

# Измерительные системы Maury Microwave для анализа и проектирования СВЧ-устройств

Елена Кириленко, Maury Microwave

Рассматриваемые в статье автоматизированные измерительные системы позволяют в полной мере охарактеризовать исследуемые СВЧ-устройства для последующих этапов моделирования и проектирования. Применение данных систем возможно как для измерений компонентов на полупроводниковых пластинах, так и для корпусированных устройств.

В настоящее время производители СВЧ-транзисторов и разработчики усилителей мощности нуждаются, в первую очередь, в качественных автоматизированных измерительных системах, позволяющих получать полную информацию об исследуемом устройстве для последующих этапов моделирования и проектирования.

В данной статье рассмотрены измерительные системы, применение которых возможно как на уровне развития полупроводниковой технологии (GaN, GaAs), так и на этапе проектирования модулей радиоэлектронных систем. А именно, будут рассмотрены следующие системы:

- система PIV – система подачи питания и измерения напряжений и токов на входе и выходе электронного компонента в импульсном режиме;
- система измерений характеристик цепей по мощности с применением импедансных тюнеров;
- система измерений X-параметров;
- система измерений коэффициента шума и шумовых параметров.

Далее рассмотрим подробнее каждую из перечисленных систем.

## СИСТЕМА СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ВAX И S-ПАРАМЕТРОВ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

На первых этапах характеристики СВЧ-транзистора измерения вольт-амперных характеристик (ВAX) в импульсном режиме являются очень важными, как и синхронизированные измерения S-параметров и ВAX в постоянном и импульсном режимах. Измерения в импульсном режиме позволяют исключить эффект саморазогрева кристалла и эффекты захвата носителей заряда на ловушках, позволяя в дальнейшем проводить экстракцию эквивалентной модели устройства в квази-изотермических условиях как в линейной, так и в нелинейной областях [1].

Система, позволяющая осуществить такие измерения, была разработана Maury Microwave совместно с AMCAD

Engineering. Данная система, представленная на рисунке 1, основывается на использовании векторного анализатора цепей и системы импульсной подачи питания и измерений PIV Amcad.

## СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ С ПЕРЕМЕННЫМИ ИМПЕДАНСАМИ LOAD PULL

Измерения Load Pull – это измерения мощностных характеристик СВЧ-транзистора при различных нагрузках на его входе и выходе, которые реализуются с помощью автоматизированных тюнеров Maury Microwave. Целью измерений является определение оптимальных значений входного и выходного импедансов для последующего проектирования согласующих цепей. Результаты измерений могут использоваться для утверждения и доводки компактных моделей, а также для проектирования усилителей мощности [2].

Речь идёт о системе измерений Load Pull с векторными приёмниками (см. рис. 2). В данной системе измерения проводятся в реальном времени и в опорной плоскости тестируемого устройства. Вместо параметров мощности измеряются реальные сигналы тестируемого устройства, позволяя анализировать более полный набор параметров. Эти параметры включают:

- входной импеданс в режиме большого сигнала, который использует-

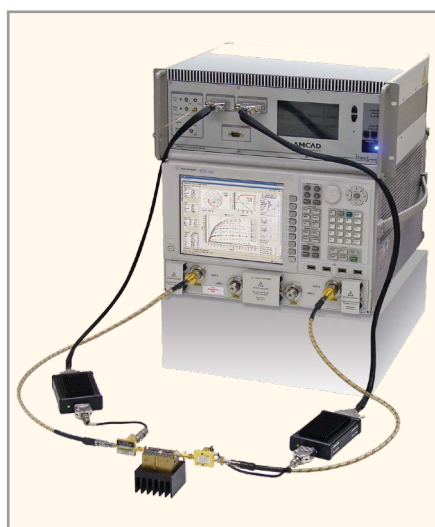


Рис. 1. Импульсная система PIV Amcad

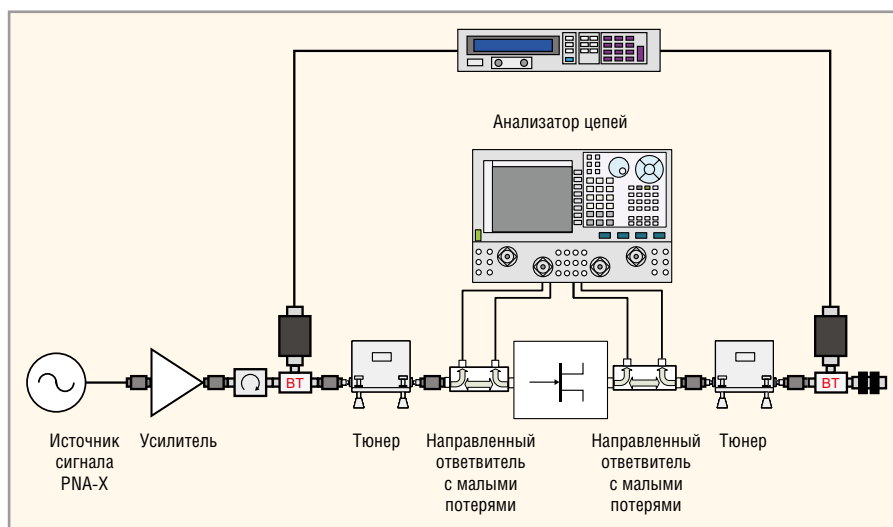


Рис. 2. Схема измерительной установки с переменными импедансами Load Pull

ся для определения мощности сигнала, поступающего на вход;

- коэффициент усиления по мощности и КПД;
- коэффициент преобразования амплитудной модуляции в фазовую (AM-PM);
- параметры гармоник.

### СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ X-ПАРАМЕТРОВ

X-параметры – товарный знак компании Keysight Technologies, Inc. Формат и уравнения, лежащие в основе X-параметров, являются открытыми и задокументированными. При разработке нелинейных устройств и схем, работающих в режиме большого сигнала, таких как сложные усилители мощности, включая многокаскадные схемы и схемы усилителей Догерти, всё чаще используются X-параметры, нежели S-параметры. В отличие от S-параметров, X-параметры содержат важную детальную информацию, которая включает амплитуды и фазы побочных спектральных составляющих, генерируемых нелинейным компонентом при работе в режиме большого сигнала.

Опция X-параметров с произвольными импедансами нагрузки для нелинейного векторного анализа (NVNA) цепей на базе PNA-X компании Keysight Technologies (при совместном использовании с программным обеспечением и тюнерами компании Maury Microwave) позволяет измерять и моделировать нелинейное поведение компонентов как функцию импеданса, входной мощности, смещения и частоты – при всех импедансах нагрузки.

Это первое в отрасли техническое решение предоставляет инженерам следующие возможности:

- расширение возможности объединения X-параметров отдельных каскадов схемы для случаев произвольных больших рассогласований нагрузки;
- точное автоматизированное измерение и моделирование линейного и нелинейного поведения устройств по всей диаграмме Смита при различных нагрузках;
- моделирование устройств и разработка сложных многокаскадных схем усилителей, таких как усилители Догерти или другие, благодаря простоте перемещения объектов

в САПР Advanced Design System (ADS) или Microwave Office.

Используя новое техническое решение для измерения X-параметров (см. рис. 3), разработанное компаниями Keysight и Maury, можно улучшить точность моделирования, минимизировать число итераций проектирования и сократить общее время проектирования до 50% [1].

### СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ ШУМОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

Наиболее часто используемым измерением шума, добавленного устройством, является измерение коэффициента шума. Обычно коэффициент шума измеряется в 50-омном тракте и стремится оценить снижение отношения сигнал/шум, вызванного усилителем или преобразователем частоты. Однако с изменением импеданса источника, представленного на вход усилителя, коэффициент шума меняется. Таким образом, для полной характеристики устройства измерений лишь в 50-омном тракте недостаточно.

Изменения, связанные с импедансом источника, могут быть описаны

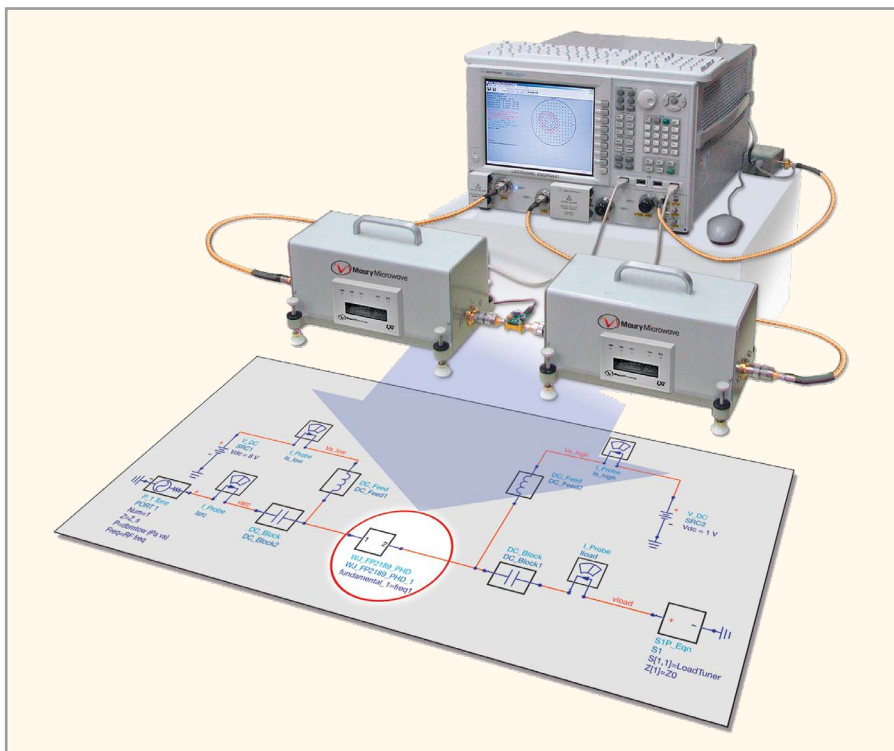


Рис. 3. Система измерений X-параметров

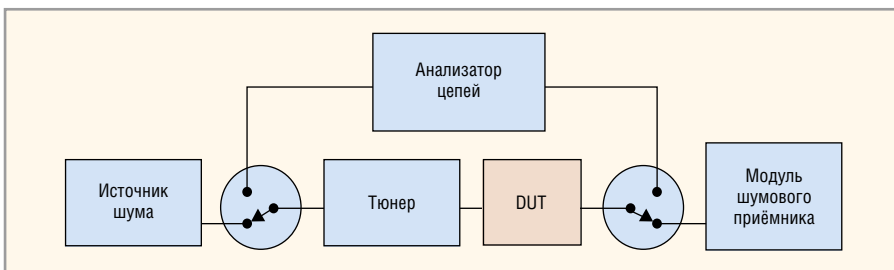


Рис. 4. Блоковая диаграмма традиционной системы измерений шумовых параметров

и представлены шумовыми параметрами [1]. Ключевым моментом является понимание шумовых параметров устройства, особенно в случае проектирования малошумящих усилителей на несогласованных транзисторах. Шумовые параметры включают в себя четыре отдельных элемента: минимальный коэффициент шума  $F_{min}$ ,  $\Gamma_{opt}$  – оптимальный импеданс (действительная и мнимая части), при котором достигается  $F_{min}$ , а также  $R_n$  – эквивалентное последовательное сопротивление транзистора. Теоретически любые четыре контролируемых импеданса источника ( $\Gamma_s$ ) могут быть представлены на вход устройства, и соответствующий коэффициент шума ( $F$ ) может быть измерен для решения системы четырёх уравнений с четырьмя неизвестными. На практике, выбранные импедансы  $\Gamma_s$  должны быть в пределах оптимальных импедансов  $\Gamma_{opt}$ . Корректный выбор импедансов становится критичным в случае не 50-омного входного импеданса:

$$F = F_{min} + \frac{4R_n}{Z_0} \frac{|\Gamma_s - \Gamma_{opt}|^2}{|1 + \Gamma_{opt}|^2 (1 - |\Gamma_s|^2)}$$

Векторный анализатор цепей серии N524x PNA-X компании Keysight Technologies – единственный инструмент данного типа, контролирующий электронный импедансный тюнер. Для инструментов N5241/42A используется внешний электронный калибратор ECal, а для N5244/45/47A – внутренний электронный тюнер. Встроенный тюнер, конечно же, может использоваться для представления импедансов, требуемых для решения системы уравнений шумовых параметров. Но он хорошо подходит лишь для 50-омных и близких к 50-омным устройствам. В случае не 50-омных применений для формирования представляемого устройству импеданса, близкого к  $\Gamma_{opt}$  PNA-X может использоваться с внешним автоматизированным тюнером Maury Microwave.

Векторный анализатор цепей Keysight PNA-X также является единственным

инструментом, сочетающим приёмники для измерения S-параметров с оптимизированным малошумящим приёмником. Чувствительность шумового приёмника критична при измерениях коэффициента шума, осуществляемых путём точного измерения распределения шумовой мощности тестируемого устройства. Точность шумовых измерений напрямую связана с коэффициентом шума самого шумового приёмника и, чем он меньше, тем лучше. Чувствительность шумового приёмника PNA-X достаточна для многочисленных применений и, в случае необходимости, может быть увеличена с помощью внешнего модуля шумового приёмника. Дополнительный внешний модуль шумового приёмника от Maury Microwave позволяет снизить коэффициент шума приёмника на 5–6 дБ.

Сочетание векторного анализатора цепей Keysight PNA-X, автоматизированного импедансного тюнера, модуля шумового приёмника, а также программного обеспечения ATS Maury, позволяет реализовать широкополосные измерения шумовых параметров в частотном диапазоне от нескольких мегагерц до 50 ГГц с улучшенной скоростью и точностью (см. рис. 4).

Keysight PNA-X в комбинации с тюнером Maury, приёмником, а также программным обеспечением, позволяет достичь высокоточных измерений коэффициента шума и шумовых параметров транзисторов миллиметрового диапазона.

Таким образом, описанные системы измерений импульсных ВАХ и S-параметров в совокупности с измерениями Load Pull, а также измерения X-параметров, позволяют в полной мере охарактеризовать СВЧ-транзисторы для последующих этапов экстракции высокоточных моделей и проектирования усилителей мощности. Системы являются законченными автоматизированными решениями и позволяют в значительной степени экономить время измерений и, соответственно, время всей разработки.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Maury Microwave Application notes. [www.maurymw.com/MW\\_RF/Application\\_Notes\\_Library.php](http://www.maurymw.com/MW_RF/Application_Notes_Library.php).
2. Gasseling T. Compact Transistor Models: The Roadmap to the First-Pass Amplifier Design Success. Microwave Journal. March 2012.
3. Amcad-Engineering: Load Pull Measurements. [www.amcad-engineering.com](http://www.amcad-engineering.com).

