

УДК 621.396.91

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
АВТОДИННЫХ КВЧ МОДУЛЕЙ
ДЛЯ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ
МИКРОВОЛНОВОЙ МИКРОСКОПИИ**

А.А. Трубачев, В.И. Юрченко

ОАО НИИ Полупроводниковых Приборов, г. Томск
E-mail: t0l9n@vtomske.ru

**Трубачев Анатолий Андре-
евич**, мл. науч. сотр. отдела
110 ОАО НИИ Полупровод-
никовых Приборов, г. Томск,
аспирант кафедры сверхвысо-
кочастотной и квантовой ра-
диотехники Томского госу-
дарственного университета
систем управления и радио-
электроники.

E-mail: t0l9n@vtomske.ru

Область научных интересов:
микроволновая микроскопия,
антенны и устройства СВЧ.

**Юрченко Василий Ивано-
вич**, нач. отдела 110 ОАО
НИИ Полупроводниковых
Приборов, г. Томск.

E-mail: yur_med@mail.ru

Область научных интересов:
полупроводниковая СВЧ элек-
троника, методы и приборы
контроля материалов и изделий,
системы технического зрения.

Представлен анализ структуры КВЧ микроскопа, конст-
рукции зондового элемента и использования КВЧ автодинных
модулей как варианта реализации микроволновой сканирующей
микроскопии. Показано существенное упрощение реализации
КВЧ микроскопа при использовании автодинных датчиков.

Ключевые слова:Резонаторный зонд, микроволновая микроскопия, авто-
динные КВЧ модули.

К настоящему времени существует довольно большое число работ, посвященных проблемам ближнеполевой СВЧ-микроскопии [1]. По-прежнему актуальна проблема повышения чувствительности ближнеполевых СВЧ-микроскопов. На данный момент к числу нерешенных задач в этой области можно отнести, например, определение предела разрешающей способности (в том числе с повышением частоты), выяснение механизмов взаимодействия микрообъектов с ближним полем, влияния

случайных возмущений на результаты измерений. Также не исследованы возможности повышения качества систем и используемых измерительных элементов ближнеполевого микроскопа. В связи с вышесказанным, представляет интерес поиск способов упрощения ближнеполевых КВЧ-систем, улучшения характеристик при управлении этими системами, возможностей повышения разрешения с увеличением частоты и использование автодинных датчиков.

Проведем анализ схемы и путей 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 отсутствии 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 ближнеполевой сканирующей микроволновой микроскопии (БПСММ).

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 образцом зонда. Чем меньше время перехода от одного измерения к другому, тем меньше вероятность изменения выходного сигнала, вызванного мешающими факторами (изменение параметров как самого зонда, не связанное с контролируемыми свойствами образца, так и зондирующего СВЧ сигнала, вызванного 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 обуславливает разрешающую способность определения распределения электрофизических свойств и микрорельефа объекта.

В БПСММ размеры апертуры существенно меньше (в $10^4 \dots 10^6$ 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. 1) накопительная часть I обеспечивает одновременное повышение добротности и согласование её с малоразмерной апертурой II, обеспечивающей заданную пространственную разрешающую способность.

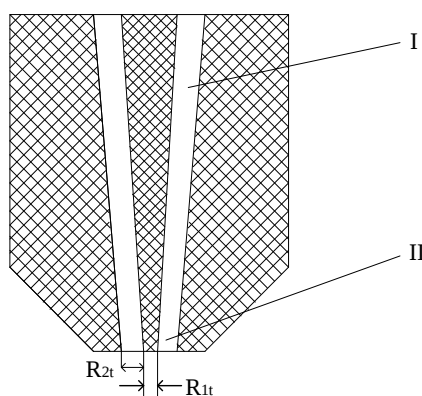


Рис. 1. Общий вид модели

В БПСММ 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.

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.

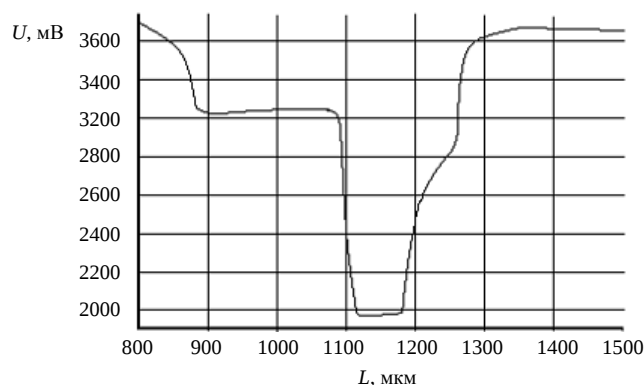


Рис. 2. Результат сканирования тестового объекта

До реконструкции края ступенек металлизации определяются с точностью 30...40 мкм (рис. 2) при сканировании тестового объекта датчиком, расположенным на высоте 40 мкм, с диаметром острия коаксиального зонда 30 мкм.

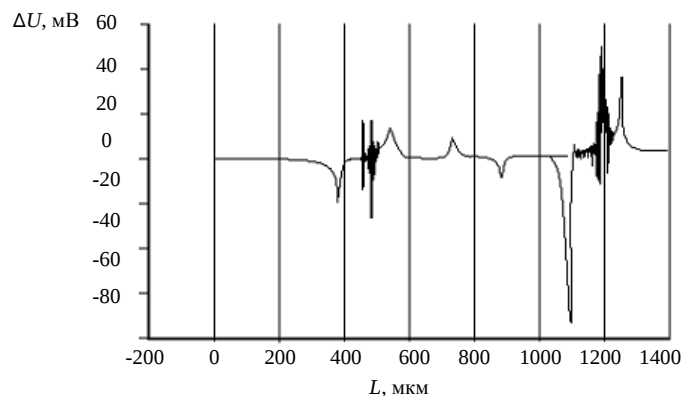


Рис. 3. Результат предварительной обработки прямого и обратного сканирования

Представленная зависимость изменения сигнала от длины образца (рис. 3) 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 $E_{0f}(x,y,z)$ 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.

Для микроволновой микроскопии целесообразным представляется применение модуляционной методики выделения сигналов, обеспечивающей одновременное определение нескольких параметров, повышение чувствительности и точности измерений, а так же 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 одновременного определения нескольких параметров 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 совмещение нескольких 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.

На рис. 4 представлена структурная схема установки для измерения параметров по торцу монокристалла. При сравнении структуры измерительных установок на основе СВЧ резонатора (рис. 4, а) и автодинного датчика (рис. 4, б) видно, что измерительная установка на автодинном датчике имеет гораздо меньше дополнительного оборудования, что в свою очередь упрощает конструкцию, снижает цену и габариты установки.

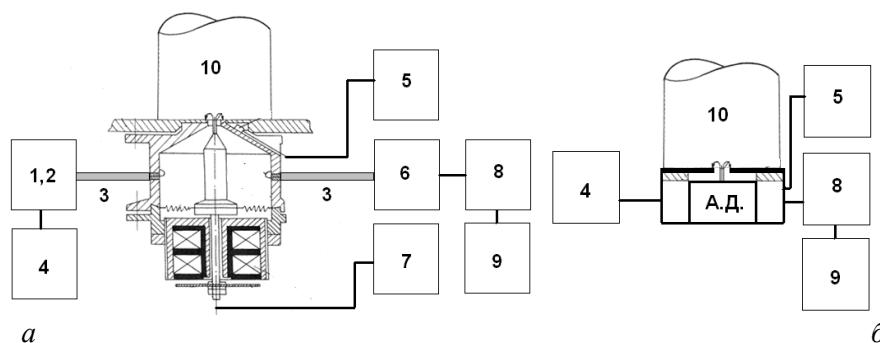


Рис. 4. Измерительная установка на основе а) СВЧ резонатора; б) автодинного датчика, где 1) источник сигнала; 2) резонатор; 3) волновод; 4) источник питания; 5) генератор импульсов; 6) детектор; 7) модуль управления; 8) устройство выделения сигнала; 9) компьютер; 10) образец

На рис. 5 приведена схема устройства регистрации автодинного сигнала на операционном усилителе [5]. Вход-выход приемо-передающего модуля на гибридно-интегральной схеме КВЧ на диоде Ганна – 1 соединён с антенной – 2. Отрицательный вывод диода – 1 подключен к отрицательной шине – 4 источника питания – 5, а другой вывод (анодный) – 6 – к инвертирующему входу – 7 операционного усилителя – 8 и через сопротивление – 9 и переход эмиттер-

коллектор n - p - n транзистора – 10 к положительной шине – 11 источника питания. Неинвертирующий вход – 12 операционного усилителя – 8 подключен к источнику опорного напряжения – 13, выполненному на стабилитроне – 14, подключенном анодным выводом к отрицательной шине – 4, а катодным выводом через резистор – 15 – к положительной шине – 11 источника питания – 5. Между выходом – 16 операционного усилителя – 8, подключенного через развязывающий конденсатор – 17 к входу схемы обработки доплеровского сигнала – 18 и базой транзистора – 10 включен частотно-зависимый четырёхполюсник – 19, представляющий собой инерционно-форсирующее звено, состоящее из резистора – 20, подключенного между выходом – 16 операционного усилителя – 8 и базой транзистора – 10, и последовательно соединённых резистора – 21 и конденсатора – 22, включённых между базой транзистора – 10 и отрицательной шиной – 4. Выводы питания – 23, 24 операционного усилителя – 8 подключены к общим шинам – 11, 4 соответственно. В отсутствие в зоне обнаружения движущихся объектов и на входе антенны – 2 сигнала при подаче напряжения от источника питания – 5 на устройство на неинвертирующем входе – 12 операционного усилителя – 8 устанавливается опорное напряжение, определяемое величиной пробивного напряжения стабилитрона – 14. На инвертирующий вход – 7 операционного усилителя – 8 подаётся напряжение питания автодинного генератора. Операционный усилитель – 8 вырабатывает сигнал рассогласования, зависящий от абсолютной разности напряжений на его входах – 12, 7.

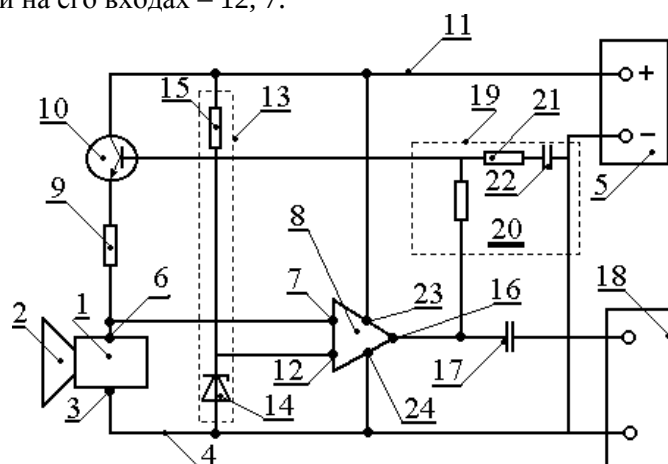


Рис. 5. Принципиальная схема устройства выделения автодинного сигнала

Данный сигнал через цепь отрицательной обратной связи, включающую в себя последовательно соединённые четырёхполюсник – 19, транзистор – 10 и резистор – 9, воздействует на величину напряжения питания автодинного генератора – 1. Благодаря высокому значению коэффициента усиления операционного усилителя – 8 (порядка нескольких тысяч и более) напряжение на выходе – 6 автодинного генератора – 1 поддерживается неизменным и равным величине опорного напряжения, что одновременно обеспечивает высокую стабильность режима работы автодинного генератора – 1 при случайных изменениях рабочего тока генераторного диода – 1. Приложенное к выводам – 6, 3 автодинного генератора – 1 на диоде Ганна постоянное напряжение обеспечивает возбуждение КВЧ колебаний в его резонансной системе, которые через приёмо-передающую антенну – 2 излучаются в пространство.

С появлением в зоне диаграммы направленности антенны – 2 подвижного отражающего объекта последний вызывает доплеровский сдвиг частоты отраженного от него излучения, которое через антенну – 2 подводится к активному элементу диода Ганна автодинного генератора – 1 и приводит к модуляции амплитуды и частоты КВЧ колебаний, и величины рабочего тока диода. Промодулированный доплеровской частотой рабочий ток диода стремится изменить потенциал вывода – 6 генератора – 1, однако операционный усилитель – 8 посредством цепи обратной связи отрабатывает эти изменения и полностью компенсирует их противофазным изменением потенциала на эмиттере транзистора – 10. Таким образом, модуляционная составляю-

шая тока диода Ганна i генератора – 1, проходящая через резистор – 9, образует автодинное переменное напряжение U на эмиттере транзистора – 10, равное $U = iR$. Частотно-зависимый четырёхполосник – 19 в цепи обратной связи вносит затухание $\beta(\Omega)$, зависящее от доплеровской частоты Ω . Данное затухание в цепи обратной связи компенсируется операционным усилителем – 8 путём формирования управляющего сигнала на его выходе – 16 в $\beta(\Omega)$ раз большей величины, т. е. на входе устройства обработки сигнала – 18 автодинное переменное напряжение оказывается равным $U_{\text{вых}} = iR \beta(\Omega)$. Вводимое таким образом усиление $\beta(\Omega)$ позволяет уменьшить величину R резистора – 9 и тем самым снизить энергопотребление автодина за счёт сокращения рассеиваемой постоянной мощности на резисторе – 9.

Так, например, в автодине СВЧ диапазона при величине $R = 150$ Ом, рабочем токе диода Ганна $I_p = 0,1$ А и рабочем напряжении (8÷9) В КПД = 0,83, а при токе $I_p = 1,0$ А КПД = 0,33. В КВЧ диапазоне при использовании серийных диодов 3А761 ($U_{\text{раб.}} = 3\div 4, 5$ В, $I_p \leq 1,7$ А) или 3А763 ($U_{\text{раб.}} = 3\div 4$ В, $I_p \leq 1,5$ А) КПД ещё ниже и составляет $0,16\div 0,21$ и его можно повысить в 3÷5 раз при уменьшении резистора R до единиц Ом при сохранении величины переменной составляющей автодинного сигнала. Выбор параметров частотнонезависимого четырёхполосника, выполненного на основе активного RC-фильтра, (величин резисторов 20 и 21 соответственно $1,2 \cdot 10^5$ Ом и $1,2 \cdot 10^3$ Ом, а ёмкости 22 равной $1 \cdot 10^{-4}$ Ф), обеспечивает повышенную автодинную чувствительность в заданном диапазоне доплеровских частот и возможность создания необходимой амплитудно-частотной характеристики автодинного приёмо-передающего тракта автодинного радиолокатора. Применение в качестве автодинного датчика гибридно-интегральной схемы КВЧ на 2-х мезовом планарном диоде Ганна позволяет, при сохранении энергетического потенциала автодина, снизить энергопотребление ещё на порядок по сравнению с корпусными серийными диодами Ганна.

Выводы

1. 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.
2. Для повышения чувствительности необходимо увеличивать добротность при той же резонансной частоте датчика с зондом.
3. Упрощение КВЧ микроскопа может быть достигнуто при использовании автодинных датчиков

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордиенко Ю.Е., Мельник С.И., Петров В.В., Слипенко Н.И. Реализация новых направлений повышения пространственной разрешающей способности микроволновой микроскопии полупроводников // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо`2007): Матер. XVII Междунар. Крымской конф. – Севастополь, 2007. – С. 547–548.
2. Гордиенко Ю.Е., Слипенко Н.И., Яцкив А.М. Ближнеполевой СВЧ датчик на основе конусного коаксиального резонатора // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо`2009): Матер. XIX Междунар. Крымской конф. – Севастополь, 2009. – С. 565–566.
3. Hong S., Kim J., Lee K., Kim J.T., Cha D., Lee Y. Tunable resonance cavity control in a near-field scanning microwave microscope // Journal of the Korean physical society. – 2002. – V. 40. – № 5. – P. 861–865.
4. Усанов Д.А., Тупикин В.Д., Скрипаль А.В., Коротин Б.Н. Радиоволновые измерители на основе эффекта автодинного детектирования в полупроводниковых СВЧ генераторах // Оптические радиоволновые и тепловые методы и средства неразрушающего контроля качества промышленной продукции: Тезисы докл. Всесоюзной научно-техн. конф. – Саратов, 1991. – С. 4–6.
5. Юрченко А.В., Юрченко В.И., Воторопин С.Д. Автодинные датчики в измерительной технике. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 128 с.

Поступила 01.11.2011 г.