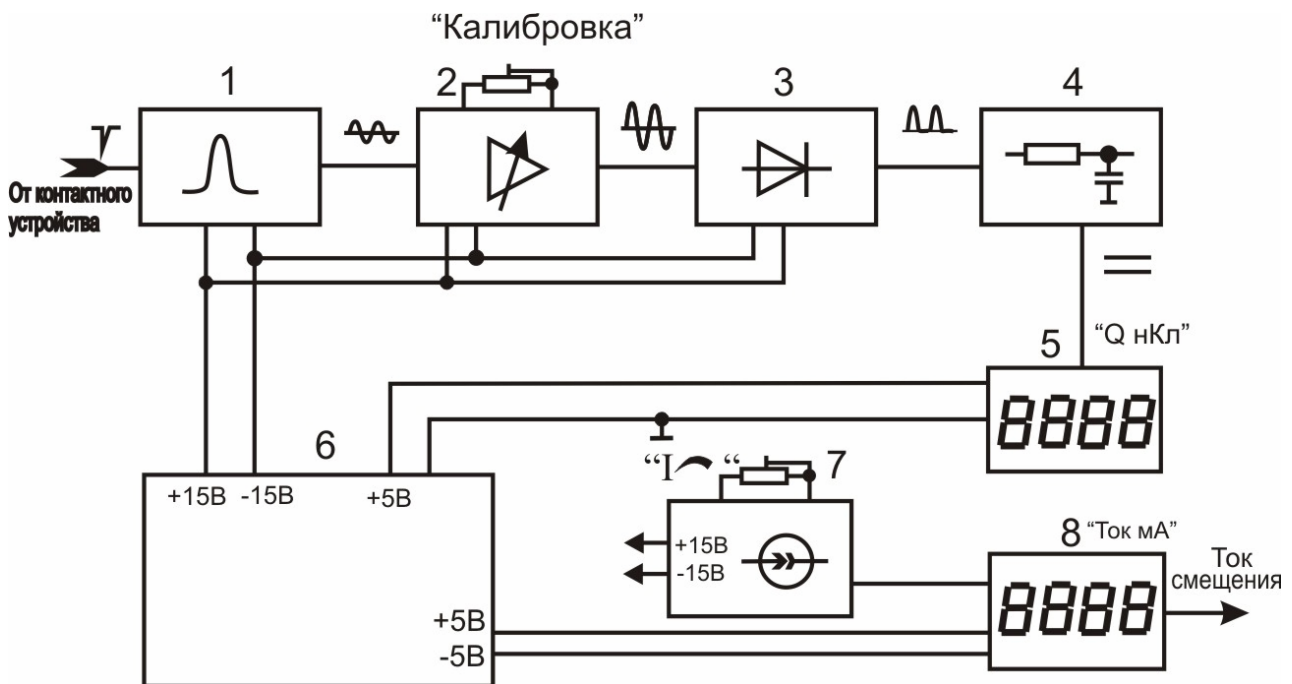


Рис. 5. Функциональная схема измерителя заряда

будет пропорциональна площади импульса обратного тока, т. е. заряду. Напряжение с выхода полосового фильтра поступает на вход усилителя 2 с регулируемым коэффициентом усиления, предназначенного для калибровки измерителя заряда. Усиленное напряжение выпрямляется прецизионным выпрямителем 3, сглаживается фильтром нижних частот 4 и поступает на вход встроенного цифрового вольтметра 5. Таким образом, описываемое устройство осуществляет преобразование заряда в постоянное напряжение и измерение этого напряжения.

Калибровка измерителя заряда производится в следующем порядке. В контактное устройство вместо измеряемого диода помещается калибровочный конденсатор с очень точно измеренным значением емкости. На конденсатор подается импульсное напряжение отрицательной полярности от генератора прямоугольных импульсов. При этом вершина импульса должна быть максимально плоской, а его амплитуда измерена с максимально возможной точностью. Во время действия импульса конденсатор накапливает заряд, равный произведению амплитуды импульса и емкости конденсатора. Во время паузы между импульсами конденсатор разряжается через входное сопротивление измерителя заряда. Калибровка заключается в изменении коэффициента усиления усилителя подстроечным резистором таким образом, чтобы показания цифрового встроенного вольтметра соответствовали заряду, накопленному на конденсаторе. Таким образом, описываемое устройство будет осуществлять показания непосредственно в единицах заряда.

Время обратного восстановления представляет собой время переключения с заданного прямого тока I_F на заданное обратное напряжение. Оно измеряется от момента прохождения тока через нулевое значение до момента, когда обратный ток, уменьшаясь от максимального импульсного значения, достигнет заданного значения (как правило, равного 0,1 от максимального импульсного значения). Отличительной особенностью pin-диодов является относительно большое время жизни носителей заряда в i -области. По этой причине время обратного восстановления определяется в основном процессами перехода носителей из этой области в p - и n -области [2] и, следовательно, зависит от максимального значения обратного тока, которое определяется амплитудой импульса обратного напряжения и сопротивлением внешней цепи:

$$t_{rr} = \tau \ln(1 + I_F / I_R), \quad (4)$$

где I_R — максимальное значение обратного тока.

Измерение проводится при значении активного сопротивления во внешней цепи 100 Ом, представляющего собой сумму выходного сопротивления генератора обратного напряжения (50 Ом) и входного сопротивления измерителя (50 Ом). Схема измерения похожа на схему, изображенную на рис. 4, за исключением того, что в ней отсутствуют элементы $VD1$, $VD2$ и C , а вместо измерителя заряда P используется измеритель времени обратного восстановления, подключаемый в момент измерения к клеммам $X2$ и $X3$. Схожесть схем позволяет изме-

рять оба параметра на одной измерительной установке, оснатив ее соответствующими устройствами коммутации. В качестве измерителя времени обратного восстановления нами был использован цифровой запоминающий осциллограф с функцией установки опорных уровней, что позволило автоматизировать процесс измерения.

За период эксплуатации в ОАО «ОКБ-Планета» установка для измерения накопленного заряда и времени обратного восстановления показала себя как достаточно производительное, простое в обслуживании и надежное средство измерений.

Выводы

Использование векторного анализатора цепей для измерения прямого и обратного сопротивления потерь pin-диода упрощает процесс выполнения измерений и обеспечивает более высокую производительность по сравнению с традиционным методом.

В разработанном контактном устройстве хорошее согласование геометрических размеров линии передачи с размерами коаксиально-компланарного перехода, корпуса и выводов pin-диода обеспечено за счет того, что в качестве линии передачи использован компланарный волновод, изготовленный из фольгированного диэлектрика ФЛАН-10 с высоким значением относительной диэлектрической проницаемости.

Калибровочные меры, изготовленные авторами, обеспечивают выполнение SOLT-калибровки.

Результаты однопортовых измерений обратного сопротивления потерь очень сильно зависят от точности определения краевой емкости и качества выполнения калибровки.

Разработанный измеритель заряда позволяет проводить прямые измерения накопленного заряда, сократить номенклатуру оборудования и уменьшить габаритные размеры измерительной установки.

Использование в качестве измерителя времени обратного восстановления цифрового осциллографа с функцией установки опорных уровней позволяет автоматизировать процесс выполнения измерений.

1. Резников В., Губирин Л. Компоненты и технологии // Высокочастотные и СВЧ p - i - n диоды. 2000. №4. С.42-43.
2. The pin diode circuit designers' handbook // Radioscanner.ru [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://cp.literature.agilent.com/files/download/file6770/pinhandbook.pdf> (дата обращения 28.08.13).
3. Impedance Measurements. Evaluating EMC Components with DC Bias Superimposed // Официальный сайт Agilent Technologies [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-9887EN.pdf> (дата обращения 10.05.2012).
4. In-Fixture Measurements Using Vector Network Analyzers. Application Note Agilent AN 1287-9 // Официальный сайт Agilent Technologies [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5968-5329E.pdf> (дата обращения 10.05.2012).
5. ГОСТ 18986.6-73. Диоды полупроводниковые. Метод измерения заряда восстановления. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. 7 с.

Bibliography (Transliterated)

1. Reznikov V., Gubyrin L. Komponenty i tekhnologii // Vysokochastotnye i SVCh p-i-n diody. 2000. №4. S.42-43.
2. The pin diode circuit designers' handbook // Radioscanner.ru [Elektronnyi resurs]. Sistem. trebovaniia: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://files.radioscanner.ru/files/download/file6770/pinhandbook.pdf> (data obrashcheniia 28.08.13).
3. Impedance Measurements. Evaluating EMC Components with DC Bias Superimposed // Ofitsial'nyi sait Agilent Technologies [Elektronnyi resurs]. Sistem. trebovaniia: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-9887EN.pdf> (data obrashcheniia 10.05.2012).
4. In-Fixture Measurements Using Vector Network Analyzers. Application Note Agilent AN 1287-9 // Ofitsial'nyi sait Agilent Technologies [Elektronnyi resurs]. Sistem. trebovaniia: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5968-5329E.pdf> (data obrashcheniia 10.05.2012).
5. GOST 18986.6-73. Diody poluprovodnikovye. Metod izmereniia zariada vosstanovleniia. M.: IPK Izd-vo standartov, 2004. 7 s.