

МИКРОВОЛНОВАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.385.6

СИСТЕМЫ АПЧ ЗАДАЮЩИХ ГЕНЕРАТОРОВ
В СОВРЕМЕННОЙ СВЧ ДИАГНОСТИКЕ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

Ю. Е. ГОРДИЕНКО, А. В. ПОЛИЩУК, М. И. ПЯТАЙКИНА

В работе описаны перспективы применения АПЧ задающих генераторов в СВЧ диагностике полупроводниковых, диэлектрических и метаматериалов микро- и нанoeлектроники. Проведен анализ системы АПЧ модуляционного типа, изготовленной на современной элементной базе.

Ключевые слова: система автоматической подстройки частоты (АПЧ), сканирующая микроволновая микроскопия (СММ), информационные сигналы, СВЧ диагностика.

ВВЕДЕНИЕ

СВЧ диагностика различных объектов в настоящее время образует весьма развитое направление СВЧ технологий [1]. В его основе лежит использование, как правило, резонаторных датчиков или измерительных преобразователей (РИП). Формируемая с их помощью измерительная информация базируется на двух фундаментальных сигналах: изменения резонансной частоты датчика ($\Delta f/f$) и его добротности ($\Delta Q/Q$), обусловленных воздействием диагностируемого объекта. С развитием сканирующей микроволновой микроскопии (СММ) для выделения этих сигналов начали широко применять системы автоматической подстройки частоты (АПЧ) задающего СВЧ генератора по резонаторному датчику [2, 3]. Ранее такие системы использовались преимущественно для уменьшения влияния частотных флуктуаций СВЧ генератора на отношение сигнал/шум в измерительной системе. Указанный прямой измерительный аспект требует учета соответствующих критериев при оптимизации системы АПЧ. Кроме того, к настоящему времени существенно изменились схемотехнические приемы в разработке подобных систем.

Целью данной работы является обоснование новых подходов в проектировании АПЧ задающих генераторов, перспективных для СВЧ диагностики, включающей СММ, контроль электрофизических параметров полупроводниковых и диэлектрических материалов, состава компонентов и др.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

СВЧ диагностика материалов и функциональных объектов предполагает как многопараметровость их контроля, так и широкий диапазон возможного изменения каждого из параметров. Например, при СВЧ диагностике полупроводниковых материалов, как правило, необходимо контролировать их удельную электропровод-

ность, время жизни и подвижность носителей заряда, диэлектрическую проницаемость, фоточувствительность, толщину слоев в структуре и др. Удельная электропроводность полупроводников может варьироваться в пределах нескольких порядков величины, так же как и тангенс угла потерь диэлектриков. Напомним, что важнейшим преимуществом СВЧ диагностики является безэлектродность и неразрушаемость измерений.

Биологические объекты не менее многогранны в диагностике чем полупроводниковые структуры. Перспективность их СВЧ диагностики уже широко подтверждена соответствующими разделами биофизики.

Не расширяя далее перечень объектов и параметров можно утверждать, что диапазон значений величины измеряемых при СВЧ диагностике указанных выше сигналов $\Delta f/f$ и $\Delta Q/Q$ может быть большим. Это накладывает свой отпечаток как на выбор датчика, так и на требования к измерительной системе. Отдельно следует заметить, что в последнее время резонаторные датчики значительно универсализированы за счет использования первичных измерительных преобразователей апертурного типа [4, 5]. Основным их преимуществом является внешнее размещение контролируемого объекта. Это не только снижает требования к размерам и форме образца, а и одновременно позволяет регулировать его включение в электромагнитное поле резонатора. Последнее создает возможность регулировать чувствительность датчика.

С учетом сказанного можно заключить, что для перехода технических средств СВЧ диагностики из ранее узко специализированных по объектам систем к универсальным стало необходимо универсализировать технику обработки сигналов измерительной информации, снимаемых с первичного измерительного преобразователя.

Такой аспект обсуждался и разрабатывался ранее в меньшей степени. В связи с этим рассмо-

трим более подробно перспективы применения АПЧ для выделения и обработки сигналов измерительной информации в СВЧ диагностике объектов.

На рис. 1, а, б, в схематично представлено несколько вариантов такого применения.

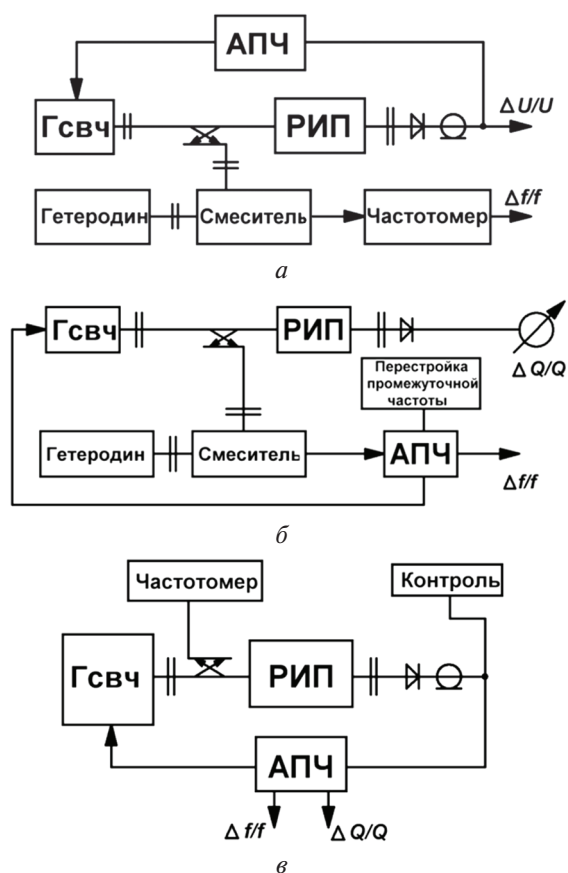


Рис. 1. Функциональные схемы включения систем АПЧ

Если АПЧ задающего СВЧ генератора осуществляется по резонансной частоте самого датчика, как показано на рис. 1а, то используя дополнительный высокостабильный гетеродин и смеситель можно непосредственно с помощью низкочастотного частотомера измерять весьма малые значения $\Delta f/f$. В целом, диапазон измеряемых значений этого сигнала в данном варианте практически не ограничен. Погрешность его регистрации определяется точностью поддержания частоты СВЧ генератора равной резонансной частоте датчика.

Сигнал $\Delta Q/Q$ непосредственно в этой схеме регистрировать не предусмотрено. Косвенная количественная его оценка возможна по коэффициенту передачи РИП в виде изменения напряжения $\Delta U/U$ на выходе СВЧ детектора. Такой вариант использования АПЧ универсален для применения в системах СВЧ диагностики различных объектов и характеризуется высоким соотношением сигнал/шум. Недостатками его являются сложность устройства, отражающаяся на его компактности, и наличие систематической погрешности перевода сигнала $\Delta U/U$ в $\Delta Q/Q$. В СММ эти недостатки не очень существенны.

Вариант АПЧ, проиллюстрированный на рис. 1, б, позволяет реализовывать частотное формирование обоих сигналов $\Delta f/f$ и $\Delta Q/Q$. В соответствии с ним АПЧ используется для весьма плавной, точно регистрируемой перестройки промежуточной частоты, выделяемой через смеситель при стабильной частоте гетеродина. Указанная промежуточная частота является опорной в низкочастотном дискриминаторе, который можно плавно перестраивать. Система АПЧ при этом обрабатывает через электронное управление частотой задающего СВЧ генератора равенство выделяемой смесителем частоты резонансной частоте дискриминатора.

Сигналы $\Delta f/f$ и $\Delta Q/Q$ в таком варианте измеряются прямо низкочастотным частотомером по положению резонанса датчика и точек половинной мощности его передачи. Система АПЧ в данном случае является стандартным устройством, широко используемым при демодуляции частотно-модулированных СВЧ сигналов [6].

Рис. 1, в иллюстрирует использование наиболее распространенного варианта АПЧ модуляционного типа [7]. Особенностью его является формирование сигналов $\Delta f/f$ и $\Delta Q/Q$ первоначально в аналоговом виде. Сигнал $\Delta f/f$ – выделяется после СВЧ дискриминатора на частоте модуляции f_M , а сигнал $\Delta Q/Q$ на частоте $2f_M$. Последующая их обработка осуществляется путем фильтрации, усиления и аналого-цифрового преобразования. При этом сигнал $\Delta f/f$ фактически совпадает с напряжением регулирования в системе АПЧ.

Функциональная схема АПЧ, представленная на рис. 1, а, в СВЧ диагностике будет обеспечивать наиболее высокую разрешающую способность при условии идеальности АПЧ и высокой стабильности гетеродина. Система АПЧ при этом может быть фазовой. Фактически ее предел будет определяться погрешностью стабилизации частоты СВЧ генератора на резонансной частоте РИП.

Диапазон измерения $\Delta f/f$ будет определяться полосой удержания АПЧ, а диапазон контроля $\Delta Q/Q$ будет ограничиваться влиянием добротности РИП на точность и полосу удержания АПЧ.

Вариант АПЧ, представленный на рис. 1, б, может иметь более высокие эксплуатационные показатели по обоим сигналам, т.к. полоса удержания не будет ограничиваться добротностью РИП. Однако, особенности его функционирования мало изучены.

Вариант, представленный на рис. 1в, наиболее простой в технической реализации. Однако, его практическое использование сопряжено с компромисностью выбора глубины модуляции (девиации) частоты задающего СВЧ генератора как сигналообразующего фактора. Кроме того, оба сигнала $\Delta f/f$ и $\Delta Q/Q$ выделяются косвенно и при диагностике объектов необходимо их восстановление по абсолютной величине. Это сопряжено с появлением систематической погрешности, обу-

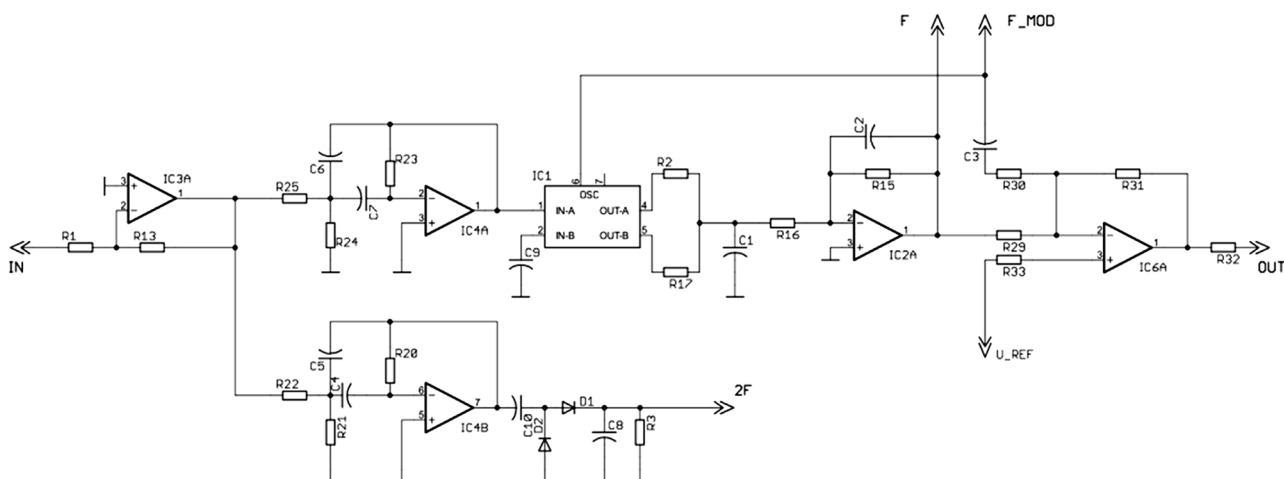


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная аналоговой модуляционной АПЧ

В 3-х см диапазоне при нагруженной добротности РИП получены следующие эксплуатационные параметры АПЧ: уровень шумов на выходе сигнала $\Delta f/f$ не превышает 2 мВ. На выходе сигнала $U_{2\Omega} - 10$ дБ. Полоса удержания – 160 МГц, полоса захвата – 140 МГц, коэффициент стабилизации – 10000, амплитуда $\Omega_m = 300$ мВ.

Усовершенствованный вариант, использующий БПФ для фильтрации выходных сигналов и исполненный на ПЛМ, будет описан позже.

ВЫВОДЫ

Разработанная система АПЧ по РИП модуляционного типа может иметь универсальное применение в СВЧ диагностике различных материалов.

АПЧ модуляционного типа имеет ряд преимуществ по сравнению с другими:

- выделение двух информационных сигналов $\Delta f/f$ и $\Delta Q/Q$;
- простота технической реализации.

Так как АПЧ функционирует в режиме подстройки РИП под частоту задающего генератора, можно задавать разную величину амплитуды модуляционного сигнала. Это дает возможность избавиться от погрешности, связанной с характеристиками СВЧ детектора и управляющего элемента.

Литература

- [1] *Лепих Я. И., Гордиенко Ю. О., Дзядевич С. В. та ін.* Створення мікроелектронних датчиків нового покоління для інтелектуальних систем // Одеса: Астропринт, 2010. – 296 с.
- [2] *Anlage S.M., Talanov V.V., Schwartz A.R.*, Principles of near-field microwave microscopy // Scanning probe microscopy: electrical and electromechanical phenomena at the nanoscale, Springer-Verlag, New York, 2007, V. 1. – P. 207–245.
- [3] *Бондаренко И.Н., Гордиенко Ю.Е., Ларкин С.Ю.* Применение системы АПЧ измерительного генератора в микроволновой сканирующей микроскопии // Радиотехника и информатика, 2009, №3. – С. 3–6.

- [4] *Гордиенко Ю.Е., Ларкин С.Ю., Яцкив А.М.* Ближнеполевой СВЧ датчик на основе конусного коаксиального резонатора // Радиотехника : науч.-техн. сб., X. : ХНУРЭ, 2009. – Вып. 159. – С. 309–314.
- [5] *Gordienko Yu.E., Larkin S.Yu., Prokaza A.M.* Electromagnetic Properties of Resonator Microprobe for the Scanning Microwave Microscopy / Telecommunications and Radio Engineering, 2011. – Vol. 70, No15. – PP. 1333–1342.
- [6] *Бычков С.И., Н.И. Буренин, Р.Т. Сафаров* Стабилизация частоты генераторов СВЧ / ред. Ю.И. Суханова // М.: Сов. Радио, 1962. – 376 с.
- [7] *Гордиенко Ю.Е., Бондаренко И.Н., Лепих Я.И., Проказа А.М.* Основы высоколокальной СВЧ сенсорики // Sensor electronics and microsystem technologies, Одесса, 2014.

Поступила в редколлегию 3.02.2016



Гордиенко Юрий Емельянович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: СВЧ диагностика материалов, сред и объектов; сканирующая микроволновая микроскопия проводников, полупроводников и диэлектриков; СВЧ модификация полупроводниковых материалов.



Полищук Александр Викторович, аспирант кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: СВЧ диагностика материалов, сред и объектов; сканирующая микроволновая микроскопия проводников, полупроводников и диэлектриков.



Пятайкина Мария Игоревна, аспирант и ассистент кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: сканирующая микроволновая микроскопия проводников, полупроводников и диэлектриков, модификация полупроводниковых материалов.

УДК 621.385.6

Системи АПЧ задаючих генераторів у сучасній НВЧ діагностиці різноманітних об'єктів / Ю.О. Гордієнко, О.В. Поліщук, М.І. Пятайкина // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2016. — Том 15. — № 1. — С. 00–00.

У статті обговорюються результати вибору системи АПЧ для перспективного направлення СВЧ діагностики та модифікації різноманітних матеріалів. Представлено детальний аналіз системи АПЧ модуляційного типу, що виготовлена на сучасній елементній базі.

Ключові слова: система автоматичного підстроювання частоти (АПЧ), скануючий мікрохвильовий мікроскоп (СММ), інформаційні сигнали, мікрохвильова діагностика.

Рис.: 03. Бібліогр.: 07 найм.

UDC 621.385.6

AFC system master oscillator in the microwave modern diagnostics various objects / Yu.E. Gordienko, A.V. Polishchuk, M.I. Pyataykina // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2016. — Vol. 15. — № 1. — P. 00–00.

The novel discusses the results of selection of system AFC for direction of microwave diagnostics and modification different materials, which is perspective. Present in-depth study of system AFC modulation type, which is produce with using modern element base.

Keywords: system of automatic frequency control (AFC), a scanning microwave microscopy (SMM), information signals, microwave diagnostics.

Fig.: 03. Ref.: 07 items.