Емельянов А.М., Крутов А.В., Ребров А.С.

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Особенности зондовых измерений коэффициента шума транзистора в миллиметровом диапазоне длин волн

Представлены сравнительные результаты методов измерения коэффициента шума малошумящего гетероструктурного транзистора миллиметрового диапазона. Приведены измеренные СВЧ параметры. Показана возможность упрощенного метода измерений с помощью синтезированных трансформаторов сопротивлений на этапе серийного производства в части измерения минимального коэффициента шума при финишных измерениях и входном контроле.

Ключевые слова: GaAs PHEMT транзистор, гетероструктура, коэффициент шума, трансформаторы сопротивлений.

При проектировании малошумящих усилителей разработчики используют в качестве исходных данных либо матрицу S-параметров и шумовую матрицу активного прибора, либо эквивалентную схему. Применение матрицы S-параметров приводит к некоторым неудобствам при проектировании; например, при оптимизации устройства в частотных точках, не входящих в диапазон справочных данных, требуется интерполяция S-параметров для обеспечения сходимости, либо восстановление эквивалентной схемы транзистора.

Существует несколько способов измерения шумовой матрицы транзисторов:

- прямое измерение минимального коэффициента шума и оптимальных нагрузок с помощью автоматизированных систем ATN (Automatic Tuner Network systems).
- мульти-импедансный метод, основанный на измерении мощности шума на выходе транзистора при различных значениях импеданса источника шума.
- измерение коэффициента шума в 50-омной линии с последующей математической обработкой.

Первые два метода отличаются достаточно сложной процедурой измерения и требуют прецизионной и дорогой специализированной аппаратуры, поэтому третий метод приобретает все большую популярность, особенно в условиях заводского производства [1].

При измерении параметров в миллиметровом диапазоне возникают дополнительные сложности, связанные с тем, что согласующие элементы физически не могут быть приближены к измеряемому объекту менее чем несколько длин волн. Это приводит к дополнительным переотражениям сигнала от измеряемого объекта и снижению точности измерений. Для устранения данного эффекта необходимо свести к минимуму расстояние между измеряемым объектом и согласующим элементом.

В данной работе представлены результаты измерений коэффициента шума малошумящего транзистора миллиметрового диапазона на PHEMT структурах с помощью ATN систем фирмы Maury и с помощью синтезированных трансформаторов сопротивлений. Представлены конструкция трансформаторов сопротивлений, технология изготовления, достигнутые параметры.

Измерения с помощью ATN систем фирмы Maury

Шумовые параметры включают четыре отдельных элемента: Fmin — минимальный коэффициент шума транзистора, Гopt — оптимальное значение импеданса (вещественная и мнимая части), при котором возникает Fmin и Rn — эквивалентное шумовое сопротивление транзистора. Теоретически любые четыре контролируемых импеданса Гs могут быть воспроизведены для устройства, и соответствующие значения коэффициента шума F измерены, чтобы решить систему из четырёх уравнений для четырёх неизвестных. На деле импедансы, выбранные для Гs, должны быть в области Гopt, и правильный выбор импеданса становится важным, если транзистор не согласован с 50-омным трактом [2].

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

Фотография ATN системы фирмы Maury приведена на Рис. 1.

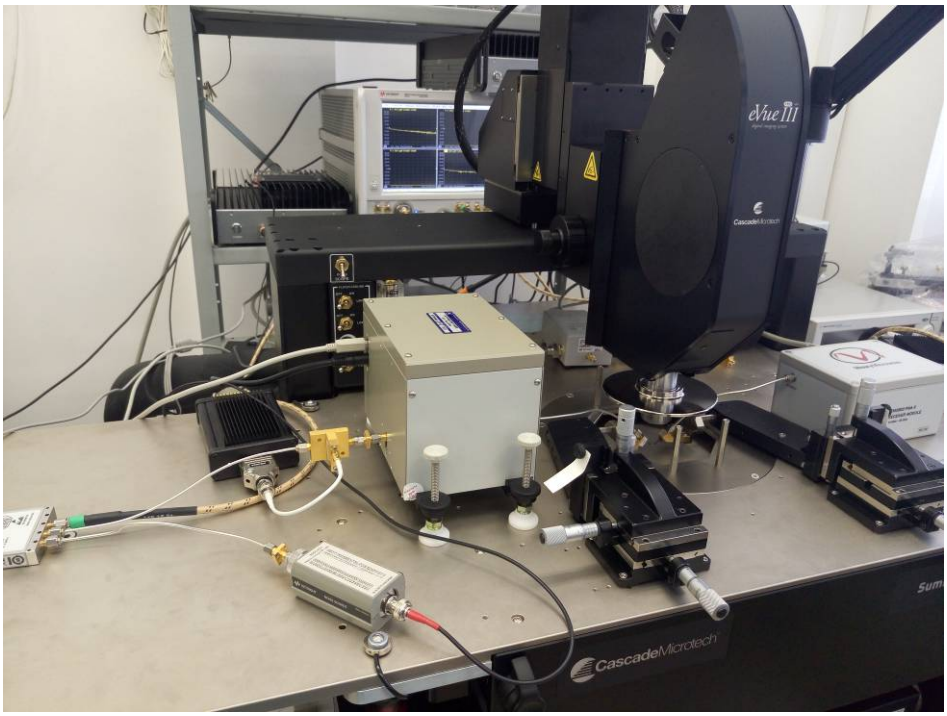

Рисунок 1

Анализатор цепей Keysight N5247A PNA-X использовался с внешним автоматическим тюнером импеданса MT984AU01 компании Maury, чтобы воспроизводить импедансы, близкие к Гopt транзистора. Анализаторы цепей серии PNA-X компании Keysight являются приборами, объединяющими приёмники для измерения S-параметров с малошумящим приёмником шума. Чувствительность приёмника шума PNA-X повышена за счёт использования внешнего модуля приёмника шума. Добавление внешнего модуля MT7553B02 компании Maury Microwave снизило коэффициент шума второго каскада до 5-6 дБ.

Комбинация анализатора цепей серии PNA-X компании Keysight, автоматического тюнера импеданса MT984AU01, модуля приёмника шума MT7553B02 и программного пакета серии MT993 для систем на основе автоматических тюнеров компании Maury позволила измерить шумовые параметры полосе частот до 50 ГГц с улучшенным быстродействием. Скорость проведения калибровки и измерений примерно в 300 раз выше

по сравнению с традиционным методом. Неопределенность измерений 0.01-0.04 дБ, в традиционном методе – 0.2-0.4 дБ.

Топология транзистора приведена на Рис.2.

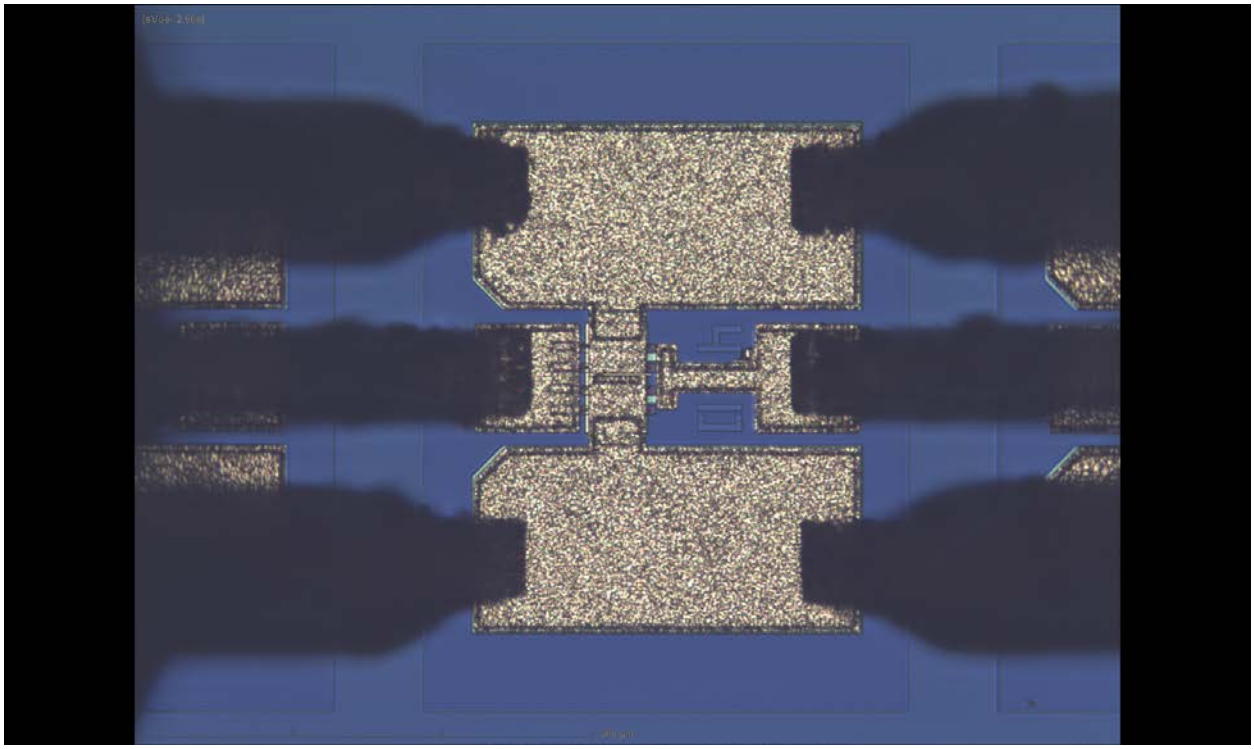

Рисунок 2

Ниже приводится измеренная шумовая матрица транзистора 3П3107.

Frequency GHz	Fmin dB	rn	Гopt Mag	Phase
30.00	1.4288	0.1942	0.6473	122.99
31.00	1.443	0.1993	0.6624	125.16
32.00	1.529	0.1958	0.6605	124.31
33.00	1.4894	0.1905	0.6575	127.12
34.00	1.5026	0.1746	0.6865	130.94
35.00	1.535	0.1765	0.6492	132.48
36.00	1.6063	0.1839	0.6456	132.29
37.00	1.5699	0.1923	0.5596	135.79
38.00	1.5932	0.1967	0.5836	135.02
39.00	1.6213	0.1617	0.6032	139.42
40.00	1.638	0.1436	0.5746	136.51

Измерения с помощью синтезированных трансформаторов сопротивлений.

Измерение параметров проводились на установке, фотография которой приведена на Рис. 3. Установка состоит из измерителя коэффициента шума NFA 8975A с опцией K40, зондового контактного устройства с системой подачи питания, источника питания.

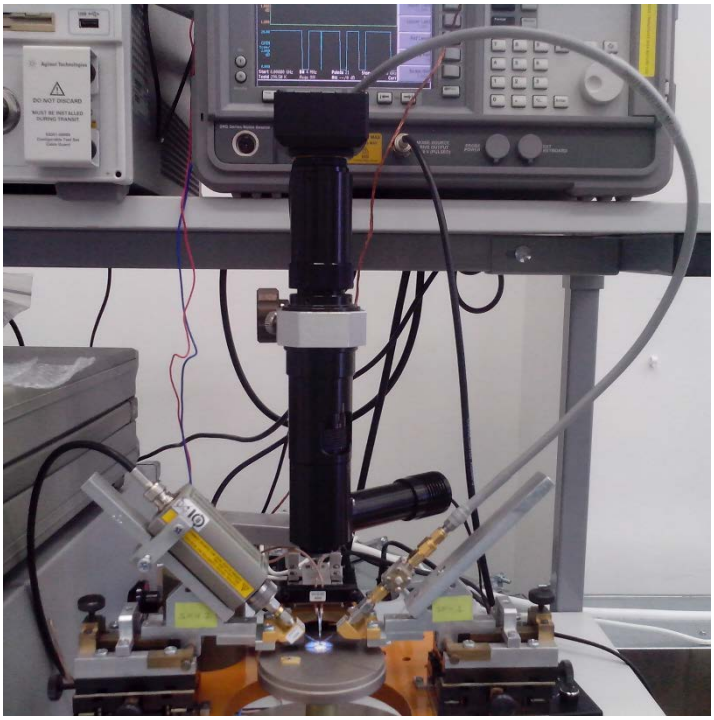

Рисунок 3

По измеренной шумовой матрице транзистора были рассчитаны оптимальные нагрузки по входу и выходу из условий реализации минимального коэффициента шума и максимального усиления на рабочей частоте 40 ГГц. Для выполнения этих условий оказалось достаточно двухзвенного трансформатора, состоящего из разварочного проводника и отрезка низкоомной линии. После расчета топологии был проведен электромагнитный анализ заявленной структуры трансформатора. Параметры топологии трансформаторов были уточнены с учетом разварочных проводников затвора и стока (золотая проволока диаметром 20 мкм и длиной 200 мкм).

Трансформаторы были реализованы на подложке из GaAs толщиной 100 мкм. Топология трансформаторов включает в себя собственно трансформаторы с подводящими 50-омными линиями, а также площадки для контактирования с СВЧ зондами GSG с межзондовым расстоянием 125-250 мкм. Заземление осуществляется через сквозные металлизированные отверстия. Фотография приведена на Рис. 4.

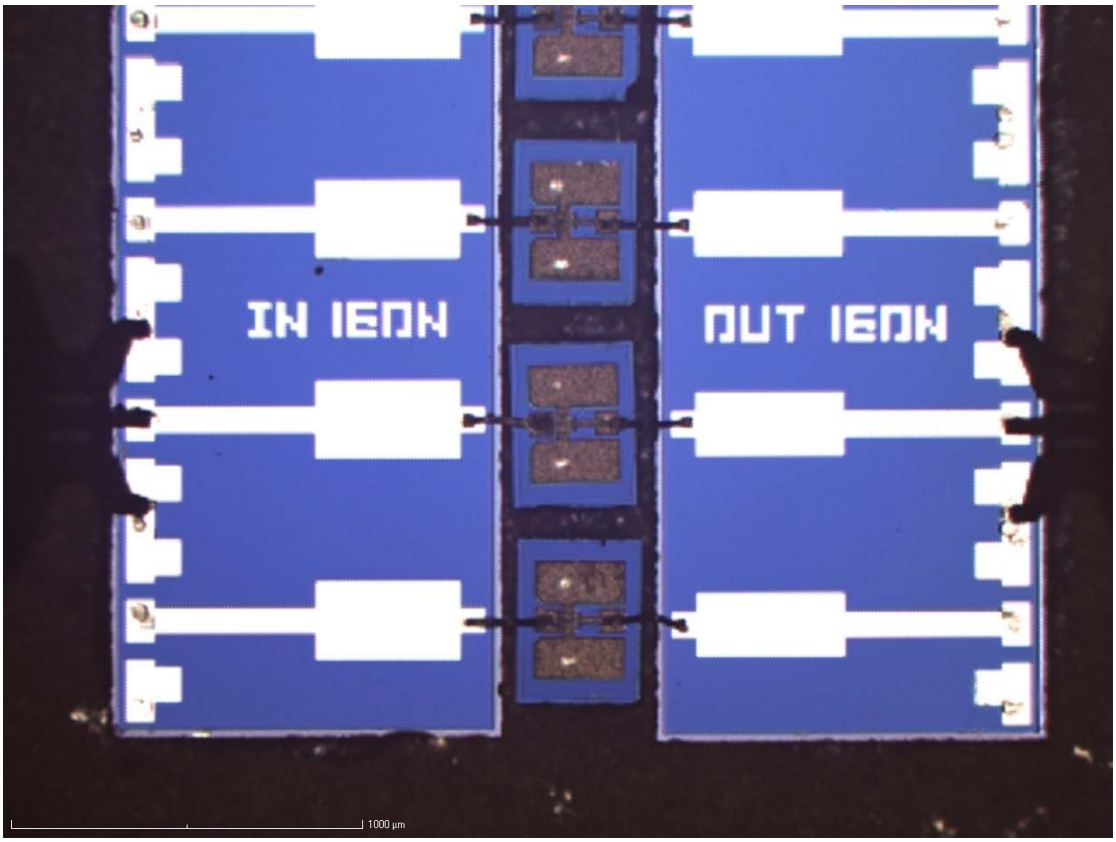

Рисунок 4

Результаты измерений приведены ниже.

F,ГГц	30	32	34	36	38	40
Nf, дБ	1,8	1,75	1,7	1,6	1,65	1,6
Ga, дБ	8,2	7,3	7,0	7,2	7,8	8,2

Заключение

Представлены результаты измерений коэффициента шума малошумящего транзистора миллиметрового диапазона на PHEMT структурах с помощью ATN систем фирмы Maury и с помощью синтезированных трансформаторов сопротивлений.

Представленные результаты показывают, что измерения с помощью синтезированных трансформаторов сопротивлений отличаются простотой и не требуют сложного и дорогостоящего оборудования. Такие измерения могут быть использованы в серийном производстве на этапе финишных измерений продукции и входном контроле у потребителя.

Библиографический список.

[1] Krutov A. V., Rebrov A. S. An experimental extraction of GaAs and GaN PHEMT linear equivalent circuit and noise model. 2010 20th Int. Crimean Conf. “Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo’2010). Sevastopol, 2010, pp.214-215.

[2] www.keysight.com © Keysight Technologies, 2013-2014 Published in USA, August 2, 2014 5991-1250RURU