

ЭКОНОМИЧНЫЙ РАДИОЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Целью данной работы является определение характеристик эффективности измерителя комплексного сопротивления, основанное на цифровой обработке сигналов (ЦОС). В частности, были исследованы зависимости чувствительности и скорости измерения от длины регистрируемого пакета. Показано, что применение методов цифровой обработки, в частности, быстрого преобразования Фурье, позволяет использовать АЦП более низкой ценовой категории без снижения точности измерений.

Ключевые слова и словосочетания: РЧ сигналы, измерение разности фаз, быстрое преобразование Фурье, цифровая обработка сигналов.

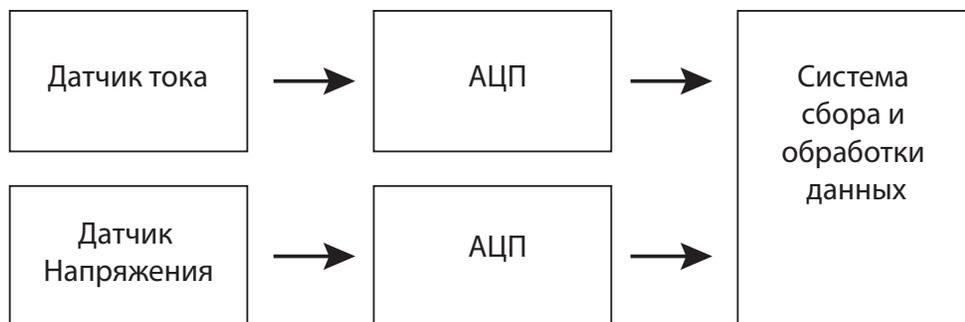
Плазменная обработка материалов является относительно новым методом, внедренным в процесс производства полупроводниковых приборов. В подобных системах применяется плазма, которая создается путем возбуждения молекул инертного газа, заполняющих камеру плазменной обработки. В качестве возбудителя для некоторых задач применяются РЧ сигналы с частотой порядка от единиц до десятков МГц. В производстве полупроводниковых приборов широко распространены РЧ сигналы с частотой 13,56 МГц.

На различных этапах плазменной обработки выполняются технологические процессы, в результате которых сложным образом, часто нелинейно, меняется электрический импеданс камеры

плазменной обработки. В результате этого нарушается условие согласования между выходным сопротивлением генератора РЧ сигналов и входным сопротивлением камеры плазменной обработки. Несогласованность системы приводит к уменьшению передачи энергии и ухудшению управления процессом плазменной обработки. С целью решения данной задачи используются специальные согласующие цепи, которые адаптивным образом меняют свои параметры и тем самым обеспечивают согласование системы в реальном масштабе времени. Обычно в таких согласующих цепях используются минимизирующие алгоритмы с обратной связью. В состав цепи обратной связи входит датчик комплексного сопротивления, с помощью которого измеряется комплексный импеданс камеры плазменной обработки [1,2].

Измеритель комплексных сопротивлений. Измеритель комплексного сопротивления камеры плазменной обработки состоит из датчика тока, датчика напряжения и детектора смещения начальных фаз между током и напряжением. Так как сигналы тока и напряжения являются когерентными, задача сводится к измерению разности начальных фаз двух сигналов синусоидальной формы, имеющих одинаковую частоту. Структурная схема измерителя приведена на рис. 1.

Рис. 1. Структурная схема измерителя комплексного сопротивления



Аналоговые сигналы от датчиков тока и напряжения поступают в аналого-цифровые преобразователи и далее оцифрованный сигнал передается к системе сбора и ЦОС. Для определения разности фаз двух сигналов определяются уровни нулевых пересечений и таким образом определяется разность фаз между ними (рис.2).

Очевидно, что точность измерения разности фаз зависит от количества разрядов и скорости преобразования АЦП. Как правило, высокоскоростные АЦП

имеют меньшее количество разрядов и наоборот, многоразрядные – низкую скорость преобразования. С ростом количества разрядов и скорости преобразования доступность АЦП уменьшается, причем, больше с ростом количества разрядов.

Целью настоящей работы является анализ эффективности цифрового измерителя разности фаз в зависимости от разрядности и скорости преобразования АЦП при применении различных методов цифровой обработки.

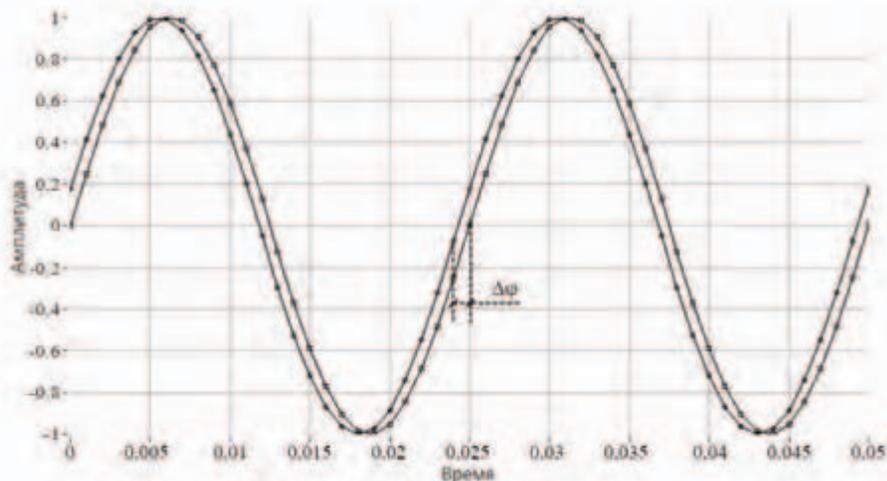


Рис. 2. Вычисление разности фаз сигналов

Методы измерения фазового сдвига, использующие ЦОС. С целью увеличения чувствительности измерителя фазового сдвига применяются разные методы ЦОС, такие как интерполяция, синусоидальная аппроксимация и дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Самым эффективным методом с точки зрения экономии вычислительных ресурсов является метод комплексного ДПФ [3]. Скорость измерения фазового сдвига является существенно важным параметром, если измеритель предназначен для использования в системах автоматического согласования сопротивлений РЧ плазмы. Исходя из выше перечисленных факторов, в разработанной системе был применен метод ДПФ, а точнее, быстрое преобразование Фурье (БПФ). При применении метода БПФ точность измерения уменьшается из-за некогерентной оцифровки аналоговых сигналов. С целью избежания влияния некогерентного преобразования применяются разнообразные взвешивающие окна. В данном случае было использовано взвешивающее окно Баттерворта. Несмотря на высокую скорость по сравнению с другими выше перечисленными методами, БПФ немного уступает с точки зрения точности измерения. Принцип работы заключается в следующем: два синхронно рабо-

тающих АЦП одновременно выполняют оцифровку пакета собранных данных и передают в систему сбора и обработки. В результате комплексного БПФ получается фазовый спектр, который содержит информацию про начальные фазы каждой из гармоник, содержащихся в оцифрованном сигнале. Разность начальных фаз основных частот двух оцифрованных сигналов равна фазовому сдвигу между этими исследуемыми сигналами. Точность измерения при использовании данного метода существенно зависит от количества собранных точек регистрируемого пакета. При увеличении длины пакета увеличивается длительность обработки. Очевидно, что эффективность данного метода зависит от совокупности длины регистрируемого пакета и скорости АЦП.

Экспериментальная установка. Для проведения измерений в качестве источника опорных сигналов был использован прецизионный двухканальный генератор синусоидальных сигналов с возможностью формирования разности фаз с шагом в 0,001 градуса. В качестве измерителя были использованы цифровые двухлучевые осциллографы с разрядностью 8 и 10 бит. Список использованных приборов приведен в таблице 1.

Таблица 1. Список приборов, использованных в экспериментальной установке

Назначение прибора	Название прибора
Генератор тестовых сигналов	NIPXIe-5451
8 - разрядный цифровой осциллограф	NIPXIe-5154
10 - разрядный цифровой осциллограф	NI PXIe-5162

Выходы генератора опорных сигналов подключаются к входам цифрового осциллографа кабелями примерно одинаковой длины. Во избежание дополнительных ошибок из-за разности длин кабелей была произведена предварительная калибровка измерительного тракта.

Результаты. С целью определения

характеристик эффективности измерителя сдвига фаз, основанного на БПФ, был проведен ряд измерений. В частности, была исследована зависимость чувствительности от количества собранных точек как для 8- так и для 10- разрядных АЦП. Результаты измерения приведены на рис.3.

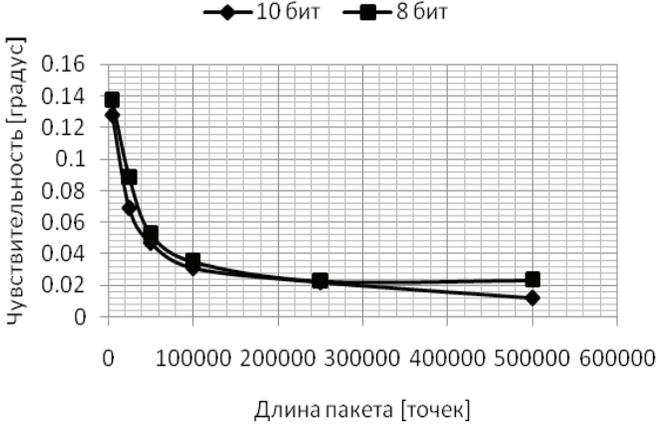


Рис. 3. Зависимость чувствительности от длины регистрируемого пакета

Из полученных результатов следует, что чувствительность измерения разности фаз увеличивается при увеличении длины пакета по корневому закону. Из результатов также следует, что при прочих равных условиях, чувствительность для 8- битного АЦП приблизительно на 0,02 градуса хуже, чем для 10- битного.

Также была исследована зависимость чувствительности измерителя разности фаз в зависимости от скорости преобразования АЦП. На рис. 4 приведены результаты этих измерений, проведённых для 8- разрядного АЦП при сборе 50000 точек при частотах преобразования 100, 200 и 300 МГц соответственно.

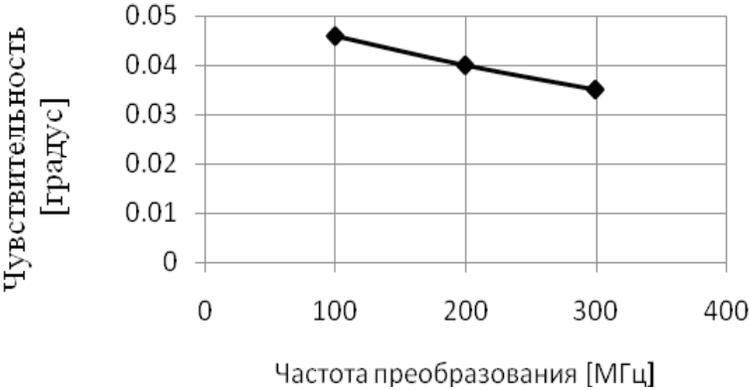


Рис. 4. Зависимость чувствительности от частоты преобразования АЦП

Видно, что чувствительность измерения увеличивается с увеличением частоты преобразования. В частности, при увеличении частоты преобразования от 100 до 300 МГц чувствительность увеличивается до 0,01 градуса.

Важным фактором для измерителей сдвига фаз, применяющихся в системах согласования сопротивлений РЧ плазмы, является скорость измерения, которая зависит от длительности преобразования, передачи оцифрованных сигналов

в оперативную память вычислительной системы и обработки результатов. При использовании конвейерных методов сбора данных длительность передачи оцифрованных сигналов в оперативную память значительно уменьшается. На рис. 5 приведена зависимость длительности обработки оцифрованных сигналов от количества собранных точек. Скорость обработки зависит также и от самой производительности вычислительной системы.

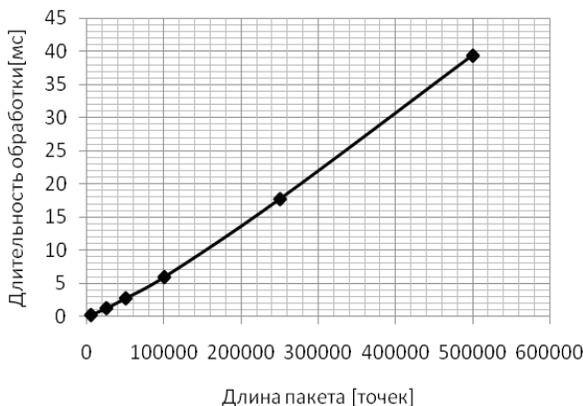


Рис. 5. Зависимость длительности обработки от длины регистрируемого пакета

При увеличении скорости преобразования уменьшается длительность преобразования одного пакета данных. На рис. 6 приведена зависимость длительности

преобразования одного пакета данных, содержащего 50000 точек при частотах преобразования 100, 200, 300 МГц соответственно.

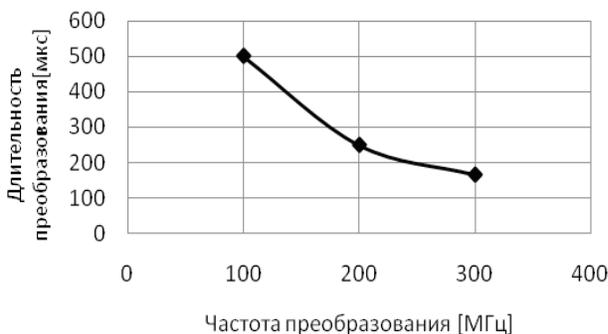


Рис. 6. Зависимость длительности преобразования от частоты преобразования

Обобщая выше перечисленные результаты измерений, можно заключить, что эффективность измерителя разности фаз при использовании БПФ с точки

зрения чувствительности незначительно улучшается при использовании 10-разрядного АЦП вместо 8-разрядного. В то же время на скорость измерения влия-

ет максимальное значение частоты преобразования АЦП, которое выше для той же самой категории АЦП, имеющей меньшее количество разрядов.

Точность измерения комплексного сопротивления можно увеличить путем увеличения точности измерения разнос-

ти фаз между напряжением и током переменного сигнала. Применение методов цифровой обработки, в частности БПФ, позволяет использовать АЦП более низкой ценовой категории.

Дата представления статьи: 27.02.2015

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Amatucci, D. Walker. Broadband Plasma Impedance Measurements and Determination of Plasma Parameters. Novel Research Laboratory. NRL/MR/6750-04-8811, 2004.
2. M. Hopkins, L. King, Evaluation of a Plasma Impedance Probe in Time-varying Non-uniform Plasma, 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, DOI: 10.2514/6.2013-4129, 2013.
3. M. Sedlacek, M. Krumpholtz, Digital Measurement of Phase Defference – A Comprehensive Study of DSP Algorithms, vol. 12, no. 4, pp. 427-488, 2005.

ԿՈՄՊԼԵՔՍ ԴԻՄԱԴՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՌԱԴԻՈ-ՀԱՃԱԽԱՅԻՆ ՉԱՓՄԱՆ ՄԱՏՉԵԼԻ ԵՂԱՆԱԿ

ԱՆԴՐԱՆԻԿ ԱՂԱՋԱՆՅԱՆ

*ՀՀ ԳԱԱ Ռ-ՖԷԻ սապիրանսյր,
տեխնիկական գիտությունների մագիստրոս*

Կատարված աշխատանքի նպատակն է որոշել ազդանշանների թվային մշակման (ԱԹՄ) վրա հիմնված կոմպլեքս դիմադրության չափման մեթոդի արդյունավետության բնութագրերը: Մասնավորապես, հետազոտվել է զգայունության և արագագործության կախումը գրանցված փաթեթում եղած ընտրությունների քանակից: Կատարված ուսումնասիրությունները ցույց են տալիս, որ ազդանշանների թվային մշակման, մասնավորապես Ֆուրյեի արագ ձևափոխության կիրառումը թույլ է տալիս օգտագործել ավելի ցածր գնային դասի ԱԹԿ՝ չնվազեցնելով չափման ճշգրտությունները:

Հոդվածի ներկայացման տարեթիվը՝ 27.02.2015

AN ECONOMICAL METHOD FOR RF COMPLEX IMPEDANCE MEASUREMENT

ANDRANIK AGHAJANYAN

*NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE RA
Institute of Radiophysics & Electronics
Postgraduate student, Master of Technical Sciences*

The aim of this work is the investigation of characteristics of impedance meter based on DSP. Especially, the relation of measurement speed and sensitivity versus number of samples in a data packet is determined. It is shown that the use of DSP, in particular Fast Fourier transform, allows using a lower price category ADC without compromising the measurement accuracy.

Article submission date: 27.02.2015