УДК 621.396.91

А.А. Трубачев, В.И. Юрченко

КВЧ-микроскоп для биомедицинских исследований

Представлен анализ КВЧ-резонаторного измерительного преобразователя и на его основе рассмотрены варианты реализации КВЧ-микроскопа. Показано существенное упрощение реализации КВЧ-микроскопа при использовании автодинных датчиков.

Ключевые слова: резонаторный зонд, микроволновая микроскопия, разрешающая способность, автодин.

В настоящее время особое внимание специалистов биомедицины привлекают резонаторные варианты для ближнеполевой сканирующей микроволновой микроскопии (БПММС) [1]. По сравнении с другими методами зондовой микроскопии микроволновая микроскопия позволяет исследовать объекты различной биологической природы и имеет возможность измерять более широкий спектр параметров медицинских и биологических материалов в широком частотном диапазоне [1].

Согласно [1] структурная схема КВЧ-микроскопа показана на рис. 1.

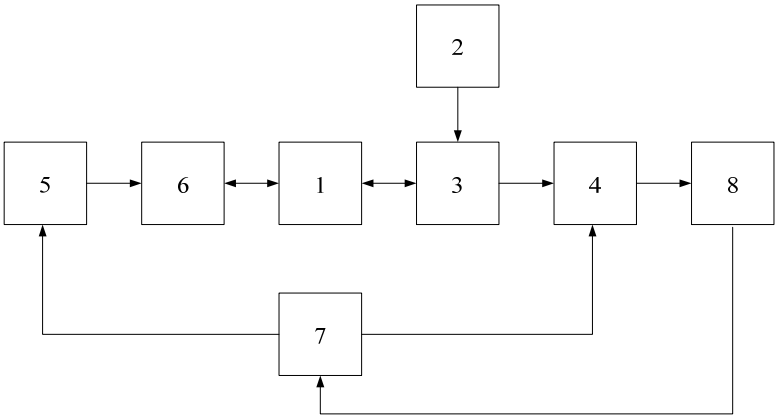

Рис. 1. Структурная схема КВЧ-микроскопа

На рис. 1 введены следующие обозначения: *1* – зонд; *2* – источник КВЧ-сигнала; *3* – датчик; *4* – устройство выделения сигнала; *5* – устройство передвижения; *6* – объект; *7* – модуль управления; *8* – компьютер.

Проведем анализ элементов схемы и прежде всего пути усовершенствования КВЧ-датчика. В качестве зондов в таких микроскопах применяются объёмные резонаторы с цилиндрической апертурой, коаксиальные резонаторы и кабели, резонаторы и волноводы со щелевыми апертурами, резонансные волноводные штыри, микрополосковые резонаторы и др.

В технике микроволнового контроля материалов и объектов широко используются датчики коаксиального типа с торцевой измерительной апертурой. Важнейшими преимуществами апертурных коаксиальных СВЧ резонаторных датчиков перед объёмными являются возможность достижения высокого пространственного разрешения (до 0,1 мкм) и широкий частотный диапазон практической реализации – от 0,1 до 35 ГГц. При этом пространственная разрешающая способность ограничивается в первую очередь добротностью резонатора [2]. Следует отметить, что резонатор в апертурных коаксиальных датчиках является, как правило, четвертьволновым, поэтому его добротность в отсутствие объекта контроля определяется как СВЧ-потерями в стенках, так и потерями на излучение в свободное пространство. В работах [1, 2] показано, что наилучшей на данный момент является конструкция конусного коаксиального резонатора для решения задач БПММС.

Коаксиальные зонды строятся либо на основе четвертьволнового коаксиального резонатора [1], либо отрезка коаксиального кабеля [2]. Зондирующее поле излучается с острой металлической иглы, соединённой с центральным проводником и выступающей из плоскости апертуры. По мере уменьшения радиуса иглы увеличивается пространственное разрешение, благодаря локализации взаимодействия между иглой и образцом. Разрешающая способность микроволновой микроскопии в целом определяется размером острия иглы зонда и чувствительностью системы выделения сигналов [3]. Теоретически увеличение разрешающей способности в такой системе можно получить, повышая рабочую частоту. Однако на практике это не может быть реализовано из-за уменьшения исходной добротности коаксиального резонатора в миллиметровом диапазоне.

Основными электрическими параметрами резонаторных зондов, применяемых в микроволновой микроскопии, являются: резонансная частота и добротность, коэффициент связи резонатора с линией.

Введение образца в поле зонда приводит к одновременному изменению резонансной частоты и добротности резонатора. Регистрация этих изменений в большинстве случаев предполагает определение параметров невозмущённого и возмущённого образцов зонда. Чем меньше время перехода от одного измерения к другому, тем меньше вероятность изменения выходных сигналов, вызванного мешающими факторами (изменение параметров как самого зонда, не связанное с контролируемыми свойствами образца, так и зондирующего СВЧ-сигнала, вызванных в первую очередь изменениями температуры). На момент завершения измерений с возмущённым резонатором в измерителе должны присутствовать результаты эксперимента с невозмущённым резонатором.

Сканирование объекта предполагает проведение большого количества одиночных измерений параметров зонда (количество измерений зависит от площади сканируемого объекта и требуемого геометрического размещения). Для сокращения общего времени сканирования необходимо сокращать время одиночного измерения. Высокое быстродействие – одно из основных требований к устройству измерителя параметров зондов для сканирующей микроволновой микроскопии. Второе требование – измерение очень малых изменений добротности и частоты, что обусловливает разрешающую способность определения распределения электрофизических свойств и микрорельефа объекта.

В БПММС размеры апертуры существенно меньше (в $10^4 \ldots 10^6$ раз) рабочей длины волны, поэтому для повышения рабочей добротности поперечные размеры накопительной части резонатора превышают апертурные, а длина его выбирается в несколько полуволн.

При конусном конструктиве коаксиального резонаторного датчика (рис. 2) накопительная часть I обеспечивает одновременное повышение добротности и согласование её с малоразмерной апертурой II, обеспечивающей заданную пространственную разрешающую способность.

В БПММС важно также реализовывать исследования на нескольких разнесённых частотах для выделения неоднородности электропроводимости на фоне общих СВЧ-потерь в материале. Коаксиальные резонаторные датчики в этом отношении выгодно отличаются от «одночастотных» объёмных. Конусность датчика при этом сглаживает рассогласованность накопительной части с апертурой при переходе на другую рабочую частоту.

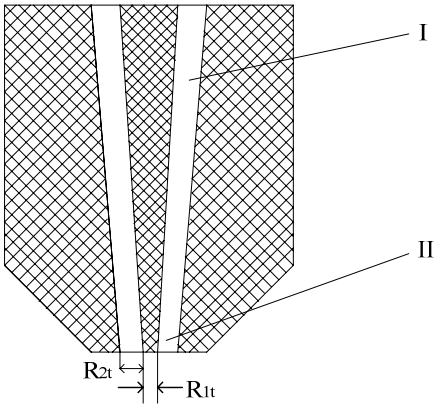

Рис. 2. Общий вид модели

Предварительные результаты реконструкции подтвердили заявленную ранее [1] возможность повышения разрешающей способности метода на порядок, по сравнению с необработанным изображением. Так, при диаметре острия зонда 30 мкм и его высоте над контролируемой поверхностью 25–35 мкм удаётся добиться пространственного разрешения 1 мкм.

Результат сканирования тестового объекта датчиком, расположенным на высоте 40 мкм и с диаметром острия коаксиального зонда 30 мкм представлен на рис. 3. До реконструкции края ступенек металлизации определяются с точностью 30–40 мкм.

Предварительная обработка результатов прямого и обратного сканирования (рис. 4) подтверждает воспроизводимость пиков, соответствующих границам слоёв, с точностью до 1 мкм.

До построения томографического изображения необходимо обеспечить дополнительное сканирование объекта контроля по глубине. Технически это осуществимо за счёт повторного сканирования объекта по площади на различных расстояниях датчика от объекта контроля. Однако зависимость распределения невозмущённого поля $E_{0j}(x, y, z)$ от расстояния h до объекта контроля приводит к тому, что уже невозможно записать трёхмерную зависимость в виде свёртки этого поля с эквивалентным распределением диполей, которое играет роль передаточной функции объекта и характеризует его свойства.

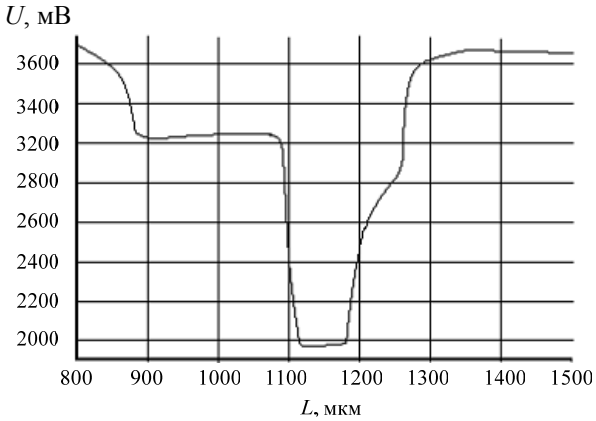

Рис. 3. Результат сканирования тестового объекта

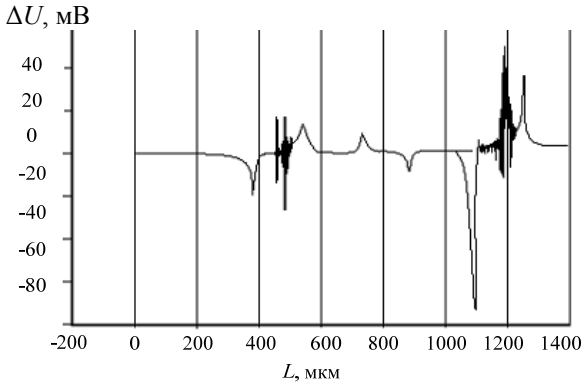

Рис. 4. Результат предварительной обработки результатов прямого и обратного сканирования

Для микроволновой микроскопии целесообразным представляется применение модуляционной методики выделения сигналов, обеспечивающей многопараметровость (одновременное определение нескольких параметров), повышение чувствительности и точности измерений, а также ослабляющей зависимость их результатов от всевозможных мешающих факторов. Суть её заключается в формировании выходного сигнала зонда путём модуляции одной из электрофизических характеристик контролируемого образца и выделения соответствующего изменения одного из параметров зонда.

Для обеспечения многопараметровости контроля и максимального подавления мешающих факторов необходимо для каждого вида зонда строгое решение электродинамической задачи о воздействии образца на его параметры. Адекватные модели зондов предполагают установление количественной взаимосвязи выходных сигналов измерительной информации со значениями измеряемых параметров объектов и мешающих факторов. Такие модели необходимы для количественного и качественного анализа характеристик зондов и их градуировки. Для синтеза оптимальных зондов и их использования в микроскопах необходимо решение обратных задач. Поэтому при создании теории микроволновых зондов следует оценивать её применимость также для решения задач оптимизации.

В качестве активного элемента датчика, генерирующего КВЧ-колебания, следует использовать диод Ганна, включенный по автодинной схеме, что позволит совмещать несколько радиотехнических функций в одном элементе.

Важной областью применения автодинов, как это следует из результатов исследований, является контроль параметров материалов, используемых в радиотехнике и микроэлектронике. Применение эффекта автодинного детектирования в полупроводниковых СВЧ-генераторах для контроля параметров материалов и структур основано на установлении зависимостей величины сигнала от параметров контролируемых величин: толщины, диэлектрической проницаемости, проводимости.

В работах [4, 5] приведены результаты экспериментов по неразрушающему контролю, принцип действия которых основан на эффекте автодинного детектирования: измерение толщины металлодиэлектрических структур и их диэлектрической проницаемости.

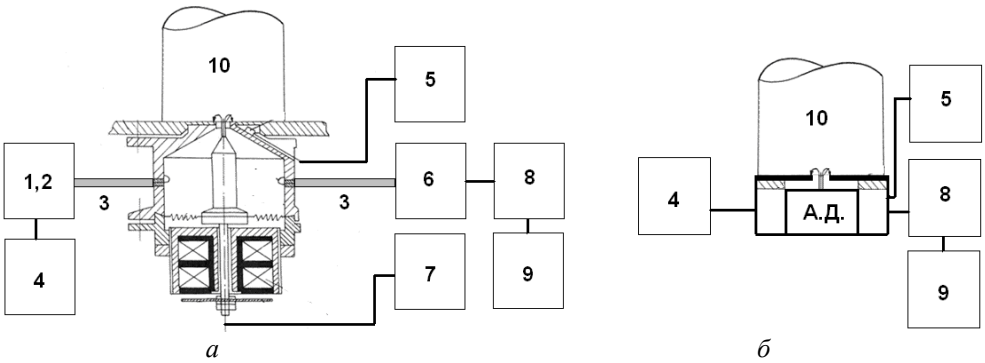

Рис. 5. Измерительная установка: *а* – на основе СВЧ-резонатора; *б* – на основе автодинного датчика. Обозначения на рисунке: *1* – источник сигнала; *2* – резонатор; *3* – волновод; *4* – источник питания; *5* – генератор импульсов; *6* – детектор; *7* – модуль управления; *8* – устройство выделения сигнала; *9* – компьютер; *10* – образец

На рис. 5 представлена структурная схема установки для измерения параметров по торцу монокристалла. При сравнении структуры измерительных установок на основе СВЧ-резонатора (рис. 5, *а*) и автодинного датчика (рис. 5, *б*) видно, что измерительная установка на автодинном датчике имеет гораздо меньше дополнительного оборудования, что в свою очередь упрощает конструкцию, снижает цену и габариты установки.

Заключение. Результаты анализа литературы и оценки параметров зонда показывают, что при уменьшении радиуса зонда – иглы и повышении частоты может быть получено разрешение по геометрии менее 1 мкм.

Для повышения чувствительности необходимо увеличивать добротность при той же резонансной частоте датчика с зондом.

Упрощение КВЧ-микроскопа может быть достигнуто при использовании автодинных датчиков.

Литература

1. Реализация новых направлений повышения пространственной разрешающей способности микроволновой микроскопии полупроводников / Ю.Е. Гордиенко, С.И. Мельник, В.В. Петров, Н.И. Слипченко // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо`2007): Матер. 17-й Междунар. Крымской конф. – Севастополь: Вебер, 2007. – С. 547–548.

2. Гордиенко Ю.Е. Ближнеполевой СВЧ-датчик на основе конусного коаксиального резонатора / Ю.Е. Гордиенко, Н.И. Слипченко, А.М. Яцкив // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо`2009): матер. 19-й Междунар. Крымской конф. – Севастополь: Вебер, 2009. – С. 565–566.

3. Tunable resonance cavity control in a near-field scanning microwave microscope / S. Hong, J. Kim, K. Lee et all. // Journal of the Korean physical society. – 2002. – Vol. 40, № 5. – P. 861–865.

4. Радиоволновые измерители на основе эффекта автодинного детектирования в полупроводниковых СВЧ-генераторах / Д.А. Усанов, В.Д. Тупикин, А.В. Скрипаль, Б.Н. Коротин // Тезисы докл. Всесоюзной научно-технической конф. «Оптические радиоволновые и тепловые методы и средства неразрушающего контроля качества промышленной продукции». – Саратов: Изд-во СГУ, 1991. – С. 4–6.

5. Юрченко А.В. Автодинные датчики в измерительной технике / А.В. Юрченко, В.И. Юрченко, С.Д. Воторопин. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 128 с.

Трубачев Анатолий Андреевич
Мл. науч. сотрудник отдела 110 НИИ ПП (полупроводниковых приборов),
аспирант каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники ТУСУР
Тел.: 8-952-880-58-57
Эл. почта: t0l9n@vtomske.ru

Юрченко Василий Иванович
Нач. отдела 110 НИИ ПП
Тел.: 8 (382-2) 55-82-96
Эл. почта: yur_med@mail.ru

Trubachev A.A., Urchenko V.I.
EHF microscope for biomedical research

The paper presents the analysis of EHF resonator transmitter and the options for implementation of the EHF microscope based on this analysis. We show the essential simplification of the implementation of the microscope by using EHF autodyne sensors.
Keywords: cavity probe, microwave microscopy, resolution, autodyne.