

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **033772**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2019.11.25

(51) Int. Cl. **G01R 27/28** (2006.01)

(21) Номер заявки
201700382

(22) Дата подачи заявки
2015.10.20

(54) **ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА
ОТРАЖЕНИЯ СВЧ-УСТРОЙСТВА**

(43) **2018.11.30**

(56) US-A1-4758776
US-B1-6252666
US-A1-20080024785
US-A1-20020093342

(86) **PCT/RU2015/000687**

(87) **WO 2017/069647 2017.04.27**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ВЕКТОРНЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ" (RU)**

(72) Изобретатель:
**Терентьев Андрей Александрович,
Никулин Сергей Михайлович (RU)**

(57) Изобретение может быть использовано для измерения коэффициента отражения нелинейных СВЧ-устройств. Технический результат заключается в возможности раздельного анализа СВЧ-устройств на частоте основного тона и на частотах высших гармоник сигнала, подаваемого на их вход, за счет возможности частотной селекции отраженных от исследуемых СВЧ-устройств сигналов с использованием 6-портовых измерительных рефлектометров. Для измерений используют 6-портовые измерительные рефлектометры. На исследуемое СВЧ-устройство подают зондирующий сигнал, частоту которого изменяют в заданном частотном диапазоне. При помощи 6-портового измерительного рефлектометра выделяют 4 комбинации зондирующего и отраженного от исследуемого устройства сигналов, после чего складывают их с опорным сигналом, фаза которого зависит от частоты зондирующего сигнала. Выделяют амплитуды переменных составляющих четырех полученных сумм сигналов, после чего, используя их в качестве информационных сигналов 6-портового рефлектометра, рассчитывают коэффициент отражения от исследуемого устройства в заданном диапазоне частот.

B1

033772

033772
B1

Область техники

Изобретение относится к способам измерения электрических характеристик, а именно к способам измерения параметров СВЧ-устройств, и может быть использовано для измерения коэффициента отражения СВЧ-устройств, работающих в нелинейном режиме.

Предшествующий уровень техники

Широко известны измерительные устройства для измерения коэффициентов отражения и передачи, наиболее распространенными из которых являются векторные анализаторы цепи (ВАЦ). В конструкции стандартного ВАЦ реализован способ измерения коэффициентов отражения и передачи, основанный на возбуждении исследуемых объектов СВЧ-сигналами (падающими волнами), выделение прошедших через исследуемый объект и отраженных от исследуемого объекта сигналов (прошедших и отраженных волн) с использованием измерительных приемников и измерение отношений амплитуд выделенных волн для расчета коэффициентов отражения и передачи исследуемого объекта [Understanding the Fundamental Principles of Vector Network Analysis. ApplicationNote/ Agilent Technologies, Inc., 2012]. Наиболее современные из ВАЦ обладают высокой чувствительностью и высокой точностью измерения, а также работают в широчайшем диапазоне частот.

Недостатком известного способа измерения S-параметров, реализованного в известных измерительных устройствах, является невозможность его применения в режиме большого сигнала, который является наиболее актуальным при измерении параметров СВЧ-устройств, работающих в нелинейном режиме (например, многие транзисторные усилители мощности СВЧ переходят в нелинейный режим работы только при повышении уровня входного сигнала и переходе транзистора в режим насыщения). Максимально достижимый для описанных способов уровень сигнала, подаваемого на исследуемый объект, составляет 20-23 дБм [Keysight Technologies. Network Analyzer Selection Guide, <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-7603EN.pdf>].

Известен способ измерения параметров СВЧ-устройств в режиме большого сигнала на основе метода полигармонической дисторсии, описанного, например, в [David E. Root, JanVerspecht, David Sharrit, JohnWood, Alex Cognata. Broad-Band Poly-Harmonic Distortion (PHD) Behavioral Models From Fast Automated Simulations and Large-Signal Vectorial Network Measurements/ IEEE Transactions on microwave theory and techniques, Vol. 53, No. 11, November 2005, p. 3656-3664]. Данный способ основан на измерении множества параметров исследуемого объекта, описывающих линейное и нелинейное поведение, построении модели поведения исследуемого объекта и восстановления из данной модели коэффициентов отражения и передачи исследуемого объекта. Такой метод обеспечивает возможность задания высоких уровней сигналов, подаваемых на исследуемые СВЧ-устройства, возможность частотной селекции откликов исследуемых СВЧ-устройств, и на основании этого позволяет создавать измерительные системы для анализа как линейных, так и нелинейных СВЧ-устройств. Указанный способ лежит в основе многих современных измерительных систем. В частности, указанный способ измерения реализуется при измерении X-параметров [D.E. Root, J. Horn, L. Betts, C. Gillease, J. Verspecht, "X-parameters: The new paradigm for measurement, modeling, and design of nonlinear RF and microwave components", Microwave Engineering Europe, December 2008, p. 16-21] в ряде ВАЦ компании Keysight [Keysight Technologies. Network Analyzer Selection Guide, <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-7603EN.pdf>].

Недостатком известного способа является его сложность, обусловленная чрезвычайной трудоемкостью и избыточностью метода полигармонической дисторсии для измерения коэффициентов отражения и передачи. В частности, для реализации известного метода необходимы ВАЦ по крайней мере с двумя встроенными генераторами и с доступом к приемникам.

Известен интерферометрический способ измерения комплексных коэффициентов отражения и передачи, основанный на возбуждении исследуемых объектов СВЧ-сигналами (падающими волнами), выделение четырех линейно независимых комбинаций падающих на исследуемый объект и отраженных от исследуемого объекта (прошедших через исследуемый объект) сигналов (падающих и отраженных (прошедших) волн) с использованием измерительных 6-портовых рефлектометров и расчет комплексных коэффициентов отражения и передачи исследуемого объекта на основании их значений. Указанный способ также лежит в основе многих современных измерительных систем. В частности, указанный способ измерения реализуется в интеллектуальном анализаторе СВЧ-цепей [Кудрявцев А.М. Интеллектуальный анализатор СВЧ-цепей и антенн/ А.М. Кудрявцев, С.М. Никулин. Учеб. пособие. - Н. Новгород: НГТУ, 2005, ISBN 5-93272-312-2, с. 17]. Такой способ, реализованный, например, в указанном анализаторе СВЧ-цепей, позволяет подавать на исследуемые СВЧ-устройства большие уровни сигналов, достаточные для обеспечения нелинейного режима их работы.

Недостатком известного способа, выбранного в качестве ближайшего аналога, является невозможность выделения высших гармонических составляющих на фоне основного тона и других гармонических составляющих в отраженных от исследуемых СВЧ-устройств сигналах, т.е. невозможность частотной селекции сигналов. Это обуславливает невозможность применения известного способа для анализа поведения СВЧ-устройств, работающих в нелинейном режиме.

Раскрытие изобретения

Задачей настоящего изобретения является разработка интерферометрического способа измерения

коэффициента отражения СВЧ-устройств, работающих в нелинейном режиме, с использованием 6-портовых измерительных рефлектометров.

Технический результат заключается в возможности отдельного анализа СВЧ-устройств на частоте основного тона и на частотах высших гармоник сигнала, подаваемого на их вход, за счет возможности частотной селекции отраженных от исследуемых СВЧ-устройств сигналов с использованием 6-портовых измерительных рефлектометров.

Заявленный технический результат достигается за счет того, что предложен интерферометрический способ измерения коэффициента отражения, заключающийся в том, что

исследуемое устройство подключают к порту подключения исследуемого устройства 6-портового измерительного рефлектометра;

формируют зондирующий сигнал с изменяющейся в заданном диапазоне частотой и подают сформированный зондирующий сигнал на порт зондирующего сигнала 6-портового измерительного рефлектометра и на вход исследуемого устройства;

отраженный от исследуемого устройства сигнал подают на порт подключения исследуемого устройства 6-портового измерительного рефлектометра,

формируют с использованием 6-портового измерительного рефлектометра четыре информационных сигнала;

детектируют сформированные информационные сигналы;

рассчитывают коэффициент отражения от исследуемого устройства на основе значений протектированных сигналов,

при этом дополнительно формируют опорный сигнал на частоте, соответствующей частоте зондирующего сигнала или частоте одной из его высших гармоник;

формируют опорный сигнал с изменяемой фазой путем изменения фазы сформированного опорного сигнала в зависимости от частоты зондирующего сигнала;

каждый информационный сигнал формируют путем сложения опорного сигнала с изменяемой фазой и одной из четырех линейно независимых комбинаций подаваемого на вход исследуемого устройства и отраженного от исследуемого устройства сигналов, снимаемой с одного из четырех портов информационных сигналов 6-портового измерительного рефлектометра.

Расчет коэффициента отражения от исследуемого устройства может включать построение зависимостей каждого из четырех информационных сигналов 6-портового измерительного рефлектометра от частоты в диапазоне частот анализа исследуемого устройства, выделение зависимостей амплитуд переменных составляющих зависимостей каждого из четырех информационных сигналов 6-портового измерительного рефлектометра от частоты и использование выделенных зависимостей в качестве информационных сигналов 6-портового измерительного рефлектометра для вычисления коэффициента отражения от исследуемого устройства.

Краткое описание чертежей

На прилагаемых чертежах приведены структурные схемы примеров аппаратной реализации предлагаемого способа.

На фиг. 1 приведена структурная схема примера аппаратной реализации предлагаемого способа, когда опорный сигнал формируют отдельно и подают уже сформированным на порт опорного сигнала.

На фиг. 2 приведена структурная схема примера аппаратной реализации предлагаемого способа, когда в качестве опорного сигнала используют часть зондирующего сигнала, отобранного в тракте подачи сигнала на вход зондирующего сигнала 6-портового измерительного рефлектометра (между портом зондирующего сигнала 2 и соответствующим входом рефлектометра 1).

На фиг. 3 приведена структурная схема примера аппаратной реализации предлагаемого способа, когда в качестве опорного сигнала используют часть зондирующего сигнала, отобранного в тракте подачи сигнала на вход зондирующего сигнала 6-портового измерительного рефлектометра (между портом зондирующего сигнала 2 и соответствующим входом рефлектометра 1), прошедшая через умножитель частоты в целях задания частоты опорного сигнала равной частоте одной из высших гармоник зондирующего сигнала.

Осуществление изобретения

Заявленный способ в общем случае реализуют следующим образом.

Для измерения коэффициента отражения исследуемого объекта используют 6-портовый измерительный рефлектометр. В общем случае 6-портовый измерительный рефлектометр содержит порт зондирующего сигнала, порт подключения исследуемого устройства и 4 порта информационных сигналов.

Формируют зондирующий сигнал с частотой, перестраиваемой с заданным шагом перестройки в заданном диапазоне частот анализа исследуемого СВЧ-устройства, и подают его на порт зондирующего сигнала 6-портового измерительного рефлектометра. Формируют опорный сигнал и подают его через фазовращатель в виде опорного сигнала с изменяемой фазой на порт опорного сигнала, причем набега фазы опорного сигнала с изменяемой фазой должен зависеть от частоты самого опорного сигнала (предпочтительна линейная зависимость набега фазы от частоты). Частоту опорного сигнала устанавливают соответствующей частоте зондирующего сигнала либо частоте одной из высших гармоник зондирующе-

го сигнала, т.е. формируют опорный сигнал, частота которого зависит по времени от указанных характеристик зондирующего сигнала. При этом при необходимости используют дополнительные широко известные в радиотехнике устройства, обеспечивающие требуемые уровни зондирующего и опорного сигналов, например усилители сигналов, аттенюаторы и др.

На четырех информационных портах 6-портового измерительного рефлектометра формируют сигналы, представляющие собой четыре линейно независимые комбинации подаваемого на вход исследуемого устройства и отраженного от исследуемого устройства сигналов (волн). Формируют четыре информационных сигнала путем сложения сигналов, снимаемых с информационных портов 6-портового измерительного рефлектометра, и опорного сигнала с изменяемой фазой.

Проводят калибровку 6-портового рефлектометра совместно с дополнительными аппаратными средствами в плоскости подключения исследуемого СВЧ-устройства любым известным способом. После окончания калибровки исследуемое устройство подключают к порту подключения исследуемого устройства 6-портового измерительного рефлектометра.

После этого проводят измерения в соответствии с интерферометрическим способом измерения коэффициента отражения, являющимся предметом настоящего изобретения, для чего выполняют следующие действия.

1. Устанавливают частоту опорного сигнала в соответствии с выбранным режимом измерения; например

для выделения и анализа отклика исследуемого устройства на частоте основного тона зондирующего сигнала частоту опорного сигнала устанавливают равной частоте зондирующего сигнала;

для выделения и анализа отклика исследуемого устройства на частоте одной из высших гармоник зондирующего сигнала частоту опорного сигнала устанавливают равной частоте соответствующей гармоники зондирующего сигнала.

2. Подают зондирующий сигнал на порт зондирующего сигнала 6-портового измерительного рефлектометра и на вход исследуемого устройства.

3. Подают отраженный от исследуемого устройства сигнал на порт подключения исследуемого устройства 6-портового измерительного рефлектометра.

4. При помощи 6-портового измерительного рефлектометра выделяют четыре комбинации зондирующего и отраженного от исследуемого устройства сигналов.

5. Формируют информационные сигналы путем суммирования каждой из четырех комбинаций зондирующего и отраженного от исследуемого устройства сигналов с опорным сигналом с изменяемой фазой.

6. Повторяют операции по пп.1-5 для всех частот заданного диапазона частот анализа исследуемого устройства с заданным шагом перестройки частоты.

7. Детектируют сформированные информационные сигналы в заданном диапазоне частот анализа исследуемого устройства при помощи детекторов, например при помощи диодных детекторов мощности СВЧ. При этом указанные детекторы мощности в общем случае содержат детектирующие элементы с нелинейной вольт-амперной характеристикой (например, диоды) и фильтры нижних частот (ФНЧ).

8. Рассчитывают коэффициент отражения от исследуемого устройства на основе значений протектированных сигналов, при этом:

а) строят зависимости значений каждого из четырех протектированных информационных сигналов от частоты в заданном диапазоне частот анализа исследуемого устройства, имеющие вид приподнятой меняющейся функции, а в случае линейной зависимости набега фазы опорного сигнала от частоты в фазовращателе - гармонической функции. При этом постоянная составляющая полученной зависимости является медленной функцией частоты, а переменная составляющая (в случае линейной зависимости набега фазы опорного сигнала от частоты в фазовращателе - гармоническая) является быстрой функцией частоты;

б) строят зависимости амплитуд переменных составляющих каждого из четырех информационных сигналов от частоты в заданном диапазоне частот анализа исследуемого устройства;

в) используя полученные зависимости амплитуд переменных составляющих от частоты в качестве информационных сигналов 6-портового рефлектометра, рассчитывают коэффициент отражения от исследуемого устройства в заданном режиме (на частоте основного тона зондирующего сигнала либо частоте одной из его высших гармоник) в заданном диапазоне частот анализа исследуемого устройства по известным формулам расчета коэффициента отражения при проведении измерения 6-портовым рефлектометром, описанным, например, в [Fadhel M. Ghannouchi, Abbas Mohammadi. The six-port technique with microwave and wireless applications// Artech house, Norwood, MA, USA, 2009. ISBN-13: 978-1-60807-033-6].

Рассчитанный по п.8 коэффициент отражения от исследуемого СВЧ-устройства будет содержать только одну компоненту, описывающую отношение уровней отраженного сигнала на выбранной частоте (отраженной волны на выбранной частоте) и зондирующего сигнала (падающей волны). Это обеспечивается эффектом перемножения сигналов при подаче суммы двух сигналов на элемент с нелинейной вольт-амперной характеристикой (например, на диод в диодном детекторе мощности СВЧ, вольт-амперная характеристика которого имеет вид квадратичной функции) и последующем выделении низкочастотной

составляющей результата перемножения фильтром нижних частот, используемом в детекторах мощности СВЧ [Устройства приема и обработки сигналов: учеб. пособие. Кн. 1/ Под ред. С.Б. Макарова и С.А. Подлесного. - Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004, ISBN 5-7636-0314-1, с. 71]:

при задании частоты опорного сигнала, равной частоте зондирующего сигнала, только комбинация опорного сигнала и основного тона отраженного от исследуемого устройства сигнала приведет к возникновению составляющей сигнала на несущей частоте, равной нулю, которая пройдет через ФНЧ детектора мощности СВЧ, в то время как комбинации сигналов с участием других составляющих отраженного от исследуемого устройства сигнала не приведут к возникновению составляющих на нулевой несущей частоте и потому будут отфильтрованы ФНЧ;

при задании частоты опорного сигнала, равной частоте одной из высших гармоник зондирующего сигнала, только комбинация опорного сигнала и заданной высшей гармоники отраженного от исследуемого устройства сигнала приведет к возникновению составляющей сигнала на несущей частоте, равной нулю, которая пройдет через ФНЧ, в то время как комбинации сигналов с участием других составляющих отраженного от исследуемого устройства сигнала не приведут к возникновению составляющих на нулевой несущей частоте и потому будут отфильтрованы ФНЧ.

Далее указанный эффект поясняется с помощью формул, в которых

$u_{СИГН}$ - зондирующий сигнал;

f_0 - частота зондирующего сигнала;

$u_{ОП}$ - опорный сигнал;

$f_{ОП} - kf_0$ - частота опорного сигнала;

где $k=1$ для анализа исследуемого СВЧ-устройства на частоте основного тона зондирующего сигнала;

$k=2, 3, \dots$ для анализа исследуемого СВЧ-устройства на частоте соответственно второй, третьей и так далее гармоник зондирующего сигнала;

$u_{ПЧ}$ - сигнал на выходе элемента с квадратичной вольт-амперной характеристикой (диода) в детекторе;

$u_{НЧ}$ - низкочастотный сигнал на выходе детектора мощности СВЧ (продетектированный сигнал);

$U_{ОП}$ - амплитуда опорного сигнала;

$U_{СИГН}$ - амплитуда зондирующего сигнала;

$U_{ОТР}$ - сигнал, отраженный от исследуемого устройства.

На элемент с нелинейной вольт-амперной характеристикой детектора мощности (диод диодного детектора мощности) подаются сумма двух сигналов, которая после попадания на квадратичный участок вольт-амперной характеристики диода порождает новые составляющие:

$$(u_{ОП} + u_{СИГН})^2 = (u_{ОП})^2 + 2u_{ОП}^{(k)}u_{СИГН} + u_{СИГН}^2.$$

Очевидно, что все вновь созданные составляющие сигнала на выходе диода будут находиться на частотах $f_0, 2f_0, 3f_0, \dots, 2nf_0$, где n - общее число гармоник в отраженном от исследуемого устройства сигнале, а также на нулевой несущей частоте $f_{ОП} - kf_0=0$:

$$u_{ПЧ}(f) = u_{ПЧ}(0) + u_{ПЧ}(f_0) + u_{ПЧ}(2f_0) + u_{ПЧ}(3f_0) + \dots + u_{ПЧ}(2nf_0).$$

После попадания сигнала $u_{ПЧ}$ на фильтр нижних частот детектора высокочастотная составляющая сигнала $u_{ПЧ}$ оказывается отфильтрована, и в выходном сигнале детектора оказывается только низкочастотная составляющая на нулевой несущей частоте:

$$u_{НЧ}(f) = u_{ПЧ}(0) = 2U_{ОП}U_{СИГН}(kf_0) \cos \varphi + U_0,$$

где $U_{СИГН}(kf_0)$ - амплитуда k -й гармоники $u_{ОТР}$;

$\cos \mu$ - множитель, возникающий в результате прохождения опорного сигнала через фазовращатель при линейной зависимости набега фазы сигнала в фазовращателе от частоты сигнала;

U_0 - составляющая, возникающая в результате проникновения на выход детектора других "паразитных" составляющих сигнала.

Амплитуду $2U_{ОП} U_{СИГН}(kf_0)$ переменной составляющей в сигнале $u_{НЧ}(f)$ используют в качестве информационных сигналов 6-портового рефлектометра для расчета коэффициента отражения от исследуемого устройства на выбранной частоте (частоте основного тона зондирующего сигнала либо частоте одной из его высших гармоник) в заданном частотном диапазоне по известным формулам расчета коэффициента отражения при проведении измерения 6-портовым рефлектометром, описанным, например, в [Fadhel M. Ghannouchi, Abbas Mohammadi. The six-port technique with microwave and wireless applications// Artech house, Norwood, MA, USA, 2009. ISBN-13: 978-1-60807-033-6].

В качестве рефлектометра в предлагаемом изобретении может использоваться 6-портовый измерительный рефлектометр любой конструкции, например, один из описанных в [Fadhel M. Ghannouchi, Abbas Mohammadi. The six-port technique with microwave and wireless applications// Artech house, Norwood, MA, USA, 2009. ISBN-13: 978-1-60807-033-6]. Для формирования суммы опорного сигнала с изменяемой фазой и каждой из сформированных четырех линейно независимых комбинаций подаваемого на вход исследуемого устройства и отраженного от исследуемого устройства сигналов в качестве сумматоров может использоваться любой вид сумматоров известной конструкции, например развязанный делитель

мощности [Фуско В. СВЧ-цепи. Анализ и автоматизированное проектирование: пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1990, с. 269].

В качестве фазовращателя используют любое известное устройство, обеспечивающее перестройку фазы проходящего через него сигнала в зависимости от частоты. Целесообразно в качестве фазовращателя использовать отрезок длинной линии (коаксиального кабеля), фиксированной длины, набег фазы в котором линейно зависит от частоты сигнала.

В качестве детекторов могут быть использованы детекторы любой конструкции, например диодные детекторы мощности СВЧ [<http://www.ngpedia.ru/id664446p1.html>].

В приведенном ниже примере представлен один из возможных вариантов осуществления изобретения.

Пример.

Измеряли коэффициент отражения транзистора в контактном устройстве.

В качестве 6-портового рефлектометра (1) для проведения измерений выбрали "квази-оптимальный" 6-портовый рефлектометр [Fadhel M. Ghannouchi, Abbas Mohammadi. The six-port technique with microwave and wireless applications// Artech house, Norwood, MA, USA, 2009. ISBN-13: 978-1-60807-033-6, p. 51], выполненный в коаксиальном тракте. Блок-схема аппаратного устройства с использованием 6-портового рефлектометра (1) приведена на фиг. 1. Также на фиг. 1 изображены:

(2) - порт зондирующего сигнала 6-портового рефлектометра;

(3) - порт опорного сигнала;

(4) - фазовращатель, а именно отрезок коаксиального кабеля, длина которого выбрана равной двум длинам волн на нижней частоте заданного частотного диапазона перестройки зондирующего сигнала для анализа транзистора в контактном устройстве;

(5), (6), (7), (8) - сумматоры;

(9), (10), (11), (12) - порты информационных сигналов 6-портового рефлектометра;

(13) - порт подключения исследуемого устройства 6-портового рефлектометра.

На порт зондирующего сигнала (2) подали монохромный зондирующий сигнал с изменяющейся в заданном диапазоне частотой (например, 800-1000 МГц) с заданным шагом перестройки частоты (1 МГц). Для анализа транзистора в контактном устройстве на частоте основного тона на порт опорного сигнала (3) подали опорный сигнал с частотой, равной частоте зондирующего сигнала и изменяющейся в заданном диапазоне частот синхронно с изменением частоты зондирующего сигнала. Для анализа транзистора в контактном устройстве на частоте k -й гармоники отраженного от транзистора сигнала на порт опорного сигнала (3) подали опорный сигнал, частоту которого задали равной частоте k -й гармоники зондирующего сигнала и перестраивают в диапазоне частот синхронно с перестройкой частоты зондирующего сигнала.

Для уменьшения числа генераторов сигналов при анализе исследуемого транзистора в контактном устройстве на частоте основного тона зондирующего сигнала, когда частоту опорного сигнала выбирают равной частоте зондирующего сигнала, вместо порта опорного сигнала (3) для подачи опорного сигнала через отрезок коаксиального кабеля (4) к сумматорам (5), (6), (7), (8) может использоваться направленный ответвитель (14), как это показано на фиг. 2.

При анализе исследуемого транзистора в контактном устройстве на частоте k -й гармоники отраженного от транзистора сигнала, когда частоту опорного сигнала выбирают равной частоте k -й гармоники зондирующего сигнала, вместо порта опорного сигнала (3) для подачи опорного сигнала через отрезок коаксиального кабеля (4) к сумматорам (5), (6), (7), (8) может использоваться направленный ответвитель (14) совместно с умножителем частоты (15), как это показано на фиг. 3. В этом случае, на выходе умножителя частоты (15) частота сигнала равна частоте k -й гармоники сигнала с выхода направленного ответвителя (14).

Провели калибровку 6-портового измерительного рефлектометра (1) в плоскости порта подключения (13) одним из известных методов, например, описанных в [Fadhel M. Ghannouchi, Abbas Mohammadi. The six-port technique with microwave and wireless applications// Artech house, Norwood, MA, USA, 2009. ISBN-13: 978-1-60807-033-6].

После этого к порту (13) подключили вход контактного устройства с установленным в нем транзистором, к выходу контактного устройства подключили согласованную нагрузку, подали на транзистор питание, обеспечивающее нужный режим работы транзистора, и в соответствии с настоящим изобретением на каждой частоте заданного диапазона частот сформировали четыре информационных сигнала, представляющих собой суммы прошедшего через фазовращатель (отрезок коаксиального кабеля) опорного сигнала и каждой из четырех комбинаций зондирующего и отраженного от исследуемого устройства сигналов, полученных при помощи 6-портового измерительного рефлектометра (1).

Сформированные информационные сигналы протестировали при помощи четырех диодных детекторов мощности СВЧ, построили зависимости значений протестированных комбинаций сигналов от частоты в заданном частотном диапазоне, после чего выделили зависимости амплитуды их переменных составляющих от частоты и, используя их в качестве информационных сигналов 6-портового рефлектометра, рассчитали коэффициент отражения от исследуемого устройства с использованием извест-

ных формул, описанных, например, в [Fadhel M. Ghannouchi, Abbas Mohammadi. The six-port technique with microwave and wireless applications// Artech house, Norwood, MA, USA, 2009. ISBN-13: 978-1-60807-033-6].

Промышленная применимость

Практическая реализация заявленного способа, как это было показано в примере, описанном выше, является очевидной задачей для среднего специалиста, и не требует построения сложных радиотехнических схем.

При необходимости при разработке системы, реализующей предложенный способ, для лучшего обеспечения заявленной функциональности возможно использование дополнительных блоков, не изменяющих функциональность разрабатываемой системы, например дополнительных развязывающих устройств - вентилей и др. Кроме того, для обеспечения требуемых уровней сигналов при разработке системы, реализующей предложенный способ, могут быть дополнительно использованы устройства управления уровнями сигналов, например аттенюаторы.

Таким образом, предложен интерферометрический способ измерения коэффициента отражения с использованием 6-портовых измерительных рефлектометров, обеспечивающий возможность частотной селекции сигналов, отраженных от работающих в нелинейном режиме СВЧ-устройств, для отдельного анализа исследуемого СВЧ-устройства на частоте основного тона и на частотах высших гармоник сигнала, подаваемого на вход исследуемого СВЧ-устройства.

Предложенный способ может быть адаптирован для измерения коэффициента передачи исследуемого СВЧ-устройства за счет соответствующего включения устройства, реализующего заявленный способ, в схему измерения аналогично тому, как это описано, например, в [Six-port measurement technique: principles, impact, applications/ Vladimir Bilik, Slovak University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Bratislava, Slovakia, <http://www.s-team.sk/download/SixPortTechnique.pdf>, с. 10-11]. В указанном примере использование двух устройств, реализующих интерферометрический способ измерения коэффициента отражения, позволяет измерять и коэффициенты отражения, и коэффициенты передачи исследуемого устройства.

Дополнительным техническим результатом предлагаемого изобретения является повышение чувствительности измерительного многополюсного рефлектометра за счет подачи на диодные преобразователи (детекторы) суммы двух сигналов (информационного и опорного), что аналогично принципу работы смесителей. Эффект повышения чувствительности при добавлении смесителей в тракт обработки сигналов является известным эффектом, используемым при построении различных радиотехнических систем, и продемонстрирован, например, в [Нойкин Ю.М., Нойкина Т.К., Усаев А.А. Полупроводниковые приборы СВЧ/ Учеб. пособие. - Ростов-на-Дону: ФГАОУ ВО Южный Федеральный Университет, 2014].

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Интерферометрический способ измерения коэффициента отражения СВЧ-устройства, заключающийся в том, что

исследуемое устройство подключают к порту подключения исследуемого устройства 6-портового измерительного рефлектометра;

формируют зондирующий сигнал с изменяющейся в заданном диапазоне частотой и подают сформированный зондирующий сигнал на порт зондирующего сигнала 6-портового измерительного рефлектометра и на вход исследуемого устройства;

отраженный от исследуемого устройства сигнал подают на порт подключения исследуемого устройства 6-портового измерительного рефлектометра;

формируют с использованием 6-портового измерительного рефлектометра четыре информационных сигнала;

детектируют сформированные информационные сигналы;

рассчитывают коэффициент отражения от исследуемого устройства на основе значений протектированных сигналов,

отличающийся тем, что

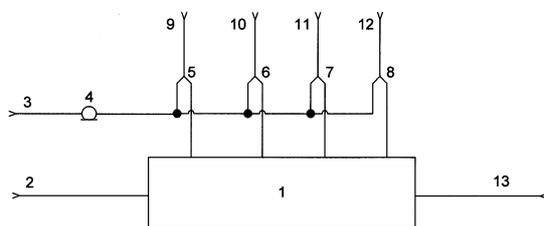
дополнительно формируют опорный сигнал на частоте, соответствующей частоте зондирующего сигнала или частоте одной из его высших гармоник;

формируют опорный сигнал с изменяемой фазой путем изменения фазы сформированного опорного сигнала в зависимости от частоты зондирующего сигнала;

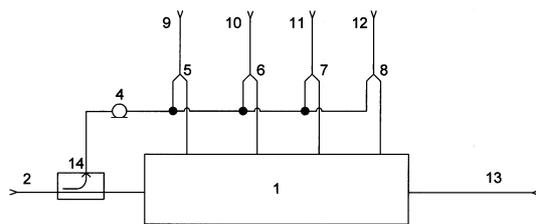
каждый информационный сигнал формируют путем сложения опорного сигнала с изменяемой фазой и одной из четырех линейно независимых комбинаций подаваемого на вход исследуемого устройства и отраженного от исследуемого устройства сигналов, снимаемой с одного из четырех портов информационных сигналов 6-портового измерительного рефлектометра.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что расчет коэффициента отражения от исследуемого устройства включает построение зависимостей каждого из четырех информационных сигналов 6-портового измерительного рефлектометра от частоты в диапазоне частот анализа исследуемого устройства, выде-

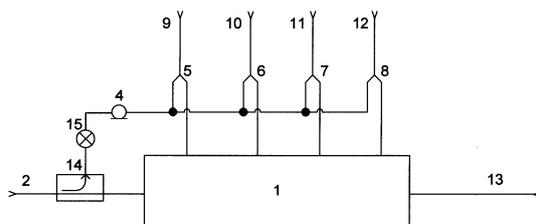
ление зависимостей амплитуд переменных составляющих зависимостей каждого из четырех информационных сигналов 6-портового измерительного рефлектометра от частоты и использование выделенных зависимостей в качестве информационных сигналов 6-портового измерительного рефлектометра для вычисления коэффициента отражения от исследуемого устройства.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

